

TRAITÉ ÉLÉMENTAIRE DE PHYSIQUE;

PAR M. L'ABBÉ HAÛY,

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'Éna, 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 SECOND.

PARIS,

M^{ME} V^{ME} COURCIER, LIBRAIRE POUR LES SCIENCES,

RUE DU JARDINET-SAINTE-ANDRÉ-DES-ARCS.

1821.

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

T A B L E

DES PRINCIPAUX ARTICLES

CONTENUS DANS CE VOLUME.

4. DE L'ÉLECTRICITÉ GALVANIQUE,	pag. 1
VII. DU MAGNÉTISME,	53
1. <i>Des Principes généraux de la Théorie du Magnétisme,</i>	
2. <i>De la Loi que suivent les Actions magnétiques à raison de la distance,</i>	58
3. <i>Des Attractions et Répulsions magnétiques,</i>	63
4. <i>De la communication du Magnétisme,</i>	83
5. <i>Du Magnétisme du Globe terrestre,</i>	95
6. <i>Du Magnétisme des Mines de Fer,</i>	124
7. <i>Des différentes Hypothèses imaginées par les Physiciens, sur la cause du Magnétisme qu'exerce le Globe Terrestre,</i>	130
8. <i>Des Expériences électro-magnétiques,</i>	136
VIII. DE LA LUMIÈRE,	144
1. <i>De la Nature et de la Propagation de la Lumière,</i>	147
2. <i>De la Réflexion et de la Réfraction de la Lumière,</i>	159
3. <i>De la Lumière décomposée, ou des Couleurs,</i>	196
4. <i>De la Vision Naturelle,</i>	280
5. <i>De la Vision aidée par l'Art,</i>	316

Fin de la Table des principaux Articles du Tome II.

ERRATUM. Page 135, ligne 4 en remontant, **inspire**, *lisez* imprime

TRAITÉ ÉLÉMENTAIRE DE PHYSIQUE.

SUITE DE LA THÉORIE DE L'ÉLECTRICITÉ.

4. De l'Electricité galvanique.

765. L'ÉLECTRICITÉ, enrichie par les travaux de tant de physiciens distingués, semblait être arrivée au terme où une science n'a plus de pas importants à faire, et ne laisse à ceux qui la cultiveront dans la suite, que l'espoir de confirmer les découvertes de leurs prédécesseurs, et de répandre un plus grand jour sur les vérités dévoilées. On eût cru que toutes les recherches pour diversifier les résultats de l'expérience étaient épuisées, et que la théorie elle-même ne pouvait plus s'accroître, qu'en ajoutant un nouveau degré de précision aux applications des principes déjà connus. Tandis que la science paraissait tendre ainsi vers le repos, les phénomènes des mouvemens convulsifs, observés par Galvani dans les muscles d'une grenouille mis en communication avec des métaux, vinrent s'offrir à l'attention et à l'étonnement des physiciens, avec des caractères faits pour en imposer sur le méca-

TOME II.

1

nisme qui les produisait. Mais au moins l'électricité fut nommée dans les premières explications qu'on essaya d'en donner. Tous les esprits se tournèrent dès-lors vers cette nouvelle branche de Physique. On varia, ou plutôt on accumula les expériences; et les phénomènes, qui d'abord avaient été bornés à jouer un rôle dans l'économie animale, passèrent depuis dans le domaine de la Chimie, où leur manière d'opérer la décomposition de l'eau devint, pour plusieurs savans, un sujet de douter que le fluide électrique fût ici le véritable agent.

766. Pendant que les incertitudes se multipliaient avec les discussions, Volta, placé au sein de cette même Italie, qui avait été le berceau des nouvelles connaissances, découvrit le principe de leur véritable théorie dans un fait qui ramène l'explication de tous les phénomènes au simple contact de deux substances de différentes natures. Ce fait est devenu entre ses mains comme le germe de l'admirable appareil auquel sa manière d'être et sa fécondité, assignent un des premiers rangs parmi ceux dont le génie de l'homme a enrichi la Physique.

Nous allons exposer d'abord les phénomènes qui ont donné naissance à l'électricité appelée *galvanique*; nous ferons connaître ensuite la théorie à l'aide de laquelle Volta est parvenu à les expliquer; de là nous passerons à d'autres phénomènes qui, comme les premiers, tiennent à l'économie animale, mais qui sont produits par les mouvemens spontanés de certains poissons, dont le plus connu est la torpille; enfin nous considérerons l'électricité galvanique sous les rapports qui la lient avec la Chimie par la décomposition de l'eau.

Origine de l'Electricité galvanique.

767. Les premières traces de l'espèce d'électricité dont il s'agit ici, se trouvent dans le récit que Sulzer a publié en 1767, de l'expérience suivante, aujourd'hui très connue. On prend deux pièces de deux métaux différens, tels que le plomb et l'argent; on en place une sur la langue et l'autre en-dessous, de manière qu'elles dépassent le bout de cet organe, puis on les incline l'une vers l'autre.

tre par leurs extrémités saillantes, jusqu'à ce qu'elles se touchent, au moment du contact, on éprouve une saveur que Sulzer compare à celle qu'excite le sulfate de fer. Il en conclut que la jonction des deux métaux opère dans l'un ou dans l'autre, ou dans tous les deux, une vibration de leurs particules, qui doit nécessairement agir sur les nerfs de la langue, et y produire la sensation dont nous avons parlé. Il arrive assez souvent à ceux qui font cette expérience, d'être en même temps affectés par une espèce de lueur qui semble leur passer devant les yeux.

768. Le phénomène que nous venons de citer, quoique du même genre que ceux qui appartiennent à la nouvelle branche d'électricité, n'eut d'abord aucune suite. Ce ne fut qu'en 1789 qu'un autre fait, amené par le hasard, donna l'impulsion aux esprits pour se porter vers une carrière où tant de résultats intéressans les attendaient. Un étudiant en Médecine, de Bologne, était occupé à disséquer une souris vivante, qu'il tenait d'une main dans une position fixe, lorsque ayant touché un des nerfs avec son scalpel, il ressentit aussitôt une commotion semblable à celle que produit l'électricité (1). Ce fait, dont le bruit se répandit en Italie, donna lieu à diverses conjectures sur la nature de l'agent dont il dépendait, et que plusieurs physiciens regardèrent comme étant le fluide nerveux, qu'ils identifiaient avec le fluide électrique.

769. Peu de temps après, un nouveau phénomène se présenta, et d'une manière encore inattendue, chez Galvani, professeur d'Anatomie dans la même ville. On avait placé sur une table où se trouvait une machine électrique, des grenouilles écorchées que l'on destinait à faire des bouillons. Un élève s'avisa d'approcher la pointe d'un scalpel des nerfs cruraux d'un de ces animaux; à l'instant tous les muscles de la grenouille éprouvèrent de fortes convulsions. Un autre élève crut avoir remarqué que cet effet avait eu lieu au moment où l'on tirait une étincelle du conducteur de la machine. Galvani, qui alors était occupé d'un objet

(1) Essai sur l'Histoire générale des Sciences, pendant la révolution française, par J.-B. Biot, p. 19.

différent, ayant été averti de ce qui venait de se passer, répéta l'expérience, tantôt en faisant de même concourir l'étincelle électrique avec l'application de la pointe du scalpel sur les nerfs de la grenouille, tantôt en employant séparément, soit l'action de la machine, soit celle du scalpel, et il vit que les contractions n'avaient pas lieu dans ce dernier cas, et que l'étincelle suffisait pour les faire naître (1). On conçoit aisément que les grenouilles se trouvant dans la sphère d'activité de la machine, et n'étant pas isolées, devaient acquérir l'électricité résineuse, pendant que la machine était en jeu. Venait-on à tirer une étincelle du conducteur? la rentrée subite du fluide vitré dans le corps de la grenouille, déterminait un effet semblable à celui qui est connu sous le nom de *choc en retour* (735).

Galvani varia l'expérience de plusieurs manières; il se servit de l'électrophore et de divers appareils; il essaya même l'action produite par l'électricité de la foudre, et dans tous les cas où les moyens qu'il employait se trouvèrent propres à mettre en activité une certaine quantité de fluide électrique, il obtint des effets analogues.

770. Jusqu'ici ce physicien s'était agité vainement, pour chercher quelque chose de nouveau dans des phénomènes, où des connaissances plus approfondies ne lui auraient laissé apercevoir que des résultats de l'électricité ordinaire. Toutes ses tentatives n'avaient abouti qu'à manifester l'extrême susceptibilité des animaux à sang froid relativement à l'action électrique, et s'il y avait ici un fait remarquable, il n'intéressait que la Physiologie. Un jour qu'il tenait une grenouille suspendue par la moelle épinière à un crochet de cuivre, il lui vint en idée de presser ce crochet contre les barreaux de fer d'un balcon, et en répétant cette opération, il vit plus d'une fois les muscles de la grenouille entrer en contraction; et peu s'en fallut qu'il ne s'éblouît sur cette heureuse indication, en rejetant la cause du phénomène sur l'électricité de l'atmosphère (2). Mais ayant transporté la grenouille dans un

(1) *Aloysii Galvani, de Viribus Electricit., in motu musculari Commentar., p. 2.*

(2) *Ibid., p. 17.*

appartement dont les fenêtres étaient fermées, il la plaça sur une plaque de fer, et tandis qu'il pressait contre cette plaque le crochet auquel était attachée la grenouille, il vit les contractions se renouveler. Une suite d'expériences du même genre le conduisit à écarter tout ce qui était étranger au phénomène, et à circoncrire l'appareil dans ses véritables limites, en réduisant tout à une communication établie entre les muscles et les nerfs d'une grenouille, par le moyen d'un arc métallique.

771. Galvani avait remarqué que quand cet arc n'était formé d'un métal, les contractions étaient ou nulles ou très légères et que pour les rendre fortes et durables, il fallait employer un arc composé de deux métaux différens (1). Une autre observation, non moins importante, qui est due au même physicien, consiste en ce que pour exciter des contractions dans la grenouille, il n'est pas indispensable de faire intervenir l'action d'un corps étranger. Lorsque les grenouilles sont fraîches, et que leur irritabilité jouit de toute son énergie, il suffit de mettre les muscles cruraux en contact avec les nerfs lombaires, pour obtenir des effets sensibles (2). Aldini, neveu de Galvani, et l'un de ses collaborateurs, a vérifié ce fait, depuis peu, dans des expériences entreprises sur de grands animaux, et sur des hommes dont la mort était récente.

772. Reprenons maintenant, avec plus de détail, les résultats obtenus par Galvani, en y joignant ceux des autres physiciens qui se sont occupés des mêmes expériences. Le but général de ces expériences est d'établir, au moyen d'un conducteur composé ordinairement de plusieurs métaux différens, une communication entre deux points de l'animal, pris dans une suite d'organes nerveux ou musculaires. On a nommé *arc animal* la partie de ces organes située entre les points de contact, et *arc excitateur* les substances métalliques à l'aide desquelles ces mêmes points sont mis en communication.

773. Les organes que l'on a choisis de préférence pour les soumettre à l'expérience, sont les nerfs cruraux et les muscles de la

(1) *Aloysii Galvani, etc., Commentar., p. 20.*

(2) *Histoire du Galvanisme, par Sue, t. I, p. 133.*

même partie, dans lesquels les premiers se distribuent. Lorsqu'on a mis, par exemple, un nerf crural à nu, si l'on place une feuille de plomb au-dessous de ce nerf, puis une feuille d'argent sous la cuisse située du même côté, et qu'ensuite on établit la communication entre le plomb et l'argent, au moyen d'un excitateur de cuivre, les muscles cruraux éprouveront, au moment du contact, une forte contraction, qui se manifestera par un mouvement convulsif de la cuisse et de la jambe.

774. Si l'on place un des supports à l'extrémité du nerf, et l'autre sur le milieu du même nerf, le double contact de l'arc excitateur produira également des convulsions dans la cuisse et la jambe voisine.

775. Si on laisse la grenouille revêtue de sa peau, et qu'après l'avoir fixée on place une feuille de plomb sur le ventre et une d'argent sur le bassin, les mouvements convulsifs auront encore lieu, par le double contact de l'arc excitateur, mais ils seront beaucoup plus faibles.

776. On peut supprimer un des supports, par exemple, celui du nerf, et se contenter de mettre en contact ce nerf nu avec une des extrémités de l'arc excitateur, tandis que l'autre extrémité va toucher la feuille d'argent placée en dessous du muscle. Les convulsions ont lieu pour celui-ci, comme dans le cas de deux supports.

777. Enfin, on réussira encore à produire les convulsions, en plaçant le nerf et le muscle sur des pièces faites d'un même métal, et en rapprochant ensuite ces pièces l'une de l'autre jusqu'au contact. Mais alors les commotions sont moins sensibles; on ne les obtient pas indifféremment par tous les temps, et elles deviennent nulles, si les grenouilles sont faibles ou fatiguées.

Les détails relatifs à une belle suite d'expériences de ce genre, exécutées avec autant de sagacité que de soin, se trouvent consignés dans un rapport fait par le célèbre Hallé, à la classe des Sciences mathématiques et physiques de l'Institut national, au nom de la commission nommée pour examiner et vérifier les phénomènes du galvanisme.

On ne connaissait pas encore à cette époque la théorie de

Volta sur le même sujet, et il ne sera pas indifférent de reprendre ici plusieurs circonstances particulières qui s'étaient offertes à Hallé et à d'autres physiciens, dans le cours des expériences entreprises sur les grenouilles, et qui ont dû faire naître une surprise que les résultats du célèbre physicien de Payie ont dissipée.

778. Nous avons déjà dit que pour mieux assurer le succès de ces expériences, il était nécessaire de composer l'arc métallique de plusieurs métaux différens. Ainsi, dans la première expérience que nous avons citée, l'arc métallique était formé d'une lame de plomb, d'une pièce d'argent, et d'un conducteur de cuivre. On pouvait encore réussir, en composant l'arc métallique seulement de deux pièces, pourvu qu'elles différassent au moins en quelque chose par leur nature; et ici de simples nuances qu'on aurait été tenté de regarder comme d'une légère conséquence, semblaient faire la loi aux résultats.

Vailli, que l'on pourrait regarder comme le successeur de Galvani, relativement aux recherches sur la nouvelle branche d'électricité, avait observé que quand les deux pièces dont on armait les organes de la grenouille étaient faites avec du plomb de vitrier, un arc exciteur du même plomb ne produisait aucun effet; mais si l'on substituait du plomb d'essai, qui est toujours beaucoup plus pur, à une des armures seulement, et que l'on continuât d'employer un exciteur fait avec du plomb de vitrier, ainsi que l'autre armure, les convulsions reparaissaient. Hallé, pour déterminer une différence entre deux métaux, qui étaient d'ailleurs identiques, se contentait d'en frotter un avec quelque autre métal. Ainsi, il plaçait sous le nerf une plaque d'argent qui était intacte, et sous le muscle une autre plaque du même métal, frottée auparavant avec du cuivre, de manière que la partie qui avait subi le frottement fût en contact avec l'organe, et il suffisait de réunir les deux plaques pour obtenir un effet sensible. Dans une autre expérience, il combina une plaque d'argent pur, avec une seconde, où le même métal était allié seulement de $\frac{1}{16}$ d'un métal différent; et les convulsions se manifestèrent. Les faits suivans méritent encore de fixer l'attention: une des armures étant d'argent, et l'autre de plomb, l'expérience a

réussi avec un excitateur de plomb, mais elle a manqué, lorsque les deux armures étant d'argent, on s'est servi d'un excitateur de cuivre. De là il résultait qu'une différence quelconque entre les métaux qui composaient l'arc excitateur, donnait à cet arc une influence très marquée sur les phénomènes. Mais il fallait éviter d'employer des supports parfaitement identiques, lors même que l'excitateur était d'un métal différent. Nous verrons bientôt que ces effets, qui paraissent si difficiles à concevoir, tenaient de si près au véritable principe de la théorie, qu'il serait difficile de choisir des expériences plus propres à le vérifier et à en faire des applications intéressantes.

Premières Théories relatives à l'Électricité galvanique.

779. Donnons maintenant une idée de la manière dont on a d'abord envisagé la cause des phénomènes que nous venons d'exposer. Galvani les faisait dépendre de ce qu'il appelait le *fluide nerveux électrique*, et pensait que les convulsions qu'éprouvait la grenouille, semblables à la commotion que produit la bouteille de Leyde, avaient lieu par un rétablissement d'équilibre entre deux électricités opposées, l'une positive, l'autre négative. Et comme il avait quelquefois observé qu'un arc formé d'un seul métal agissait sur la grenouille, il ne lui paraissait nullement naturel d'imaginer que ce métal unique pût être le siège des deux électricités, et ainsi il ne restait selon lui, d'autre parti à prendre, que de les placer dans l'animal lui-même (1).

Il s'agissait ensuite de savoir si l'une de ces électricités résidait dans le muscle, et l'autre dans le nerf, ou si elles existaient simultanément dans chacun des deux organes. Galvani, après avoir tenté inutilement de résoudre la question par des expériences décisives, s'arrêta à l'hypothèse qui lui parut la plus vraisemblable. Suivant cette hypothèse, le muscle était le siège des deux électricités ; sa partie intérieure se trouvait dans l'état posi-

(1) *De Viribus Electricit., in motu musculari Commentar.*, p. 21 et 23.

tif, tandis que sa surface extérieure était négative. C'était comme une petite bouteille de Leyde, toujours prête à se décharger. Les nerfs qui communiquent avec les muscles faisaient simplement l'office de conducteurs. L'électricité positive passait de l'intérieur du muscle, d'abord dans le nerf, et ensuite dans l'arc excitateur, qui la transmettait à la surface extérieure du muscle, et cette décharge, analogue à celle qui a lieu dans l'expérience de Leyde, produisait la commotion (1).

780. Vailli adoptait aussi le concours des deux électricités dans le phénomène des contractions musculaires, avec cette différence, qu'il regardait l'intérieur des muscles comme étant électrisé négativement, et l'extérieur comme étant à l'état positif. (2).

781. Volta s'était d'abord déclaré lui-même en faveur de cette existence d'une double électricité inhérente à l'animal; mais il pensait qu'elle agissait d'une manière différente. Ce célèbre physicien prit une bouteille de Leyde très faiblement chargée, il mit le crochet de cet instrument en contact avec les nerfs d'une grenouille, et fit communiquer la garniture extérieure avec les muscles. Il crut apercevoir que, dans ce cas, la grenouille recevait des impressions, tandis qu'elle paraissait insensible lorsqu'on présentait la bouteille en sens contraire aux deux organes. Il fut porté à en conclure que les nerfs étaient le siège de l'électricité négative, et les muscles celui de l'électricité positive (3). Galvani ayant eu connaissance de cette explication, la trouva si plausible qu'il se rendit, en avouant néanmoins qu'elle lui semblait laisser encore quelques doutes à éclaircir (4). Mais la science réservait à Volta une victoire plus digne de lui.

782. Un de ceux qui aient attaqué avec le plus d'avantage la théorie de Galvani, est le savant Pfaff, professeur à Kiel. Il prouva

(1) *De Viribus Electricit., in motu musculari Commentar.*, p. 40 et suiv.

(2) Histoire de l'Electricité, t. I, p. 58.

(3) Voyez la Lettre de Carminati à Galvani, insérée p. 67 et suiv., dans le Commentaire déjà cité.

(4) Voyez la réponse de Galvani, à la fin du même ouvrage.

qu'il s'en fallait de beaucoup que la comparaison entre les organes de la grenouille et la bouteille de Leyde, fût exacte sous tous les rapports. Il citait, entre autres expériences, celle où les deux armures étant appliquées sur le nerf, les contractions ne laissaient pas de se manifester, quoique, dans ce cas, l'arc exciteur qui produisait la décharge reposât, par ses extrémités, sur le conducteur de la prétendue machine électrique. Il est facile de juger que cette observation attaquait également toutes les autres manières de concevoir le phénomène, qui jusqu'alors avaient été proposées.

Théorie de Volta.

783. Dans les premières expériences entreprises par Galvani, les effets étaient dus à l'influence de l'électricité ordinaire sur les organes d'une grenouille. Galvani écarta bientôt cette influence, et réduisit tout à une combinaison des mêmes organes et d'un arc métallique. Rien ne paraissait alors si simple que cet appareil. Mais le moment n'était pas arrivé, où Volta devait annoncer aux physiciens qu'il ne fallait que des métaux pour mettre en évidence le véritable principe de la théorie. C'est en partant de ce moment que nous allons exposer la marche progressive de nos connaissances sur le sujet qui nous occupe.

Action mutuelle de deux Métaux au contact.

784. On avait cru que, dans les expériences auxquelles on soumettait les grenouilles, l'impulsion donnée à l'électricité dépendait de l'arc animal. Il ne sert, au contraire, qu'à la recevoir et à manifester l'effet, et la véritable cause réside dans l'arc métallique. On avait remarqué que, dans cet arc, la réunion de deux métaux de différente nature était une circonstance importante pour le succès des expériences. Elle l'est au point que c'est le contact de ces métaux qui détermine l'action électrique. Voici donc le fait principal d'où dérivent tous les autres.

785. Si deux métaux différents, isolés, et n'ayant que leur fluide électrique naturel, sont mis en contact, ils se constituent dans

deux états opposés d'électricité, de manière que si on les sépare ensuite, l'un donnera des signes d'électricité vitrée, et l'autre des signes d'électricité résineuse. Supposons, par exemple, que l'on applique l'un contre l'autre deux disques, l'un z de zinc, l'autre c de cuivre (*fig. 1*, Pl. 1), attachés par le milieu de leurs surfaces opposées au contact à des cylindres de verre df, ab , dont l'observateur tient les extrémités dans ses mains, pour que les disques restent isolés. Le zinc, dans ce cas, acquerra l'électricité vitrée, et le cuivre l'électricité résineuse. C'est ce dont on pourra s'assurer, à l'aide du condensateur (*fig. 2*) que nous avons déjà décrit (722). Après avoir séparé les deux disques, on portera celui de zinc sur le bouton g , et en même temps on touchera avec celui de cuivre quelqu'un des corps environnans, pour remettre ce disque dans l'état naturel. On répétera cette opération un certain nombre de fois, afin d'accumuler dans le plateau collecteur, les petites quantités de fluide vitré qu'acquiert le zinc chaque fois qu'on applique les deux disques l'un contre l'autre. Si l'on enlève ensuite le plateau supérieur ab , les pailles de l'électromètre s'écarteront, et la proximité d'un bâton de cire d'Espagne électrisé par le frottement, indiquera dans ces pailles une électricité vitrée, en les déterminant à se rapprocher. Si l'on recommence l'expérience, et que l'on substitue le disque de cuivre à celui de zinc, en le mettant en contact avec le bouton g , après chaque application des deux disques, on trouvera que l'électricité des pailles est résineuse.

786. Pour faciliter l'explication des phénomènes, nous représenterons par l'unité la somme des deux électricités vitrée et résineuse, dont l'une appartient au zinc, et l'autre au cuivre; cette somme, partagée également entre les deux disques, donne $\frac{1}{2}$ pour la quantité de fluide de chacun d'eux; et si, pour distinguer la fraction qui indique l'électricité résineuse, nous lui donnons le signe négatif, l'état du zinc sera exprimé par $+\frac{1}{2}$, et celui du cuivre par $-\frac{1}{2}$. Nous verrons bientôt que les quantités absolues de fluide peuvent varier dans les deux métaux, par l'effet de certaines circonstances. Mais la différence 1, entre les états des deux disques, reste constamment la même.

Cette manière d'exprimer les états des deux disques suppose qu'ils soient isolés. Mais concevons qu'au moment même où ils le sont, on établisse une communication entre le disque de cuivre et les corps environnans, alors ce disque tendra à reprendre au sol une quantité d'électricité vitrée propre à neutraliser son électricité résineuse; d'où il suit que son nouvel état sera représenté par zéro. Mais si le zinc, dont l'état était $+\frac{1}{2}$, n'éprouvait en même temps aucun changement, la différence entre les états des deux disques serait simplement $\frac{1}{2}$; or, d'après ce que nous avons dit, elle doit être égale à l'unité: ainsi, pour que cette condition ait lieu, le zinc acquerra, aux dépens du sol, une nouvelle quantité de fluide vitré égale à celle qu'il avait déjà; en sorte que l'état du cuivre étant toujours zéro, celui du zinc sera représenté par l'unité.

Si au contraire c'était le disque de zinc qui fût en communication avec les corps environnans, son état deviendrait zéro, et celui du cuivre serait -1 , comme il est facile de le concevoir.

Effet des Conducteurs humides.

787. Introduisons maintenant dans l'appareil des corps humectés d'eau, et voyons ce qui doit en résulter. Selon Volta, lorsqu'un de ces corps est placé entre deux métaux, son effet se borne, au moins sensiblement, à transmettre le fluide d'un métal à l'autre; et alors la répartition se fait comme dans les cas ordinaires, c'est-à-dire que si les métaux sont semblables par leurs formes et égaux en surface, il y aura de même égalité entre leurs quantités de fluide, après la communication.

Ainsi, il y a deux cas d'équilibre, l'un au contact, qui exige une différence d'état égale à une constante entre les métaux différens par leur nature, l'autre à distance, avec interposition d'un corps humide, qui exige, toutes choses égales d'ailleurs, que les métaux soient dans le même état électrique.

788. Les expériences suivantes offrent, d'une manière très sensible, ces deux cas d'équilibre. On prend une lame métallique formée de deux morceaux, l'un de zinc, l'autre de cuivre, soudés

bout à bout; et, tandis que l'on tient à la main l'extrémité cuivre, on touche, avec l'extrémité zinc, le bouton *g* du plateau collecteur qui est de cuivre. Si l'on enlève ensuite le plateau non isolé, les pailles de l'électromètre ne donneront aucun signe d'électricité. Car l'état du cuivre que l'on tient à la main étant zéro, parce que le métal communique avec les corps environnans, l'état du zinc sera 1; et comme la même différence doit exister entre le zinc et le plateau collecteur, l'état de celui-ci sera encore zéro; d'où il résulte que l'appareil n'aura subi aucun changement.

789. Supposons maintenant que l'on place un papier imbibé d'eau entre le zinc et le plateau collecteur; celui-ci se chargera d'électricité vitrée. Car, pour que les deux cas d'équilibre aient lieu, il faut que l'état de l'extrémité cuivre, que l'on tient entre les doigts, soit toujours zéro, que l'état du zinc soit toujours 1, et que celui du plateau collecteur, que l'on suppose avoir les mêmes dimensions que le morceau de zinc, soit de même représenté par l'unité, et il est d'ailleurs évident que l'électricité de ce plateau doit être vitrée comme celle du zinc.

790. La manière dont Volta conçoit la production d'électricité qui a lieu au contact des deux métaux, est un peu différente de celle que nous venons de présenter. Ce célèbre physicien paraît admettre une impulsion qui agit pour chasser dans le zinc une partie du fluide électrique que possédait le cuivre, et de là vient que le premier se trouve électrisé positivement, et l'autre négativement. Dans l'expérience (788) où l'on met en contact immédiat avec le plateau collecteur du condensateur, une pièce de zinc adhérente à une pièce de cuivre que l'on tient à la main, le plateau collecteur reste dans son état naturel, parce que le zinc est en contact des deux côtés avec cuivre et cuivre; d'où il suit que l'on a deux forces égales qui, agissant en sens contraire, se détruisent mutuellement (1). Nous avons préféré d'en user ici comme par rapport à l'électricité produite par le frottement ou par la chaleur, c'est-à-dire, de nous borner au simple énoncé des faits,

(1) Journal de Physique, vendémiaire an x, p. 212.

sans entrer dans sa considération de la force motrice, qui ne semble pas être encore bien connue.

Pile de Volta.

791. Nous sommes maintenant en état d'expliquer les effets de l'appareil que l'on a nommé *la pile de Volta*, et, dans cette explication, nous prendrons pour guide l'ouvrage le plus méthodique et le plus lumineux qui ait paru sur cette matière; savoir, le Rapport fait à la Classe des Sciences mathématiques et physiques de l'Institut national, par M. Biot, au nom d'une commission composée de douze membres pris dans cette même Classe. La pile dont il s'agit est formée de disques de deux métaux différens, par exemple, de cuivre et de zinc, réunis par paires base à base, avec des disques de carton ou de drap mouillé, interposés un à un entre chaque paire et la suivante, ainsi que le représente la *figure 3*, où la lettre *c* indique les disques de cuivre, la lettre *z* les disques de zinc, et la lettre *h* les conducteurs humides. Chaque paire de disques est regardée comme formant un des élémens de la pile.

Etat électrique de la Pile isolée.

792. Pour procéder avec plus de simplicité, considérons d'abord la pile comme isolée, et supposons que l'on ait commencé à la construire, en plaçant seulement la première paire *c 1*, *z 2* sur l'isoloir, le cuivre étant en dessous. Il est clair, d'après ce qui a été dit, que l'état du cuivre sera $-\frac{1}{2}$, et celui du zinc $+\frac{1}{2}$. Plaçons maintenant au-dessus du disque *z 2* un conducteur humide *h*, et au-dessus de ce dernier un disque de cuivre *c 3*. Pour que la condition de l'équilibre à distance fût remplie, il suffirait que le zinc *z 2* cédât au cuivre *c 3* la moitié de son fluide, et alors l'état du cuivre *c 1* étant toujours $-\frac{1}{2}$, celui du zinc *z 2* serait $\frac{1}{4}$, et celui du cuivre *c 3* serait aussi $\frac{1}{4}$. Mais alors la différence entre les deux premiers disques serait seulement $\frac{3}{4}$, au lieu qu'elle doit être égale à l'unité. Il s'établira donc entre les trois corps une nouvelle distribution de fluide, en vertu de laquelle l'état du

cuivre c 1 deviendra $-\frac{2}{3}$; celui du zinc z 2 sera $-\frac{2}{3} + 1$, ou $+\frac{1}{3}$, et celui du cuivre c 3 sera de même $+\frac{1}{3}$; ce qui satisfait aux deux conditions d'équilibre.

Si nous ajoutons un quatrième disque z 4, il faudra qu'il ait une unité de plus que le cuivre c 3, ce qui exigera un nouveau changement dans les quantités relatives de fluide des disques inférieurs, en sorte que l'on aura -1 pour le cuivre c 1, 0 pour le zinc z 2, 0 pour le cuivre c 3, et 1 pour le zinc z 4.

En poursuivant le même raisonnement, il sera facile de trouver les états électriques des différentes parties de la pile, quel que soit le nombre des disques qui la composent. Les quantités d'électricité vitrée et celles d'électricité résineuse formeront deux progressions arithmétiques, dans chacune desquelles la différence entre deux termes consécutifs sera l'unité.

793. Si l'on suppose que le nombre des disques soit pair, on aura l'état du premier c 1, en divisant ce nombre par 4, et en donnant au résultat le signe négatif. Ainsi, dans la pile que représente la figure, et qui est composée de 12 disques, l'état du premier est $-\frac{12}{4}$ ou -3 ; ce qui donne successivement pour les différentes paires $-3 - 2$, $-2 - 1$, $-1 + 0$, $+0 + 1$, $+1 + 2$, $+2 + 3$. Dans ce cas, la somme des deux progressions sera toujours zéro; le disque inférieur, qui est de cuivre, et le disque supérieur, qui est de zinc, seront dans deux états égaux et opposés d'électricité; et il en sera de même pour deux disques quelconques pris à égale distance des extrémités. De plus, l'action deviendra nulle, avant le passage de l'électricité résineuse à l'électricité vitrée, en sorte qu'il y aura deux disques dans l'état naturel, qui seront situés au milieu de la pile.

Si le nombre des disques est impair, on trouvera l'état du premier c 1, en prenant d'abord le quart de ce nombre avec le signe négatif, et en ajoutant au résultat l'unité divisée par quatre fois le même nombre. Supposons que le nombre des disques soit de 7, l'état du premier sera $-\frac{7}{4} + \frac{1}{4}$ ou $-\frac{3}{2}$. Ainsi, on aura successivement pour les différens disques, $-\frac{3}{2}$, $-\frac{5}{2}$, $-\frac{5}{2}$, $+\frac{3}{2}$, $+\frac{3}{2}$, $+\frac{5}{2}$, $+\frac{5}{2}$. Dans tous les cas de ce genre, la somme totale est aussi zéro.

*Passage de l'état d'Isolément à celui de
Communication avec le sol.*

794. Supposons maintenant que l'on mette le dernier disque z 12 en contact avec un corps conducteur isolé qui soit dans l'état naturel, et que nous désignerons par A; le disque z 12 lui communiquera une partie de son fluide, ce qui ne pourra se faire sans que le disque c 11 ne cède lui-même au disque z 12 une partie du sien, et ainsi de suite, de manière que les disques z 6, c 7, qui étaient à zéro, passeront à l'état négatif, et que les états de ceux qui sont en dessous deviendront encore plus négatifs.

795. Rendons ceci sensible par un exemple. Nous venons de voir que le progrès de l'électricité dans la pile réduite à ses éléments, est représenté par la série $-3 - 2, -2 - 1, -1 + 0, +0 + 1, +1 + 2, +2 + 3$. Concevons que le corps A, que l'on met en contact avec le disque z 12, ait une capacité électrique six fois aussi grande que celle du même disque, c'est-à-dire, qu'à raison d'une surface plus étendue et des autres circonstances, il lui faille six fois autant de fluide qu'au disque z 12, pour que la tension ou la densité électrique étant la même de part et d'autre, il y ait équilibre entre les deux corps. La nouvelle distribution qui s'établira dans la pile, par l'intervention du corps A, sera représentée par la série suivante, $-4 - 3, -3 - 2, -2 - 1, -1 + 0, +0 + 1, +1 + 2, 12$; dans laquelle le dernier terme 12 exprime l'état du corps A. De cette manière, les quantités de fluide du disque z 12 et du corps A satisfont à la condition de l'équilibre, qui exige qu'elles soient dans le rapport des capacités électriques (1). De plus, la différence d'état entre chaque disque et le suivant continue d'être égale à l'unité. Enfin la somme

(1) Soit x la quantité de fluide que doit avoir le disque z 12 dans le cas de l'équilibre. n le nombre des paires de disques dont la pile est composée, et q la capacité du corps A, lorsque celle du dernier disque est l'unité; on aura, en général, $x = \frac{n^2}{2n+q}$.

+ 16 des termes positifs, y compris le corps A qui, à cet égard, est censé ne faire plus qu'un avec le disque z 12, est la même, au signe près, que la somme — 16 des termes négatifs, conformément à la loi que nous avons exposée (793).

Il résulte de cette même distribution, que le point zéro ne répond plus au milieu de la série, mais se trouve relevé de deux rangs au-dessus de sa première position. C'est une suite de ce qu'une partie de la somme + 16 des termes positifs étant fournie par le corps A surajouté à la pile, le nombre de ceux qui appartiennent exclusivement à cette pile doit être plus petit que celui des termes négatifs dont la somme est — 16.

796. Si telle est la capacité du corps A, que la quantité de fluide du disque z 12 ne puisse être un nombre entier, il n'y aura point de zéro, mais seulement des termes positifs et des termes négatifs. Ainsi, en supposant que la capacité de A soit seulement quadruple de celle de z 12, on aura cette série, — $\frac{1}{4}$ — $\frac{1}{4}$, — $\frac{1}{4}$ — $\frac{1}{4}$ — $\frac{1}{4}$ — $\frac{1}{4}$, — $\frac{3}{4}$ + $\frac{1}{4}$, + $\frac{1}{4}$ + $\frac{5}{4}$, + $\frac{5}{4}$ + $\frac{9}{4}$, 9; dans laquelle la somme des termes positifs est + $\frac{37}{4}$, et celle des termes négatifs $\frac{57}{4}$. Dans le cas présent, le point zéro est censé se trouver entre la cinquième et la sixième fraction, en descendant (1).

797. On voit par ce qui précède, qu'à mesure que la capacité du corps A augmente, la position soit réelle, soit virtuelle, du zéro, s'élève de plus en plus; en même temps la tension électrique du dernier disque va en diminuant. Donc, si l'on suppose que la capacité du corps A soit infinie, le zéro correspondra à l'extrémité supérieure de la pile, c'est-à-dire, que la tension électrique du dernier disque étant infiniment petite ou nulle, ce disque sera dans l'état naturel, tandis que le reste de la pile se trouvera dans l'état résineux. Ce cas est celui d'une pile isolée par le bas, et dont le disque supérieur communique avec le réservoir commun, qui est censé avoir une capacité immense, par rapport à celle du même disque.

(1) En appliquant ici la formule précédente, on a $n=6$, et $q=4$, ce qui donne $x = \frac{36}{12+4} = \frac{9}{4}$ après quoi il est facile de trouver tout le reste.

798. Concevons, au contraire, que le corps A soit mis en contact avec l'extrémité inférieure de la pile; on aura des effets opposés aux précédens, c'est-à-dire, que le premier disque c 1 cédera au corps A une portion de son fluide résineux, et qu'une émission semblable aura lieu d'un disque à l'autre en descendant, de sorte que les disques z 6, c 7 qui étaient à zéro, passeront à l'état positif, et que l'état de chacun des disques situés au-dessus deviendra encore plus positif. Si nous supposons de nouveau que le corps A ait une capacité électrique six fois aussi forte que celle du disque c 1, on aura cette série $-12, -2 - 1, -1 + 0, + 0 + 1, + 1 + 2, + 2 + 3, + 3 + 4$; dans laquelle le premier terme représente l'état du corps A, qui est le même, ainsi que celui de tous les termes de la pile, que dans notre premier exemple, excepté que l'ordre est renversé et que les signes sont changés.

799. Si la capacité du corps A devient plus considérable, la position du point zéro s'abaissera davantage, et par une suite nécessaire la tension du premier disque s'affaiblira; et si la capacité du corps A est censée être infinie, le zéro répondra à l'extrémité inférieure de la pile, dont tous les disques qui suivent le premier seront à l'état vitré. C'est le cas d'une pile isolée par le haut, et en communication par le bas avec le réservoir commun.

La distribution du fluide vitré, dans ce dernier cas, étant toujours soumise aux conditions que la différence entre les états des disques d'une même paire soit l'unité, et qu'il y ait égalité entre deux disques situés de part et d'autre de chaque conducteur humide, il est aisé de voir que les états des différens disques de la pile seront successivement 0 1, 1 2, 2 3, 3 4, 4 5, etc. De là il suit que les états relatifs à chaque espèce de métal formeront une progression arithmétique croissante, dont le premier terme sera zéro pour le cuivre, et l'unité pour le zinc, et dans laquelle la différence entre deux termes consécutifs sera aussi l'unité. Le même raisonnement s'applique au cas où la pile est en communication par le haut avec le réservoir commun. Seulement les signes des termes de la progression sont alors négatifs.

800. Dans l'un et l'autre cas, la somme des termes des deux progressions réunies sera exprimée par le carré du nombre des

disques d'une même espèce, en supposant toujours que le nombre total des disques soit pair. Ainsi, dans la pile représentée par la figure, et qui renferme six disques de chaque espèce de métal, la somme des termes, ou, ce qui revient au même, la charge de la pile, a pour expression 36. Il en résulte que, toutes choses égales d'ailleurs, les phénomènes qui dépendent de la quantité d'électricité accumulée dans la pile, croissent plus rapidement que ceux qui dépendent de la quantité répandue sur le disque supérieur. Par exemple, si l'on ajoute deux disques aux douze qui composent la pile que nous considérons ici, la charge sera représentée par 49; dont la différence avec la précédente est 13, tandis que l'état du disque supérieur sera exprimé par 7, dont la différence avec celui de la pile précédente est simplement égale à l'unité.

La loi que nous venons d'exposer, relativement aux divers états des disques qui se succèdent dans la pile, est la plus simple que l'on puisse imaginer; mais il est très probable que des expériences plus précises que celles qui ont été faites jusqu'ici pour la reconnaître, y apporteront des modifications. On peut même présumer qu'il existe ici d'autres actions dont l'influence, quoique beaucoup plus faible que celle des métaux, méritera d'être appréciée, lorsque l'on voudra parvenir à une détermination rigoureuse, qui exigera toutes les ressources de la Physique la plus adroite, réunies à celles de la plus savante analyse.

801. Pour mieux saisir encore la différence qui existe entre la pile isolée et celle qui ne l'est pas, comparons-les l'une avec l'autre, relativement à leurs effets, pour charger le condensateur. Si l'on met la pièce supérieure d'une pile isolée en contact avec le plateau collecteur de cet instrument, celui-ci enlèvera une partie de l'électricité de la pile; de manière que les quantités de fluide des différens disques subiront une variation, jusqu'à ce que l'équilibre soit rétabli. Mais la charge du condensateur sera limitée d'après la circonstance même de l'isolement, qui réduit la pile à n'avoir que sa quantité naturelle de fluide, sans rien pouvoir dérober aux corps environnans. Supposons, au contraire, que la pile communique avec le sol par sa base. A mesure qu'elle cédera de son fluide au plateau collecteur, elle réparera ses pertes aux

dépens du réservoir commun; en sorte que la tension de sa pièce supérieure restera la même, et que le condensateur se chargera graduellement d'une quantité de fluide proportionnelle à sa capacité et à sa force condensante. On voit par là que, dans ce dernier cas, la charge du condensateur, toutes choses égales d'ailleurs, sera sensiblement plus forte que si la pile était isolée.

802. Tous les résultats qui viennent d'être exposés tendent à prouver que les accroissemens de densité électrique qui ont lieu successivement dans les différens disques, en allant de la base au sommet dans une pile non isolée, et du milieu vers les extrémités dans une pile isolée, dépendent de l'interposition des conducteurs humides. Concevons une pile non isolée, uniquement composée d'élémens métalliques placés immédiatement les uns au-dessus des autres. L'effet du premier élément se répétera de la base au sommet, sans aucun accroissement, en sorte que si la pile commence à l'ordinaire par un disque de cuivre, les états électriques de ses différens élémens seront représentés par cette suite, $0 + 1, 0 + 1, 0 + 1$, etc. Si, au contraire, la pile est isolée, la série deviendra, $-\frac{1}{2} + \frac{1}{2}, -\frac{1}{2} + \frac{1}{2}, -\frac{1}{2} + \frac{1}{2}$, etc. Ainsi, on ne gagnerait rien, dans l'une ou l'autre hypothèse, à augmenter le nombre des élémens ou la hauteur de la pile (1).

803. Quelques physiciens avaient adopté une manière de construire la pile, différente de celle que nous avons décrite. Dans cette dernière, les disques et les conducteurs humides sont disposés comme il suit, en allant de bas en haut : cuivre, zinc, humide; cuivre, zinc, humide, etc., et la pile se termine par deux disques qui sont encore cuivre et zinc. L'autre construction était disposée dans l'ordre suivant : zinc, humide, cuivre; zinc, humide, cuivre, etc., et au-dessus du dernier conducteur humide, on plaçait un seul disque, qui était de cuivre. Ces deux manières de former la pile ont donné lieu à diverses discussions entre les physiciens, dont les uns soutenaient que le véritable élément de la pile était une paire de disques, savoir, cuivre et zinc, suivie

(1) De l'Electricité dite Galvanique, par Volta. Annales de Chimie, 3o trimestre an x, p. 250.

d'un conducteur humide, tandis que, selon l'opinion des autres, l'assortiment qui donnait l'élément de la pile était zinc, humide et cuivre. La question est facile à résoudre, d'après les principes que nous avons exposés. Dans la seconde manière de disposer la pile, le disque de zinc, qui sert de base, est censé faire partie du réservoir commun, et la véritable pile commence au premier disque de cuivre qui est en contact avec un disque de zinc. D'une autre part, le disque de cuivre, qui occupe seul le haut de la pile, ne fait autre chose que partager, par l'entremise d'un corps humide qui le précède, le fluide du zinc qui est en contact avec ce dernier corps. De là vient que si l'on met un fil métallique en communication avec le zinc qui commence la pile, et un autre en communication avec le cuivre qui la termine, le premier fil sera électrisé résineusement, et le second vitreusement, en sorte que cette pile paraîtra produire des effets inverses de ceux qui ont lieu avec la première; mais tout se conciliera, si l'on distingue les points par lesquels se font les contacts des deux fils, de ceux qui donnent les véritables limites de la pile.

Comparaison de la Pile avec la Tourmaline.

804. Parmi les différens corps qui ont servi à faire des expériences électriques, avant la découverte du galvanisme, la tourmaline (747) paraît être celui qui ait le plus d'analogie avec une pile isolée, au moins quant à la distribution des deux électricités. Dans la tourmaline, ainsi que dans la pile, les actions de ces électricités diminuent graduellement depuis les extrémités jusqu'à un certain terme, où elles se réduisent à zéro. De plus, il est facile de concevoir que si l'on divisait une pile en plusieurs portions composées chacune d'un certain nombre d'éléments, et que l'on isolât ces différentes portions, elles deviendraient à l'instant des piles complètes, dont les moitiés seraient sollicitées par des électricités contraires, comme cela a lieu dans les fragmens détachés d'une tourmaline. Cependant, à en juger d'après l'état actuel de nos connaissances, il existe plusieurs différences remarquables entre les deux corps. Dans l'électrisation de la pile

chaque fluide se transmet d'un disque à l'autre, par l'intermédiaire d'un conducteur humide; au contraire, lorsque la tourmaline s'électrise, chaque fluide reste, après son dégagement, dans la molécule où il était auparavant à l'état de combinaison (753). De plus, les densités électriques de la pile décroissent lentement depuis les extrémités jusqu'au milieu, où elles deviennent nulles, tandis que, dans la tourmaline, elles diminuent rapidement, en sorte que les points où elles se réduisent à zéro sont plus ou moins rapprochés des extrémités.

805. On voit, par ce qui précède, que la théorie du célèbre physicien de Pavie repose tout entière sur le phénomène inconnu jusqu'alors, d'une électricité produite, non plus par le frottement, par la communication ou par la chaleur, mais par le simple contact de deux métaux. Si l'on pouvait trouver chez les anciens, relativement à cet objet, quelque-une de ces premières lueurs qui précèdent quelquefois de loin les découvertes brillantes, mais qui ne font que passer, ce serait dans le peu que Newton a écrit sur l'électricité, qui alors était à peine naissante. Ce savant illustre, après avoir remarqué que les attractions produites par la gravité et par les vertus magnétique et électrique, s'étendent à des distances très sensibles, en sorte qu'elles ont été reconnues même par les hommes ordinaires, ajoute qu'il pourrait bien exister encore des attractions resserrées dans un espace si étroit, qu'elles eussent échappé jusqu'alors à toutes les observations, et que peut-être l'attraction électrique en particulier s'exerce-t-elle à des intervalles extrêmement petits, sans avoir besoin d'être excitée par le frottement (1).

Diverses Expériences faites avec la Pile.

806. L'action électrique qui avait lieu au contact mutuel des métaux, dans les expériences sur la grenouille, était très faible en elle-même, et ce qui contribuait sur tout à en rendre les effets

(1) *Optice Lucis, edit. Lausannæ et Genevæ, Lib. III, Quæst. XXXI, p. 374.*

sensibles, c'était la grande irritabilité des organes qui en étaient le sujet. Cette même action, transportée dans la pile, où elle s'agrandit en semultipliant, est devenue capable de produire, par sa seule énergie, une multitude de phénomènes analogues à ceux de l'électricité ordinaire, avec les différences que doit naturellement amener celle qui existe entre les mouvemens du fluide dans les appareils employés de part et d'autre.

Commotion.

807. Reprenons le cas où la pile communique avec le sol. Si l'on touche d'une main le sommet de cette pile et de l'autre sa base, on éprouve une commotion continue qui agace, pour ainsi dire, les organes, et tantôt se fait sentir seulement dans la main, tantôt s'étend jusqu'au coude, selon le degré de tension de la pile. Dans ce cas, la pile se décharge, par le haut, des excès de fluide de ses différens disques, en même temps qu'elle répare ses pertes, à l'aide du fluide qu'elle reprend par sa base; il en résulte un courant électrique non interrompu, qui se partage entre les organes et le sol, et qui occasionne, à l'égard des premiers, la sensation que produit cette expérience.

808. Supposons maintenant la pile isolée : sa moitié inférieure étant alors à l'état négatif ou à l'état d'électricité résineuse, tendra d'abord à reprendre subitement, aux dépens des organes, la quantité de fluide vitré nécessaire pour la faire repasser au même état que quand elle n'était pas isolée, c'est-à-dire, à celui où elle était chargée uniquement par des quantités de fluide vitré qui croissaient depuis la base jusqu'au sommet. Ensuite la circulation s'établira à travers les organes, comme dans le cas d'une pile non isolée. Or, les organes étant des conducteurs imparfaits, il en résulte que quand la pile est isolée, la colonne se recharge en général moins rapidement que lorsqu'elle répare ses pertes aux dépens du sol, avec lequel elle est en communication, et à cet égard l'effet de la commotion doit être moins sensible. Mais il paraît que cette diminution est plus que compensée par le mouvement plus rapide du fluide dans le premier instant, et par l'action

plus concentrée de la décharge, dont l'effet ne se partage plus entre les organes et le sol. Cette explication s'accorde avec les expériences au célèbre Van-Marum, qui a obtenu généralement d'une colonne isolée des effets plus sensibles, que d'une colonne non isolée, et a remarqué que dans le premier cas, les commotions en particulier étaient très fortes (1).

809. Si l'on a pris la précaution de mouiller ses mains avant de toucher la pile par ses parties supérieure et inférieure, la commotion deviendra beaucoup plus sensible. Dans ce cas, le liquide, dont la faculté conductrice est plus grande que celle des organes, favorise la transmission de l'électricité à travers ces derniers. On augmentera encore l'énergie de la commotion, en se servant, pour toucher la pile, de deux tubes de métal que l'on tient dans les mains mouillées. Si l'on forme une chaîne de plusieurs personnes, dont les deux qui sont aux extrémités touchent, l'une la partie supérieure et l'autre la base de la pile; et si, de plus, toutes les mains sont mouillées, la commotion deviendra générale, pourvu que le nombre des personnes ne passe pas une certaine limite qui dépend de la charge de la pile (2).

810. Nous avons supposé jusqu'ici que les corps mouillés interposés dans la pile, étaient imbibés d'eau pure. Mais si l'on emploie une dissolution saline faite, par exemple, avec le muriate de soude, ou mieux encore avec le muriate d'ammoniaque, la commotion devient incomparablement plus forte. Volta a conclu de cette observation, que les dissolutions salines favorisaient l'action de la pile, principalement en ce qu'elles augmentaient la faculté conductrice de l'eau dont le carton ou le drap était imbibé.

Charge de la Bouteille de Leyde.

811. Si l'on met le crochet d'une bouteille de Leyde en contact avec le haut de la pile, tandis que sa surface extérieure commu-

(1) Annales de Chimie; 30 frimaire an x, p. 305 et 306.

(2) Histoire du Galvanisme, t. II, p. 8.

nique avec les corps environnans, cette bouteille se chargera de manière que sa tension sera à peu près égale à celle de la pile.

Attraction.

812. Supposons que l'on attache au sommet de la pile un fil métallique délié, et un second à la base, de manière que les extrémités de ces fils se regardent, et soient à une petite distance l'une de l'autre. Si les fils ont en même temps une mobilité suffisante, leurs électricités contraires les détermineront à s'approcher l'un de l'autre jusqu'au contact, et si l'on dérange alors un des fils de sa position, l'autre le suivra, en conservant avec lui son adhérence.

On voit, par ce qui précède, qu'il y a cette différence entre les effets qui ont lieu avec les machines ordinaires, et ceux qui sont produits par la pile, que les premiers sont anéantis par un seul contact, au lieu que les autres se perpétuent pendant tout le temps du contact. La pile une fois montée, devient ainsi comme un réservoir d'électricité, qui, sans le secours et comme à l'insu du physicien, se remplit spontanément, qui regagne continuellement ce qu'on lui enlève, et qui serait inépuisable si les corps humides, dont la pile est composée en partie, étaient à l'abri du desséchement.

Combustion.

813. Nous avons vu (713) que la décharge d'une batterie déterminait la combustion d'un fil métallique à travers lequel on la faisait passer. On obtient beaucoup plus facilement un effet analogue, en se servant de la pile. Il suffit alors de toucher à la fois les deux extrémités de cette pile avec un fil de fer : on voit naître une étincelle à l'endroit du contact, et si la pile est fortement chargée, le fil devient incandescent, et brûle sur une longueur plus ou moins considérable.

Influence du nombre et de la grandeur des Disques.

814. Tout ce qui précède nous conduit à comparer les effets de différentes piles que l'on suppose varier entre elles par le nombre et par l'étendue des disques. Nous adopterons ici les résultats auxquels Van-Marum est parvenu, dans des expériences faites avec la sagacité et l'exactitude que tout le monde lui connaît (1). Nous avons vu (792) qu'à mesure qu'on augmente le nombre des disques dont la colonne est composée, elle agit, toutes choses égales d'ailleurs, avec plus d'énergie, à raison d'un plus haut degré de tension. Mais si l'on suppose deux colonnes formées d'un nombre égal de disques, dont les diamètres diffèrent sensiblement de l'une à l'autre, qu'arrivera-t-il, si l'on soumet ces colonnes aux mêmes expériences? D'après les observations de Van-Marum, les tensions seront égales des deux côtés; il n'y aura pas de différence sensible dans la force des commotions; mais la colonne, dont les disques seront plus grands, aura beaucoup plus d'efficacité que l'autre pour brûler un fil de métal.

815. L'égalité de tension n'est pas difficile à concevoir. On peut considérer ici une pile à larges disques, comme un assemblage de piles à disques étroits, placées les unes à côté des autres, et dont chacune aurait une tension égale à celle d'une seule pile séparée; il en résulte seulement que la quantité totale de fluide sera plus grande dans la pile à larges disques que dans l'autre; mais la tension, qui dépend de la densité (506), ou de la quantité de fluide accumulée dans chaque point, sera la même des deux côtés.

816. Maintenant, pour concevoir comment les commotions produites par les deux piles ne diffèrent pas sensiblement entre elles, on doit faire attention que la commotion n'est pas ici un

(1) *Annales de Chimie*; 30 fév. an x, p. 289 et suiv.

effet instantané, comme dans l'expérience de Leyde; elle est le résultat d'une multitude de petites secousses qui se succèdent, à la vérité, avec une rapidité inconcevable, mais cependant se succèdent. Il faut considérer de plus, que le rétablissement des différens disques dans leur état primitif, à mesure que l'on décharge la pile, ne se fait aussi que par degrés, et c'est pour cela que quand on se sert de conducteurs métalliques d'une grande étendue, la pile emploie un certain temps pour revenir au même degré de tension. Or, d'une part, l'effet initial qui a lieu au commencement de la décharge est plus grand avec la pile à larges disques, où la masse de fluide est plus considérable; mais, d'une autre part, dans les instans suivans, le retour à l'état primitif ne s'opère pas aussi rapidement dans cette pile que dans celle dont les disques sont d'un plus petit diamètre, parce qu'il faut plus de temps au fluide pour se répandre sur de plus grandes surfaces, et y parvenir à la même densité. Il paraît donc qu'il s'établit une sorte de compensation entre l'effet de la plus grande masse qui agit dans le premier instant et celui de la moindre vitesse qui a lieu dans les instans suivans, ensorte que l'effet total ne surpasse pas sensiblement celui qui est produit par une pile à petits disques, où, en général, la vitesse du fluide est plus accélérée, mais où sa masse est d'ailleurs moins considérable.

817. Reste à considérer la plus grande facilité de la combustion, lorsqu'on emploie une pile à larges disques. Or, ici le fluide agit de même beaucoup plus sensiblement par sa masse dans le premier instant, ce qui lui donne d'autant plus d'avantage pour déterminer le commencement de la combustion, que le fil métallique peut être comparé à un canal délié qui se présente pour recevoir un effluve abondant et rapide. Mais dès qu'une fois la combustion a pris naissance, elle s'entretient par la chaleur du fil de fer, jointe à l'action des nouvelles quantités de fluide qui arrivent.

818. Van-Marum dirigea ses expériences vers une comparaison non moins intéressante, entre la charge de la pile et celle d'une batterie de 25 verres, dont les garnitures formaient ensemble une surface de $137 \frac{1}{2}$ pieds carrés. Il observa d'abord qu'une pile

de 220 paires métalliques d'argent et de zinc, à l'aide d'un seul contact aussi court que possible, chargeait la batterie à un degré qui égalait celui de sa propre tension, en sorte que la pile et la batterie produisaient le même effet sur l'électromètre. Cependant les commotions produites par la batterie n'avaient pas la même force que celle qu'on éprouvait en se servant de la pile : c'était une suite de ce que la décharge de la batterie était bornée à l'action du fluide qui s'y trouvait répandu à l'instant de la commotion, au lieu que pendant cet instant nécessairement composé, quelque court qu'il fût, la pile avait déjà commencé à se recharger.

Les effets de la pile furent ensuite comparés avec ceux d'une machine électrique, dont le plateau avait 31 pouces de diamètre. Il s'agissait de savoir combien de contacts du conducteur de cette machine seraient nécessaires pour charger une batterie au même degré de tension que celui qui serait produit par un seul contact de la pile. Mais pour que les résultats fussent comparables, il fallait faire en sorte que la batterie ne reçût, pendant son contact avec le conducteur, que la quantité d'électricité que celui-ci pouvait fournir par un mouvement du plateau d'une durée égale à celle de ce contact. Pour parvenir à ce but, Van-Marum appliquait d'abord un doigt sur le conducteur, tandis que le plateau était en jeu, et laissait ensuite un intervalle à peine sensible entre l'instant de retirer le doigt, et celui de mettre en contact avec le conducteur un fil métallique, qu'il lui présentait de l'autre main, par l'intermède d'un corps isolant, et qui communiquait avec le fond de la batterie. De cette manière, la charge de la batterie se réduisait au fluide que le plateau développait pendant le moment du contact. L'expérience fit voir qu'il fallait six de ces contacts pour charger la batterie au même degré de tension que celui qui résultait d'un seul contact de la colonne (1).

On ne peut lire ces résultats sans être étonné de l'immense quantité de fluide électrique qui s'accumule, pendant un temps très court, dans la pile de Volta, et de l'extrême vitesse avec

(1) *Annales de Chimie* ; frimaire an x, p. 297 et suiv.

laquelle le même fluide est mu dans cet instrument, déjà si propre à exciter la surprise, en ce qu'il n'a besoin que de lui-même pour acquérir sa puissance.

819. MM. Gay-Lussac et Thenard, dont les recherches ont donné un nouveau développement au même sujet, distinguent l'énergie électrique d'une pile de son énergie chimique, dont nous exposerons plus loin les effets : elles ne sont pas toujours dans le même rapport. Une pile de 80 couples décompose les alcalis, quand elle est chargée avec un acide, tandis qu'une pile de 600 couples, chargée avec une dissolution saline, ne produit point le même résultat, quoiqu'ayant une tension plus considérable.

Les auteurs ont fait un grand nombre d'expériences, pour mesurer l'énergie chimique de la pile, d'après la quantité de gaz obtenue dans un temps donné par la décomposition de l'eau. Ils ont trouvé qu'elle dépendait de la conductibilité plus ou moins grande du liquide employé ; qu'elle était plus considérable avec un mélange d'acide et de sel qu'avec un acide seul ; et qu'en général elle est proportionnelle à la force et à la quantité de l'acide.

Ils ont fait d'autres expériences, pour déterminer les effets de la pile relativement au nombre et à la surface des plaques qui la composent. D'après leurs résultats, ces effets mesurés par la quantité de gaz que l'on obtient, n'augmentent pas dans le même rapport que le nombre des plaques, mais ils sont à peu près proportionnels à la racine cubique de ce nombre. De plus, les effets de deux piles d'un égal nombre de paires sont à peu près proportionnels à leur surface (1).

Des différentes Substances qui peuvent être employées pour former la Pile.

820. Nous avons considéré la pile jusqu'ici, comme étant composée de trois substances qui concourent le plus ordinairement à sa formation. Mais les tentatives que l'on a faites pour varier la combinaison de ses éléments, ont conduit à des résultats intéres-

(1) Recherches *physico-chimiques* sur la pile, Paris, 1811.

sans relativement à l'influence qu'exercent, les uns sur les autres, les différens corps que l'on peut employer.

821. Deux métaux quelconques, mis en contact, se constituent comme nous l'avons dit (785), dans deux états différens et opposés d'électricité. Mais Volta a découvert que ces états, comparés entre eux dans divers métaux, présentent une gradation très remarquable. Si l'on forme l'échelle suivante: argent, cuivre, fer, étain, plomb, zinc, l'état de chacun de ces métaux différera en plus de celui du métal précédent que l'on suppose en contact avec lui, et en moins de celui du métal suivant. Or, telle est la loi à laquelle est soumise cette gradation, que la différence d'état entre le premier et le dernier métal est égale à la somme de toutes les différences, en allant d'un métal à l'autre (1).

Pour fixer nos idées, représentons par 1 la différence d'état entre l'argent et le cuivre, dans le cas du contact; par 2 celle entre le cuivre et le fer; par 3 celle entre le fer et l'étain; par 1 celle entre l'étain et le plomb; et par 5 celle entre le plomb et le zinc; si nous supposons une petite pile formée de ces six métaux ainsi rangés, et qui soit en communication avec le sol, l'état de l'argent étant zéro, celui du cuivre sera 1, celui du fer 3, celui de l'étain 6, celui du plomb 7, et celui du zinc 12. La différence d'état entre les deux extrêmes, argent et zinc, sera donc 12 moins zéro, ou simplement 12, quantité qui est égale à la somme des différences 1, 2, 3, 1, 5 entre les états consécutifs des six métaux.

Il suit de là qu'une pile, de telle hauteur qu'on voudra, dont chaque élément offrirait cette série de métaux, ne produira pas plus d'effet que si elle n'était composée que des deux métaux extrêmes réunis par païres. Mais le résultat qui a conduit Volta à cette conséquence, mériterait d'être vérifié par des expériences exactes.

822. Nous avons supposé que les corps imbibés d'eau qui entrent dans la construction de la pile, n'y faisaient que l'office de conducteurs. Il est néanmoins probable qu'ils influent même sur la production de l'électricité. Mais il paraît que cette action est très

(1) Annales de Chimie; frimaire an x, p. 271

faible, en comparaison de celle que les métaux exercent entre eux. On a essayé de diversifier la construction de la pile, par la variété des substances dont on la composait. Volta a reconnu que l'on pouvait employer, au lieu des métaux ordinaires, la pyrite et le charbon de bois (1). Gautherot a obtenu des effets sensibles, en substituant cette dernière substance au cuivre, et le même physicien a construit des piles, dans lesquelles un des agens était encore le charbon de bois, et l'autre le schiste connu sous le nom de *crayon des charpentiers* (2). M. Davy a combiné, avec succès, les actions du charbon, de l'acide nitrique et de l'eau, et M. Pfaff celles d'un métal, de l'eau et d'un sulfure, etc. (3).

823. D'après ces observations et d'autres du même genre, il paraît exister entre les corps humides et les corps solides une corrélation, qui tend à faire varier, suivant les circonstances, les fonctions de ces corps; en sorte qu'une substance humide qui, dans telle combinaison, faisait la fonction de conducteur, exerçant dans une autre combinaison une action très marquée sur un des corps solides en contact avec elle, s'associe à ce corps pour produire la vertu électrique, et réduit l'autre corps, dont l'action est beaucoup plus faible, à n'être plus qu'un simple moyen de communication, relativement à l'électricité.

Appareil à cuivre double.

824. La pile que nous allons décrire, et dont on attribue l'invention à M. Accum, savant anglais d'un mérite distingué, a été accueillie avec empressement par les physiciens, aussitôt qu'elle a paru. L'avantage qu'elle a d'offrir de grandes surfaces au développement des deux fluides électriques, la rend susceptible d'agir avec une grande énergie, même lorsque le nombre de couples métalliques employés à sa construction est peu considérable. Il se réduit à six dans la pile dont nous nous servons, et que représente

(1) Annales de Chimie; 30 frimaire an x, p. 252.

(2) Histoire du Galvanisme, t. II, p. 208.

(3) Bulletin des Sciences de la Société Philom.; nivôse an x, p. 77.

la figure 4. Les couples sont suspendues à une tringle de bois ac portée sur des montans x, x' , dont on peut la séparer à volonté, pour l'introduire, par ses extrémités, dans des rainures pratiquées aux montans, et la faire descendre jusqu'à ce que les couples métalliques soient plongées dans la liqueur dont on a rempli les bocalaux b^1, b^2, b^3 , etc., placés à des intervalles convenables sur la tablette qui sert de base à l'appareil.

L'assortiment des deux métaux qui composent chaque couple offre une lame carrée de zinc, z, z^1, z^2 , etc., située à la distance d'environ 6 millimètres (2 lignes $\frac{2}{3}$), entre deux lames de cuivre c, c^2, c^3 , etc., de la même figure, et dont l'épaisseur est beaucoup moindre que celle de la lame de zinc. Chacune de ces dernières a, vers les extrémités de ses bords supérieur et inférieur, deux prolongemens qui se replient l'un vers l'autre et se réunissent en forme d'arc, de manière que les deux lames de cuivre font continuité. La lame de zinc est engagée par le haut et par le bas dans deux petites pièces de bois taillées en arcade, et qui lui donnent une position fixe, en s'insérant dans les courbures des lames de cuivre.

Pour déterminer l'action mutuelle des deux métaux, au lieu de les mettre en contact par une de leurs faces, on se sert d'un intermédiaire qui fait la liaison entre l'un et l'autre, et qui consiste dans une bande de cuivre telle que lk , courbée en arc, et soudée par une extrémité au bord supérieur de la lame de zinc z , et par l'extrémité opposée à un point k pris sur la surface de la lame de cuivre c^2 , qui appartient à la couple voisine. Les parties moyennes des bandes de cuivre dont nous venons de parler, qui sont planes, adhèrent à la tringle de bois, et y tiennent les couples métalliques suspendues. Les bandes attachées aux deux lames extrêmes, l'une de cuivre c^1 , l'autre de zinc z^6 , se replient vers le haut, en traversant la tringle de bois, et se terminent au-dessus par deux petits cylindres d, d' , qui servent d'attache à deux fils métalliques, entre lesquels on place les corps que l'on se propose de soumettre à l'action du courant électrique.

Quand on veut mettre l'appareil en expérience, on fait descendre, comme nous l'avons expliqué, les couples métalliques jusque

dans l'intérieur des bœaux situés en dessous, et qui ont été remplis d'avance d'un mélange d'eau et d'environ $\frac{1}{25}$ d'acide sulfurique. Cette eau s'introduit dans les interstices, entre les plaques de zinc et celles de cuivre, où elle fait la même fonction que les conducteurs humides qui alternent avec les couples métalliques dans la pile de Volta.

Dès que l'appareil à double cuivre a été connu, il a obtenu la préférence sur d'autres appareils jusqu'alors en usage, parmi lesquels nous nous bornerons à citer celui qui porte le nom de *pile à auges*. Les plaques métalliques de zinc et de cuivre qui entrent dans sa construction sont soudées l'une à l'autre par une de leurs faces, et les différentes couples qu'elles composent sont placées de champ, parallèlement les unes aux autres, dans l'intérieur d'une cuve, où elles reposent sur des corps isolans. Elles laissent entre elles des intervalles que l'on a fermés de tous les côtés, excepté par le haut, de manière à les convertir en petites auges, dont deux parois sont formées par les faces extérieures de deux couples voisines. C'est dans ces auges que l'on verse l'eau acidulée destinée à servir de conducteur.

825. On a essayé de construire, d'après la méthode de Volta, des piles d'une espèce particulière, en substituant des corps secs aux conducteurs humides. Celle dont Zamboni a conçu l'idée est composée de disques de papier doré ou argenté sur une de ses faces, et recouvert sur l'autre d'une couche d'oxide de manganèse pulvérisé. Les effets de ces piles sont faibles et sujets à des intermittences de plusieurs heures ou davantage, après lesquelles ils renaissent spontanément, et souvent finissent par disparaître sans retour. On a cité cependant de ces piles dont l'action s'était maintenue pendant plusieurs années sans interruption.

Des Piles secondaires.

826. Le caractère distinctif des différentes piles dont nous avons parlé jusqu'ici, consiste en ce qu'elles ont par elles-mêmes le pouvoir de développer le fluide d'où dépendent leurs effets. Ritter, en se bornant à employer des disques d'un seul métal,

combinés avec des conducteurs humides, a construit des piles appelées *piles secondaires* ou *piles à charger*, et qui, sans avoir une action spontanée comme la pile de Volta, empruntent leur vertu de celle-ci, par l'intermédiaire du contact. Pour mettre une de ces piles en activité, on fait communiquer ses deux extrémités avec celles d'une pile ordinaire, et au bout de quelques minutes, on supprime la communication. La pile secondaire se trouve alors électrisée, de manière que chacun de ses pôles est dans le même état que le pôle correspondant de la pile qui a servi à la charger, et l'on peut la substituer à cette dernière, pour obtenir des effets analogues, tels que la commotion, les étincelles, la décomposition de l'eau. Mais sa vertu s'affaiblit bientôt, et finit par disparaître après quelques instans.

827. Le célèbre inventeur de cette nouvelle pile en a modifié par degrés la construction, relativement au nombre et à l'arrangement respectif des disques de chaque espèce. Ainsi, il a d'abord employé à la construire trente-deux disques de cuivre et autant de disques de carton mouillé, formant trois séries, dans chacune desquelles il n'entrait que des disques d'une seule espèce; les trente-deux disques de cuivre pris seize à seize, composaient les deux séries extrêmes, et la série intermédiaire renfermait de suite les trente-deux disques de carton. L'auteur déplaçait ensuite quelques-uns des disques de cuivre, pour les intercaler entre les disques de carton, jusqu'à ce qu'enfin ceux des deux espèces se succédassent un à un, en commençant et en finissant par le cuivre, auquel cas le nombre des disques de carton n'était plus que de trente-un. Il a disposé dans le même ordre soixante-quatre disques de cuivre, puis cent vingt-huit, entremêlés de disques de carton.

828. Ritter comparait chaque fois les trois effets principaux de la pile; savoir, l'effet chimique ou la décomposition de l'eau, l'effet physiologique ou la commotion, et l'effet physique ou la tension électrique. Il remarqua que ces effets ne s'accordaient pas entre eux, relativement à la variation de leur intensité, soit lorsqu'il multipliait les intercalations, sans augmenter le nombre des disques, soit lorsque l'alternative étant établie entre ceux des deux espèces, il donnait plus de longueur à la pile. D'abord les

trois effets croissaient en même temps; mais l'effet chimique fut le premier à s'affaiblir, et devint nul à un certain terme. Au-delà, l'effet physiologique continua de s'accroître, pour rétrograder à son tour, et quant à l'effet physique, il alla toujours en augmentant.

829. Nous nous bornerons ici à considérer, sous le rapport de la théorie, le dernier mode de construction, dans lequel les disques des deux espèces sont disposés alternativement, parce qu'il est comme la limite, dont tous les autres assortimens se rapprochent toujours davantage, à mesure que les intercalations deviennent plus nombreuses. Or on conçoit que l'action de la pile secondaire dépend, en général, de ce que les deux fluides dont ses extrémités se sont chargées par leur communication avec la pile de Volta, éprouvent une certaine difficulté pour se réunir, en obéissant à leur attraction mutuelle. Cette difficulté provient d'abord de ce que la propriété conductrice des disques humides est beaucoup moindre que celle des disques de cuivre; mais elle augmente encore, à raison d'une certaine résistance que les surfaces planes des deux substances hétérogènes opposent à la transmission des fluides, à l'endroit où elles sont en contact l'une avec l'autre. De là résulte dans le mouvement des mêmes fluides une lenteur qui recule le moment où leur réunion fait disparaître la vertu de la pile.

Il y a donc aussi, au milieu de ces sortes de piles, un point ou plutôt un petit espace, qui est neutre, et en général la partie moyenne approche d'autant plus de l'état naturel, surtout dans les premiers instans, que la pile est plus longue. D'une autre part, les centres d'action étant aussi plus éloignés dans ce même cas, la force répulsive mutuelle des molécules du fluide situé vers chaque extrémité, agit avec plus d'énergie, parce qu'elle est moins balancée par la force contraire qui réside dans l'extrémité opposée. On voit par là pourquoi la tension des deux fluides, mesurée par l'électromètre, augmente dans les pôles, à mesure qu'on donne plus de longueur à la pile. Il n'en est pas de même de la commotion qui diminue, passé un certain terme. Pour en apercevoir la raison, il suffit de considérer que cet effet dépend non-

seulement de la tension qui a lieu aux extrémités, et qui s'accroît, comme nous l'avons dit, avec la longueur de la pile, mais encore de la facilité avec laquelle s'opère la décharge, et qui est moindre, dans une pile plus longue. Il suit de là que s'il y a un terme où l'obstacle qui provient de cette dernière cause soit prédominant, la commotion perdra de sa force. A l'égard de l'effet chimique, ou de la décomposition de l'eau, pour se faire une juste idée des circonstances qui déterminent son *maximum*, il faudrait avoir une connaissance plus exacte de ce qui se passe dans cet effet lui-même, dont la considération est, pour ainsi dire, le côté nébuleux de la théorie.

830. Avant l'invention de l'appareil dont nous venons de parler, on connaissait diverses expériences faites par d'autres physiciens, et dont les résultats ont de l'analogie avec ceux de la pile secondaire. Nous nous contenterons d'en citer une dont Volta est l'auteur. Ce savant ayant mis les deux extrémités d'une bande de papier imbibée d'eau pure, en communication avec celles d'une pile ordinaire, remarqua que chacune de ses deux moitiés avait acquis l'espèce d'électricité qui résidait dans le pôle correspondant de la pile, et que la densité électrique diminuait de part et d'autre, en se rapprochant du milieu de la bande, où il y avait un point neutre (1). Cette bande a été appelée le *ruban de Volta*. Il est facile de voir que la conservation de la double électricité dont elle jouit, au moins pendant un instant, tient à l'imperfection de la faculté conductrice, soit dans le papier, soit dans l'eau dont il est imbibé. On conçoit même que l'effet dont il s'agit puisse avoir encore lieu, proportion gardée, par rapport à des substances beaucoup plus susceptibles que le papier et l'eau, de transmettre les deux fluides électriques. Car, comme il n'est aucun corps qui possède la faculté conductrice dans un degré absolu, la marche des deux fluides, le long de la surface, est toujours plus ou moins progressive; et ainsi, quelque légère que soit la rési-

(1) Voyez l'excellent Exposé fait par Hallé, des principales expériences de Volta; Bulletin des Sciences de la Société Philom., niôse an x, n° 58.

stance que le corps oppose au mouvement de ces fluides, leur densité peut être assez petite, pour que cette résistance devienne capable de balancer leur tendance à se réunir, et de retarder, pendant un temps appréciable, le retour du corps à l'état naturel.

Des Substances qui ont, par rapport à l'Electricité Galvanique, une faculté conductrice particulière.

831. Les corps qui tiennent le premier rang, relativement à la propriété de conduire l'électricité ordinaire, tels que les métaux, sont à la fois les meilleurs conducteurs de l'électricité galvanique; et ceux qui isolent le mieux les effets de la première, tels que le verre et les résines, conservent la même prééminence, relativement à la seconde. De plus, chacun de ces corps agit constamment de la même manière, toutes choses égales d'ailleurs, et, dans aucune circonstance, on ne le voit passer brusquement d'une propriété à celle qui lui est opposée.

832. Entre les deux extrêmes dont nous venons de parler, il existe une multitude d'intermédiaires, qui ayant, dans un degré plus faible, la faculté, soit de conduire l'action électrique; soit d'en arrêter la propagation, la manifestent aussi sans diversités, dans les phénomènes relatifs aux deux espèces d'électricité. Tels sont entre autres les organes des animaux.

Mais parmi les termes de cette série, le célèbre Erman en a découvert d'extrêmement remarquables, dont les propriétés, toujours uniformes dans les expériences électriques ordinaires, subissent dans celles qui ont rapport au galvanisme, des variations auxquelles on ne se serait pas attendu, en sorte que le même corps transmet ou arrête l'action électrique, suivant les circonstances dans lesquelles on le place.

833. Les substances qui présentent ces sortes d'exceptions aux lois jusqu'alors connues de la communication de l'électricité, se sous-divisent en deux classes, distinguées entre elles par la diversité des phénomènes. Dans l'une se trouve la flamme de l'alkohol,

et dans l'autre le savon alkalin parfaitement desséché. Nous allons décrire successivement les expériences faites par M. Erman sur ces deux substances, et dont nous avons vérifié en grande partie les résultats, dans le riche cabinet de Physique de M. Trémery, qui a bien voulu concourir, par ses soins éclairés, au succès des opérations.

834. On met en contact, avec l'un quelconque des pôles d'une pile isolée, un électromètre à feuilles d'or, très sensible, et lorsque ces feuilles ont atteint le degré de divergence qui répond à la tension du fluide, on introduit dans la flamme d'une lampe à alcool un fil métallique qui communique avec le pôle opposé à celui que touche l'électromètre, et un autre qui communique avec le sol. A l'instant l'électromètre acquiert un surcroît de divergence aussi considérable que dans le cas où la communication avec le sol étant établie à l'aide d'un conducteur métallique non interrompu, le zéro qui jusque-là se trouvait au milieu de la pile, passe dans le sommet avec lequel ce conducteur est en contact (797).

Après avoir attaché un électromètre à chaque pôle de la pile toujours isolée, on fait partir de ces mêmes pôles deux fils métalliques que l'on rapproche jusqu'à ce qu'ils entrent dans la flamme de l'alcool. L'appareil est disposé de manière que les fils métalliques et l'alcool soient isolés comme la pile. Tant que cet isolement a lieu, les électromètres divergent à peu près comme dans le cas où les fils métalliques et la flamme n'existeraient pas. Mais si l'on plonge dans la flamme un autre fil métallique qui communique en même temps avec le sol, aussitôt le pôle vitré est déchargé, ou, ce qui revient au même, le zéro se trouve à l'endroit de ce pôle, et la divergence de l'électromètre appliqué au pôle résineux est à son *maximum*.

835. Ainsi, lorsque la flamme ne communique qu'avec un seul pôle, soit vitré soit résineux, et qu'en même temps elle est en communication avec le sol, elle agit comme corps conducteur. Si elle est en communication avec les deux pôles à la fois, et qu'elle reste isolée, elle agit comme corps non conducteur. Enfin, si étant en communication avec les deux pôles, elle communique en même

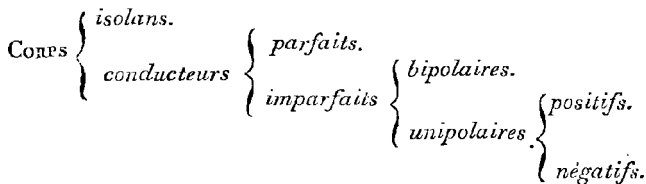
temps avec le sol, elle fait la fonction de corps isolant, relativement à l'effet du pôle résineux de la pile, et celle de corps conducteur relativement à l'effet du pôle vitré. On la voit, avec une double surprise, passer d'un extrême à l'autre, et devenir un point de réunion pour les deux extrêmes. M. Erman a varié ces expériences de différentes manières, qui toutes ont offert la confirmation des mêmes phénomènes.

836. Si l'on substitue à la flamme de l'alcool un prisme de savon alkalin bien desséché, les effets sont les mêmes, excepté que le dernier présente l'inverse de celui qui avait lieu dans les expériences précédentes. Le prisme mis en contact par une de ses extrémités avec l'un ou l'autre des pôles de la pile, tandis qu'une chaîne ou une verge métallique descend de l'autre extrémité jusqu'au sol, propage l'électricité du pôle qui lui est contigu. Si l'on introduit dans ses extrémités des fils métalliques qui partent des deux pôles de la pile, et qu'on laisse le tout isolé, ces pôles continuent d'agir comme ils faisaient sans l'intervention du savon. Mais, les choses étant dans cet état, si l'on établit une communication entre un point quelconque du prisme de savon et le réservoir commun, à l'instant le pôle résineux est déchargé, et la tension du pôle vitré parvient à son *maximum*. Nous avons même obtenu cet effet, en prenant le point de communication du savon avec le sol, à une très petite distance de l'extrémité dans laquelle était plongé le fil métallique qui partait du pôle vitré, c'est-à-dire de celui dont l'action restait isolée.

M. Erman a reconnu les mêmes propriétés dans la flamme du phosphore, et il les a entrevues dans quelques autres substances, telles que la gélatine desséchée à un certain degré, et l'ivoire. Mais d'autres masses de ces dernières substances n'ayant donné que des résultats équivoques, il s'abstient, pour le présent, de prononcer sur leur analogie avec le savon et le phosphore.

837. L'auteur, en résumant les différentes manières d'agir des corps que l'on peut mettre en communication avec les pôles de la pile, a établi une distribution méthodique de ces corps, assortie à leurs propriétés distinctives, avec une nomenclature propre à les désigner par des expressions simples et précises.

Il partage d'abord ces corps en deux grandes séries, dont l'une comprend les corps *isolans*, qui n'exercent aucune action conductrice, soit que leurs extrémités communiquent séparément, ou toutes les deux à la fois, avec les pôles de la pile. Tels sont les corps résineux et le verre. La seconde série est composée des corps *conducteurs*, qui se sous-divisent en *conducteurs parfaits* et en *conducteurs imparfaits*. Les premiers, tels que les métaux, sont également susceptibles de décharger chaque pôle en particulier, et d'établir une circulation rapide d'un pôle à l'autre. Les conducteurs imparfaits, qui n'ont qu'une action faible ou simplement partielle, sont ou *bipolaires* ou *unipolaires*. L'auteur appelle *bipolaires*, ceux qui, en même temps qu'ils déterminent une circulation d'un pôle à l'autre, ont leurs deux moitiés dans des états opposés. De ce nombre sont l'eau commune et certains corps imbibés de ce liquide (1). Les conducteurs unipolaires sont ceux qui, étant mis en communication avec les pôles de la pile et en même temps avec le sol, ne conduisent que l'électricité d'un seul pôle, et ils sont *unipolaires positifs* ou *unipolaires négatifs*, suivant que le pôle qu'ils déchargent est le pôle vitré ou le pôle résineux. A l'aide du tableau suivant, on saisira d'un coup-d'œil cette distribution :



838. Les propriétés des corps qui ont donné lieu à la découverte de M. Erman, méritent également de fixer l'attention, soit par la différence d'action que manifeste chacun de ces corps comparé à lui-même, dans les expériences relatives à l'électricité ordinaire et à l'électricité galvanique, soit par la diversité que pré-

(1) Nous avons déjà parlé des effets de ces sortes de conducteurs, à l'occasion des piles que l'on a nommées *secondaires* (§30).

sentent ces mêmes corps, comparés aux autres conducteurs de l'électricité.

Si l'on met, par exemple, le prisme de savon en contact par une extrémité avec le crochet d'une bouteille de Leyde électrisée, et par l'autre extrémité, avec la garniture extérieure, la réunion des deux fluides aura lieu, et la bouteille se déchargera, quoique imparfaitement (1), soit qu'on laisse le savon isolé, ou qu'on le mette en communication avec le sol, ce qui est tout différent de l'effet que produit le savon sur la pile. Au reste, quoique nous ignorions encore à quoi tient précisément cette différence, on en sera moins surpris, si l'on considère qu'il en existe une très sensible dans la manière dont se charge l'un et l'autre instrument, ainsi que dans les circonstances qui accompagnent leur décharge, à l'aide des moyens ordinaires.

839. Mais ce qu'il y a de plus singulier dans la découverte de M. Erman, c'est la ligne de démarcation qu'elle semble tracer entre les corps qui ont été soumis à l'expérience par ce physicien, et ceux qu'on avait essayés jusqu'alors. Parmi ces derniers, les uns, tels que le verre, s'opposent, dans toutes circonstances, à la transmission de l'électricité; les autres, tels que les métaux, s'y prêtent, de quelque manière qu'on les emploie. Au contraire, les choses se passent à l'égard du savon et de la flamme de l'alkohol, comme si la faculté de transmettre l'électricité vitrée et celle de transmettre l'électricité résineuse, ne pouvaient exister que solitairement, et étaient incompatibles. Ainsi, quand le corps n'est en communication qu'avec un seul sommet de la pile, celle des deux facultés qui est relative à la position de ce corps s'exerce librement; lorsqu'ensuite le corps étant isolé et en communication avec les deux sommets de la pile, les deux électricités se présentent à la fois, les facultés conductrices, qui ne pourraient s'exercer que conjointement, sont sans effet, et la pile demeure dans le même état. Mais si l'on ouvre une issue à l'électricité, en

(1) Si, dans cette expérience, on tient le savon entre les doigts, on ressent une petite commotion, ce qui prouve que les organes sont de meilleurs conducteurs que le savon.

établissant une communication entre le corps et le sol, alors rien ne s'oppose à ce que l'une des deux facultés conductrices puisse s'exercer indépendamment de l'autre, et c'est tantôt celle de l'électricité vitrée et tantôt celle de l'électricité résineuse qui a lieu de préférence.

Au reste, ceci n'est qu'une manière d'envisager les faits, propre à nous faire mieux saisir l'aspect sous lequel l'expérience nous les offre. Mais ce ne sera qu'après en avoir bien étudié toutes les circonstances, et les avoir soumis à de nouvelles observations, que l'on parviendra à en donner la véritable théorie, et à dévoiler les rapports qui les lient aux autres faits, à travers les contrastes qu'ils semblent former avec eux.

Des Poissons électriques.

840. On connaissait depuis long-temps la vertu qu'a un poisson du genre des raies, d'engourdir les membres de ceux qui le touchent : de là le nom de *torpille* qu'on lui avait donné. Mais tandis que les premiers observateurs étaient embarrassés pour déterminer la cause de l'effet exprimé par ce mot, les Arabes avaient rencontré, comme par instinct, une dénomination puisée dans une analogie à la fois plus savante et plus vraie; ils appelaient ce poisson *râad* ou *raasch*, nom qui, dans la langue de ces peuples, signifie *tonnerre*.

841. L'organe dont la torpille se sert pour exercer son pouvoir engourdissant, est composé d'un grand nombre de tubes aponévrotiques, d'une forme hexagonale et quelquefois pentagonale, rangés parallèlement les uns aux autres autour des branchies, et dont une base est adjacente à la peau de dessus et l'autre à celle de dessous. Tous ces tubes sont exactement fermés à leurs extrémités par une membrane aponévrotique, qui s'étend de chaque côté sur toute la surface de l'organe. De plus, chaque tube est traversé horizontalement par des feuillettes aponévrotiques placés au-dessus l'un de l'autre à de petites distances, en sorte que le tube peut être considéré comme un assemblage de cellules superposées. L'intérieur de ces cellules est rempli d'une substance qui, d'après les expériences de M. Geoffroy, est composée d'albu-

mine et de gélatine (1). Enfin, tout cet appareil est fourni de nerfs remarquables par leur volume, qui s'insèrent entre les tubes, et finissent par se distribuer dans leur intérieur.

842. Réaumur a observé que quand la torpille voulait mettre son organe en activité, elle diminuait d'abord insensiblement la courbure de son dos, qui s'aplanissait, et même quelquefois devenait concave, puis le relevait par un mouvement subit qui lui faisait reprendre sa convexité (2). Si, dans ce moment, on touchait la torpille avec le doigt, on éprouvait une commotion semblable à un engourdissement.

843. Parmi les physiciens, les uns attribuaient ce phénomène à l'émission d'une infinité de corpuscules qui sortaient continuellement de la torpille, mais dont l'effluve était plus abondant en certaines circonstances, et qui, en s'insinuant dans les membres, les engourdisaient, soit parce qu'ils s'y précipitaient en trop grand nombre, soit parce qu'ils y trouvaient des routes peu assorties à leurs figures. Selon d'autres, l'action de la torpille consistait dans un ébranlement particulier qu'elle imprimait aux nerfs, et d'où résultait une sensation désagréable qui engourdisait le membre où elle était produite.

844. Une nouvelle opinion, qui n'avait pas plus de fondement que les précédentes, mais qui méritait mieux que l'on fit des efforts pour la détruire, est celle de Schilling, qui avait cru reconnaître dans l'anguille de Surinam, que l'on sait avoir la même vertu que la torpille, des effets magnétiques très sensibles. Selon ce physicien, l'anguille, placée dans le voisinage d'un aimant, était attirée par ce corps et y restait attachée; on parvenait avec peine à l'en séparer, et alors elle était languissante, et l'on pouvait la toucher impunément. De plus, l'aimant qui avait servi à l'expérience paraissait couvert de particules de fer, et lorsqu'on

(1) Voyez la description détaillée que ce savant naturaliste a donnée de la torpille et des autres poissons pourvus de la même vertu, dans le cinquième cahier des Annales du Muséum d'Histoire naturelle, p. 392 et suiv.

(2) Mémoires de l'Académie des Sciences; année 1714.

mélait de la limaille de ce métal à l'eau dans laquelle l'anguille était plongée, celle-ci se ranimait et reprenait ses forces (1).

Ces assertions ont été entièrement détruites par plusieurs physiciens distingués, entre autres par Ingenhouz et Spallanzani, qui, ayant répété, avec beaucoup de soin, les expériences indiquées par Schilling, n'ont pas remarqué que l'aimant exerçât la plus légère action sur l'anguille (2). M. Hahn, professeur de Médecine à Leyde, qui a sagement discuté l'opinion de Schilling, observe que les fleuves d'Amérique, dans lesquels on trouve l'anguille de Surinam, charient du sable magnétique, et présume que des grains de ce sable s'étant attachés à la peau gluante du poisson, qui en était probablement tout couvert, au moment où Schilling a fait ses expériences, ont pu être une des principales causes de l'illusion qui a séduit ce physicien (3).

845. Le docteur Bancroft paraît être le premier qui ait soupçonné de l'analogie entre les phénomènes de la torpille et ceux que produit l'électricité. Walsh s'étant proposé de vérifier cette conjecture, fit plusieurs expériences, dont le but était de reconnaître si la torpille agirait de la même manière qu'une bouteille de Leyde chargée. On plaça un de ces poissons récemment retiré de l'eau sur une table où était une serviette mouillée. On suspendit au plancher deux fils courbes de laiton, à l'aide de deux cordons de soie qu'ils soutenaient par le milieu. L'un des fils de laiton reposait par un bout sur la serviette mouillée, et était plongé par l'autre bout dans un bassin plein d'eau posé sur une seconde table, où l'on avait mis quatre autres bassins semblables. Le second fil métallique descendait par une de ses extrémités dans l'eau du dernier bassin. Cinq personnes étaient rangées autour de cette seconde table. La première plongeait un doigt d'une main dans le bassin où était le fil de laiton en communication avec la serviette

(1) G. W. Schilling, *Diatriba de Morbo in Europâ penè ignoto*, Jaws dicto, 1770.

(2) Recueil de Mém. sur l'Analogie de l'Electricité et du Magnétisme, par H. Van Swinden; 1784, t. I, p. 439 et suiv.

(3) *Ibid.* p. 438.

mouillée, et un doigt de l'autre main dans le bassin suivant. La seconde plongeait un doigt d'une main dans ce même bassin, et un doigt de l'autre main dans celui qui venait après, et ainsi de suite, jusqu'à ce que les cinq personnes communiquassent l'une avec l'autre, par l'intermède de l'eau contenue dans les cinq bassins. Walsh ayant pris le second fil de laiton par la partie située hors de l'eau, toucha le dos de la torpille avec l'extrémité de cette même partie, et à l'instant les cinq personnes ressentirent une commotion qui, suivant le rapport qu'elles en firent, ne différait de celle que fait éprouver l'expérience de Leyde, qu'en ce qu'elle était plus faible. Walsh, qui n'était point compris dans la chaîne, et n'avait fait que tenir l'excitateur, ne reçut aucune impression. Cette expérience fut répétée plusieurs fois, même par huit personnes, et toujours avec un égal succès. On remarqua que chaque effort que faisait la torpille, pour donner la commotion, était accompagné d'une dépression de ses yeux, à laquelle on pouvait même reconnaître ses tentatives pour produire le même effet sur des corps inorganiques.

846. On a découvert la même vertu dans plusieurs autres poissons, dont les plus connus sont le *gymnote engourdisant* ou l'*anguille électrique* de Surinam, dont nous avons déjà parlé (844), et le *silure trembleur*; d'où l'on voit que la propriété électrique, que l'on aurait été tenté de regarder comme l'indice d'un rapport générique entre les animaux qui la partagent, n'est qu'une qualité spécifique, qui forme comme des saillies dans des familles d'ailleurs très distinguées les unes des autres. Il arrive ici à peu près la même chose qu'à l'égard des minéraux, où la propriété de s'électriser par la chaleur est dispersée, pour ainsi dire, dans des espèces de différentes natures.

On retrouve dans les poissons électriques différens de la torpille, un organe analogue au sien, qui est un assemblage de cellules composées de feuillettes aponévrotiques entrelacés, et dont l'intérieur est rempli d'albumine et de gélatine. Mais la forme générale de cet organe et sa position varient d'une espèce à l'autre.

847. Walsh, en répétant les expériences de la torpille sur le

gymnote engourdissant, dont la vertu est beaucoup plus énergique, parvint à obtenir un effet qui acheva de le confirmer dans l'opinion que le véritable agent était ici l'électricité. Il appliqua sur un morceau de verre une feuille d'étain, dans laquelle il avait laissé une petite séparation. Cette feuille avait ses deux bords en communication avec les corps à travers lesquels se faisait la décharge du poisson. A l'instant de cette décharge, on voyait très distinctement paraître une étincelle qui franchissait le petit intervalle pratiqué dans la feuille d'étain. Il fallait pour cela que le poisson fût exposé à l'air libre, et lorsqu'on essayait de faire l'expérience dans l'eau, on ne voyait plus d'étincelle (1).

848. Les effets des poissons électriques avaient été remarqués, depuis long-temps, par les pêcheurs. Redi rapporte que c'était une opinion généralement répandue parmi ces derniers, que la vertu de la torpille se communiquait à la main et au bras de celui qui la pêchait, par l'intermède du filet et du bâton auquel elle était suspendue (2). Les poissons doués de cette vertu s'en servent comme d'une arme invisible, pour transmettre à travers l'eau une violente secousse aux poissons d'une espèce différente, sur lesquels ils se jettent après les avoir étourdis, et dont ils font leur proie.

849. Terminons cet article par quelques détails sur la théorie à l'aide de laquelle on a essayé de lier les phénomènes dont il s'agit avec ceux de l'électricité ordinaire. Quoique Walsh eût tenté inutilement d'obtenir des attractions et des répulsions entre des balles de moelle de sureau suspendues à des fils qui communiquaient avec la torpille, il n'avait pas laissé de regarder ce poisson comme une espèce d'instrument électrique animé, et il avait cherché à expliquer les différences qui modifiaient les rapports qu'il avait d'ailleurs avec la bouteille de Leyde. Il observait que la même quantité de fluide électrique qui, concentrée dans cette bouteille, était capable de produire les effets connus de tous les physiciens, n'agirait

(1) *Philosophic. Transact.*, t. LIII, p. 461, et t. LXIV, p. 465

(2) *Experimentu circa res diversas naturales.*

plus de la même manière, si on la raréfiait en la distribuant sur plusieurs grandes jarres, dont les parties, garnies de feuilles d'étain, offriraient une surface totale quatre cents fois plus grande que celle des garnitures de la bouteille; car alors il n'y aurait plus d'attractions ou de répulsions sensibles, tandis que le même fluide, ainsi dilaté, serait encore capable de faire éprouver une commotion, à l'instant où l'on déchargerait l'appareil. Or, cette distribution avait lieu dans la torpille, où le fluide électrique était répandu et raréfié sur la somme de toutes les surfaces des prismes qui formaient l'organe de ce poisson. C'était tout ce que la théorie pouvait alors suggérer de plus plausible; et ce qui est très remarquable, c'est que l'on n'ait pas balancé à faire dépendre de l'électricité ces phénomènes qui, dans la réalité, ne sont autre chose qu'un résultat de cette même action galvanique, qui, depuis, a donné naissance à de nombreuses discussions entre les savans des divers pays, sur la véritable nature du fluide qui la produit.

850. Les physiiciens qui sont venus après Walsh ont continué de comparer les commotions données par la torpille avec celles que l'on éprouve en se servant de la bouteille de Leyde. Mais depuis les découvertes de Volta, c'est la pile qui doit être le véritable terme de comparaison. Ce célèbre physicien présume que parmi les substances humides dont l'organe de la torpille est composé, les unes sont propres à faire naître la vertu électrique par leur contact mutuel, et les autres à la transmettre; en sorte que la superposition des différentes couches formées de ces substances est analogue à celle des métaux et des conducteurs imbibés d'eau qui se succèdent dans la pile (1). La détermination exacte de ces mêmes substances et de leurs fonctions est l'objet d'un problème intéressant, dont la solution, réservée aux efforts réunis de la Physique et de la Zoologie, offrira une nouvelle preuve des secours mutuels que les sciences peuvent se prêter, en marchant de concert vers un même but.

(1) Annales de Chimie; 30 frimaire an x, p. 255.

*Des Effets chimiques de l'Electricité
Galvanique.*

Décomposition de l'Eau.

851. Deux savans anglais, Carlisle et Nicholson, ayant plongé dans l'eau deux fils métalliques, dont l'un communiquait avec le disque supérieur d'une pile ordinaire, et l'autre avec le disque inférieur, aperçurent les indices de deux gaz qui se dégagèrent aux extrémités de ces fils, et qu'ils reconnurent être les mêmes que ceux qui entrent dans la composition de l'eau (1). Pour faire cette expérience, on se sert ordinairement d'un tube recourbé, dont les deux branches sont remplies d'eau jusqu'à une certaine hauteur, et fermées avec des bouchons à travers lesquels on introduit les fils métalliques. Les extrémités de ces fils sont plongées dans l'eau, de manière à laisser entre elles un certain intervalle. L'oxygène paraît sous la forme de bulles, à l'extrémité du fil en communication avec le disque de zinc qui produit l'électricité vitrée, et l'hydrogène se dégage, sous la même forme, à l'extrémité du fil en contact avec le disque de cuivre qui forme la base de la pile, c'est-à-dire de celui qui donne l'électricité résineuse. Si les métaux sont oxidables, on ne voit que très peu de bulles à l'extrémité du fil qui répond au disque de zinc, parce que l'oxygène se fixe sur ce fil, en même temps qu'il le fait passer à l'état d'oxide.

852. Ce nouveau phénomène attira bientôt l'attention des savans, et surtout des chimistes, auxquels il offrait un problème délicat à résoudre, pour le concilier avec la théorie relative à la nature de l'eau. On voulut d'abord savoir si l'oxygène et l'hydrogène provenaient de la même molécule d'eau, ou de deux molécules distinctes. On avait remarqué que quand on plongeait les fils dans deux vases séparés, il ne se faisait aucun dégagement de gaz; mais cela pouvait venir de ce que la communication nécessaire pour que la décharge de la pile eût lieu, se trouvait alors

(1) Bibliothèque Britannique, t. XV, p. 11.

interrompue, Davy trouva un moyen fort simple pour prouver que c'était effectivement cette interruption qui empêchait les gaz de se dégager. Il plongea deux doigts d'une même main dans les deux vases, et aussitôt les gaz se montrèrent.

853. Ici se présentaient diverses questions. Peut-on concevoir que ce soit la même molécule d'eau qui se décompose, lorsqu'il y a un intervalle très sensible entre les gaz qui se dégagent? et si la décomposition a lieu par rapport à deux molécules différentes, que devient l'hydrogène à l'endroit où l'on n'aperçoit que de l'oxygène, et que devient à son tour l'oxygène, à l'endroit où l'hydrogène seul se manifeste?

854. La solution la plus naturelle que l'on ait imaginée jusqu'ici de cette difficulté, est celle qui a été proposée par Monge et Berthollet (1). Selon ces savans, le fluide vitré a la propriété de dégager l'oxygène préférablement à l'hydrogène; c'est le contraire par rapport au fluide résineux. D'une autre part, l'eau a la faculté de recevoir, comme toutes les autres substances composées, différentes quantités relatives des principes qui concourent à sa formation. Ainsi l'eau de la rosée est oxygénée, et c'est pour cela qu'elle contribue au blanchiment des fils et des toiles qu'on expose à l'air; l'eau distillée, au contraire, est hydrogénée, et c'est à cela qu'elle doit cette saveur particulière qu'on lui fait perdre, en l'agitant fortement avec le contact de l'air. On peut donc supposer que dans l'expérience citée, l'eau de chaque vase, ou celle qui est renfermée dans chaque portion d'un même tube, conserve en excès celui des deux gaz qui ne manifeste pas sa présence.

855. Le phénomène de la décomposition de l'eau, par l'électricité galvanique, offrait un nouvel objet de comparaison entre les effets de la machine ordinaire et ceux de la pile. Van-Marum a obtenu le même phénomène, en faisant passer une forte décharge à travers un fil de fer plongé dans l'eau (2). Wollaston a répété l'expérience avec un fil d'or très délié, tellement engagé dans un

(1) Statique chimique, t. I, p. 216.

(2) Annales de Chimie, n° 121, p. 77.

tube capillaire de verre, que son extrémité, qui était à peine visible, se trouvait au niveau de la surface du tube (1). Ce célèbre physicien, en réduisant ainsi à une extrême petitesse la quantité de métal soumise à l'action de l'électricité, est parvenu à décomposer l'eau, par une succession de petites étincelles qui sortaient d'un conducteur chargé à l'ordinaire. Il a essayé aussi de provoquer, par des expériences du même genre, le dégagement des deux principes composans de l'eau, en employant deux fils métalliques plongés dans ce liquide à distance. Mais il dit avoir constamment observé que chacun des deux fils donnait à la fois l'hydrogène et l'oxygène, tandis que l'action de la pile les détermine à se montrer séparément. Jusqu'à présent, il faut l'avouer, l'expérience n'a pas parlé assez clairement pour que la théorie relative au phénomène dont il s'agit ne laisse plus rien à désirer : il faudra de nouveaux faits qui puissent servir d'interprètes aux premiers.

856. Nous ne devons pas omettre de rappeler ici que la pile dont l'action n'avait fait autre chose qu'imiter l'analyse chimique, dans la décomposition de l'eau, a servi depuis, entre les mains du célèbre Davy, à former les premiers anneaux d'une chaîne de découvertes entièrement neuves, qui s'étend sur une grande partie du règne minéral. Toute l'Europe savante a partagé l'étonnement dont il avait été lui-même frappé au moment de l'expérience si remarquable où la potasse, placée dans un courant d'électricité galvanique, montra pour la première fois sa base, ornée de l'éclat métallique que l'oxygène jusqu'alors tenait déguisé sous une apparence terreuse. La nature de ce traité ne nous permet pas d'aller au-delà de cette indication. C'est à la Chimie qu'appartient l'exposition raisonnée de l'importante découverte dont nous venons de parler, ainsi que de toutes les autres du même genre dont elle a été suivie, et des nombreux changemens qu'elles ont apportés dans la nomenclature des substances inorganiques.

(1) Bibliothèque Britannique, t. XVIII, p. 33 et suiv.

*Influence de l'Action chimique sur les Effets
de la Pile.*

On avait observé que quand les conducteurs humides interposés entre les différentes couples métalliques dont la pile est composée, étaient seulement imbibés d'eau pure, il arrivait souvent qu'ils ne transmettaient pas assez rapidement l'électricité d'un couple à l'autre, pour satisfaire à la condition d'un prompt rétablissement d'équilibre entre les états des disques en contact l'un avec l'autre, à mesure que le fluide qui s'était développé d'abord dans la pile, en sortait pour se porter sur les corps que l'on soumettait à l'expérience. On pare à cet inconvénient, en mêlant un acide, tel que le sulfurique ou le nitrique, à l'eau qui humecte les conducteurs. L'action de la pile en devient plus continue et à la fois plus énergique.

Le mélange dont nous venons de parler, produit différens effets tels que l'oxidation des métaux, la décomposition de l'eau, etc., dont on a désigné la cause sous la dénomination générale d'*action chimique*. Deux opinions ont été émises sur la manière dont les substances qui l'ont subie agissent à leur tour, pour favoriser la transmission de l'électricité d'un métal à l'autre. Suivant l'une, les substances dont il s'agit font simplement l'office d'un stimulant, ou d'une force accélératrice, pour hâter le mouvement progressif des molécules électriques. L'autre opinion est fondée sur un fait que MM. Biot et Frédéric Cuvier ont annoncé les premiers. Il consiste en ce que les molécules des substances qui ont éprouvé l'action chimique, font l'office de véhicules, c'est-à-dire, qu'elles ont un mouvement de transport, en vertu duquel elles vont, en passant à travers les conducteurs humides, déposer l'électricité dont elles sont chargées sur les disques métalliques que l'imperfection des conducteurs humides a laissés en retard, par rapport au rétablissement de l'équilibre. Par une suite de la compensation qui en résulte, l'effet total est le même que dans l'hypothèse d'une parfaite conductibilité. On voit que les deux opi-

nions ne diffèrent que par la manière d'expliquer l'action d'une cause dont les avantages sont incontestables.

Analogie entre l'Electricité Galvanique et l'Electricité ordinaire.

857. Si nous faisons maintenant un retour sur les divers résultats que nous avons exposés, nous apercevrons partout une analogie frappante entre l'agent qui les produit et le fluide électrique. Arrêtons-nous d'abord aux phénomènes les plus propres à faire ressortir cette analogie. Une bouteille de Leyde, mise en contact avec la pile, se charge et devient capable de donner la commotion, précisément comme si elle eût été appliquée sur le conducteur d'une machine ordinaire. La pile produit des attractions et des répulsions semblables à celles des corps électrisés. Le fluide qu'elle fournit, accumulé dans un condensateur, donne des étincelles à l'approche d'un excitateur. Jusqu'ici la ressemblance des effets indique l'identité des causes. A la vérité, la sensation que l'on éprouve en touchant la pile par ses deux extrémités, n'est pas la même que celle qui est produite par la bouteille de Leyde; mais c'est que la première est modifiée par le mouvement progressif et continu du fluide qui, au lieu de frapper les organes d'un seul coup, comme dans l'expérience de Leyde, les attaque par une succession rapide de petites impulsions; et la preuve que c'est bien ce fluide qui est l'âme de la pile, c'est que, s'il passe dans la bouteille, le seul changement de vase lui rend tous ses caractères.

Nous avons vu qu'il était de même facile d'expliquer d'autres singularités de la pile, et en particulier la facilité avec laquelle un fil métallique, mis en contact avec elle, entre en combustion, tandis qu'à en juger d'après l'action peu sensible qu'elle exerce sur l'électromètre, on ne serait pas tenté d'attendre d'elle un effet si puissant.

L'action réciproque qu'exercent entre eux les autres corps solides, même les nerfs et les muscles d'un animal, est réellement du même genre que celle qui a lieu entre les métaux; et il était inutile d'avoir recours à un fluide particulier, pour expliquer des

effets qui ont d'ailleurs tant d'analogie avec ceux que produisent les substances métalliques.

Le parallèle entre les deux électricités se soutient, relativement au phénomène de la décomposition de l'eau; et si les circonstances qui l'accompagnent varient, suivant que l'on emploie une pile ou une machine ordinaire, on entrevoit de même la raison de cette diversité, à travers celle qui existe entre les appareils. Les nouvelles recherches qui restent à faire pour dissiper le nuage encore répandu sur cette partie de la science, ne peuvent avoir pour résultat d'établir une distinction essentielle entre le galvanisme et l'électricité, mais seulement de concilier l'électricité avec elle-même.

Nous ne poussons pas plus loin le parallèle; nous y reviendrons lorsque nous aurons été conduits par l'ordre des matières à exposer les découvertes très remarquables qui ont été faites récemment en Danemarck, et parmi les phénomènes qui leur ont donné naissance, nous distinguerons ceux qui peuvent dès maintenant être placés sur la même ligne à côté des premiers, de ceux qui exigeront des recherches ultérieures, pour faire reconnaître encore ici l'électricité, dans les effets d'un appareil qui semble être né pour nous la montrer sous une forme nouvelle et inattendue.

VII. DU MAGNÉTISME.

858. L'AIMANT a été regardé, pendant long-temps, comme une simple pierre qui avait la propriété d'attirer le fer, et la trace de cette opinion s'est conservée dans le langage vulgaire, qui désigne encore par le nom de *pierre d'aimant*, la mine de fer naturellement pourvue de la propriété dont il s'agit. On aura jugé de sa substance par les particules pierrenses dont elle est souvent mêlée, et qui lui sont purement accidentelles.

859. Les anciens ont connu la vertu attractive que l'aimant exerce sur le fer; ils avaient même remarqué qu'il communiquait au fer la vertu d'attirer un autre fer. Mais quoique l'aimant, par cette sympathie qu'il semblait montrer pour le fer,

dût être une de ces espèces de jouets que la curiosité se plaît à exercer, et qu'elle retourne de toutes les manières, la plus belle et la plus importante des propriétés de ce minéral, celle qui lui fait regarder le nord par une de ses extrémités, et le Sud par l'autre, a long-temps échappé à l'observation. Il paraît que c'est vers le douzième siècle qu'a été faite cette découverte, dont plusieurs nations se disputent l'honneur.

860. Les premières théories sur le magnétisme se ressentent des idées systématiques qui dominaient alors parmi les physiciens. Les tourbillons de Descartes avaient tellement séduit les esprits, que l'on essaya d'en mettre partout. On en donna aux corps électriques. L'aimant eut aussi les siens. On imagina ensuite de simples effluves de matière magnétique, dont les molécules s'accrochaient les unes aux autres, ou prenaient un mouvement de recul, suivant la manière dont les effluves de deux aimans se rencontraient. Il y avait dans le fer des espèces de petits poils qui faisaient la fonction de valvules, pour permettre au fluide de passer dans un sens, et lui refuser le passage quand il se présentait dans un sens contraire. Telle était entre autre l'opinion de Dufay; et ce physicien célèbre, qui avait si bien vu le principe des mouvemens électriques, lorsqu'il en vint au magnétisme, ne donna qu'une machine de son invention, au lieu du mécanisme de la nature.

861. Æpinus est le premier qui, pour expliquer les phénomènes du magnétisme, ait employé de simples forces soumises au calcul. Ce fut en tenant une tourmaline, qu'il conçut l'idée qui a servi de base à sa théorie. Il venait de découvrir que les effets de cette pierre étaient dus à l'électricité, et avait remarqué qu'elle repoussait par un côté, et attirait par l'autre, un petit corps électrisé. Il donna à ces deux côtés le nom de *pôles*, et ce mot, qui aurait pu ne passer que pour une expression plus commode, devint, dans son esprit, le véritable mot. Il vit dans la tourmaline une espèce de petit aimant électrique; et comparant les phénomènes des vrais aimans avec ceux des corps isolans, il trouva que les actions des deux fluides pouvaient être ramenées aux mêmes lois, et joignit ainsi au mérite d'avoir per-

fectionné la théorie de l'électricité, et créé pour ainsi dire la théorie du magnétisme, celui d'attacher à un même anneau ces deux grandes portions de la chaîne de nos connaissances.

Coulomb, en reprenant des mains d'Æpinus la première de ces théories, pour lui donner un nouveau développement, avait par là même contracté une espèce d'engagement de perfectionner encore la seconde; et l'exposé que nous ferons bientôt de ses résultats, prouvera combien il a été fidèle à s'acquitter.

1. Des Principes généraux de la Théorie du Magnétisme.

862. Quoique le fluide magnétique soit soumis aux mêmes lois que le fluide électrique, diverses observations indiquent, dans l'état actuel de nos connaissances, une différence de nature entre l'un et l'autre. Si l'on présente une tourmaline électrisée à une aiguille aimantée suspendue librement, quels que soient les pôles par lesquels les deux corps se regardent, la tourmaline n'exerce sur l'aiguille, pour la déranger de sa position, que la même force attractive qu'elle exercerait sur un corps quelconque; ce qui suppose que sa présence fait naître, dans l'aiguille elle-même, une vertu électrique indépendante de la vertu magnétique.

863. La correspondance entre les deux théories nous conduit à concevoir aussi le fluide magnétique comme composé de deux fluides particuliers, combinés entre eux dans le fer qui ne donne aucun signe de magnétisme, et dégagés dans le fer qui a passé à l'état d'aimant. Les molécules de chaque fluide se repoussent de même les unes les autres, et attirent celles de l'autre fluide; et Coulomb a prouvé, comme nous le verrons bientôt, que ces différentes actions suivent la raison inverse du carré de la distance.

864. Tout le fluide naturel d'un corps magnétique, même après sa décomposition, reste dans l'intérieur de ce corps; et, sous ce rapport, les aimans peuvent être assimilés aux corps isolans (647). Les deux fluides, dégagés de la combinaison, se portent, par des mouvemens contraires, vers les extrémités de

l'aimant, d'où ils exercent des actions analogues à celles de l'électricité vitrée et de l'électricité résineuse.

Mais avant d'aller plus loin, nous jetterons un coup-d'œil général sur l'ensemble que présente le magnétisme considéré dans toute son étendue, parce que le développement de la théorie, pour être bien saisi, demande que l'on ait au moins une idée de cet ensemble.

865. Tous les phénomènes que présentent les aimans que nous soumettons à l'expérience, ne sont, pour ainsi dire, que les différentes faces d'un fait fondamental, qui a été remarqué depuis long-temps. Il consiste en ce que si l'on choisit à volonté une des extrémités d'un aimant, et qu'on la présente successivement aux deux extrémités d'un second aimant, il y aura attraction d'une part et répulsion de l'autre entre les deux aimans. L'extrémité opposée du premier aimant produira des effets inverses sur celles de l'autre aimant. En général, il y a dans chaque aimant deux points opposés qui manifestent des actions contraires, et auxquels on a donné le nom de *pôles*. On peut juger de l'énergie de ces actions, en faisant mouvoir un aimant en présence d'une aiguille magnétique suspendue librement; on verra les extrémités de cette aiguille faire différens circuits, et quelquefois une révolution entière, pour satisfaire sa tendance vers l'équilibre.

866. Maintenant un phénomène extrêmement remarquable par sa continuité et par l'immensité des distances auxquelles il s'étend, consiste en ce que le globe terrestre fait à l'égard d'une aiguille aimantée la même fonction que l'aimant dont nous venons de parler; en sorte que l'aiguille, abandonnée à la force de ce vaste corps-magnétique, prend une direction qui va du nord au midi, et que nous verrons être celle qui s'accorde avec la manière d'agir de cette même force. En vain vous l'en écarterz, jusqu'à lui faire faire autour du centre une demi-révolution, qui la dirige en sens contraire. Toujours fidèle à elle-même, elle revient à sa première position dès qu'elle est libre, et ses balancemens, qui semblent offrir l'image de l'inconstance, se terminent par un retour constant à la ligne qui la rappelle. Qu'auraient pensé les anciens philosophes, qui déjà prêtaient une âme aux aimans, quoiqu'ils

ne connussent que leurs actions au contact, s'il leur était venu dans l'idée de suspendre un de ces corps à un fil?

867. Ce que nous venons de dire nous conduit à une observation qui nous paraît intéressante, sur la manière de dénommer les deux fluides qui composent le fluide magnétique, et en même temps les pôles, ou les deux points de chaque aimant dans lesquels résident leurs actions. Le simple énoncé de l'hypothèse relative à l'existence de ces fluides, suffit pour faire concevoir que les répulsions magnétiques, semblables en cela aux répulsions électriques, sont dues à celles qui existent entre les fluides homogènes, et que les attractions proviennent de celles que les fluides hétérogènes exercent l'un sur l'autre. Il en résulte que quand une aiguille magnétique est dans sa direction naturelle, le pôle de cette aiguille, qui est tourné vers le nord, est dans l'état contraire à celui du pôle de notre globe qui est dans la même partie; et comme ce dernier pôle doit être le véritable pôle nord relativement au magnétisme, ainsi qu'il l'est à l'égard des quatre points cardinaux, il paraît plus convenable de donner le nom de *pôle austral* à l'extrémité de l'aiguille qui est tournée vers le nord, et celui de *pôle boréal* à l'extrémité opposée. Nous adopterons, en conséquence, ces dénominations, qui sont déjà usitées en Angleterre; et par une suite nécessaire, nous nommerons *fluide austral* celui qui réside dans la partie de l'aiguille la plus voisine du nord, et *fluide boréal* celui qui sollicite la partie située vers le midi.

868. Nous avons déjà vu qu'il en est du magnétisme comme il en serait de l'électricité, s'il n'existait dans la nature que des corps parfaitement isolans. Chaque aimant n'a jamais que sa quantité naturelle de fluide, qui est constante, en sorte qu'il ne peut ni recevoir d'ailleurs une quantité additionnelle de fluide, ni céder de celui qu'il possède par sa nature, et que le passage à l'état de magnétisme dépend uniquement du dégagement des deux fluides qui composent le fluide naturel, et de leur transport vers les parties opposées du fer.

869. Plus ce métal est dur, et plus les deux fluides éprouvent de difficulté à se mouvoir dans ses pores; et en général cette difficulté est toujours considérable et supérieure de beaucoup

à la résistance que les corps mêmes le plus parfaitement isolans opposent au mouvement interne des fluides dégagés de leur fluide naturel. Coulomb a donné à cette force le nom de *force coercitive*, comme à celle qui agit dans les corps isolans (647).

2. De la Loi que suivent les Actions magnétiques , à raison de la distance.

Pour établir une théorie des phénomènes magnétiques, il fallait surtout avoir déterminé la loi à laquelle sont soumises, à différentes distances, les forces qui agissent dans ces phénomènes. Plusieurs physiciens qui s'étaient occupés de la recherche de cette loi, avaient eu recours à des moyens si imparfaits, qu'on ne doit pas être étonné de voir leurs résultats si peu d'accord entre eux, et avec la véritable loi (1).

870. La précision des méthodes employées par Coulomb, pour déterminer cette loi, ne laisse plus aucun doute qu'elle ne suive la raison inverse du carré de la distance, comme celle qui régit les actions électriques (609). Mais ici, la manière dont le fluide était distribué dans les corps que l'on soumettait à l'expérience, exigeait des considérations particulières, fondées sur ce que ces corps avaient deux centres d'actions qui étaient dans deux états opposés, au lieu que les corps électriques, qui avaient servi à des recherches vers un but semblable, n'étaient sollicités que par une seule électricité, ce qui permettait de considérer toutes les forces comme réunies dans un seul centre d'action (41). Nous nous bornerons à dire pour le présent que, dans un aimant, les deux centres d'action sont à une petite distance des extrémités.

870. Coulomb est parvenu, par deux méthodes différentes, au but qu'il s'était proposé. La première consistait à faire osciller une petite aiguille de 27 millimètres, ou un pouce, de longueur, vis-à-vis du centre d'action inférieur d'un fil d'acier aimanté, long

(1) Voyez les Expériences physico-mécaniques sur différens sujets, traduites de l'anglais de Hauksbée; Paris, 1754; t. II, p. 547, et suiv.

d'environ 6^{tes}, 8, ou 25 pouces, de longueur, placé verticalement dans le plan du méridien magnétique.

Si nous faisons abstraction, pour l'instant, du centre d'action supérieur, nous devons concevoir que l'aiguille, tandis qu'elle fait ses oscillations, est sollicitée en même temps par deux forces, dont l'une réside dans le centre d'action inférieur du fil d'acier, et l'autre est la force que le globe exerce sur l'aiguille. L'effet de cette dernière, lorsqu'elle agit seule sur une aiguille dérangée de son méridien magnétique, est aussi de produire dans cette aiguille un mouvement d'oscillation. Or, avant l'expérience, Coulomb avait reconnu que l'aiguille, abandonnée à sa seule force naturelle, faisait 15 oscillations en 60 secondes. Mais il en est ici de l'aiguille comme d'un pendule qui oscille en vertu de la pesanteur. On prouve que l'action de cette force, pour faire osciller le pendule, est proportionnelle au carré du nombre d'oscillations faites pendant un temps donné, que l'on prend pour l'unité de temps. Ainsi, dans l'hypothèse présente, où l'aiguille est sollicitée à la fois par sa force naturelle et par celle du fil d'acier, on a la valeur de cette dernière en soustrayant le carré de 15, de celui du nombre d'oscillations faites par l'aiguille pendant 60 secondes.

Pour mettre de la précision dans les expériences, il fallait encore déterminer la distance à laquelle le fil d'acier était censé agir sur l'aiguille. Or nous verrons, dans la suite, que cette action dépend de deux forces, dont chacune s'exerce sur un des pôles de l'aiguille, et qui conspirent à lui imprimer le même mouvement; et comme l'aiguille était fort courte, en sorte que les distances de ses pôles au centre d'action du fil d'acier différaient peu l'une de l'autre, on pouvait, sans erreur sensible, considérer le milieu de cette aiguille comme la distance moyenne entre celles auxquelles les deux actions s'exerçaient, et c'était relativement à ce point qu'il s'agissait d'estimer la force du fil en présence duquel l'aiguille oscillait.

872. Un exemple servira à répandre du jour sur tout ce qui vient d'être dit. L'aiguille placée d'abord de manière que son centre d'action était à 108 millimètres, ou 4 pouces, de distance du fil d'acier, fit 41 oscillations en une minute: placée ensuite à

une distance double, elle ne fit plus que 24 oscillations en une minute. Donc les forces totales qui sollicitaient l'aiguille dans ses deux positions, étaient entre elles comme le carré de 41 est à celui de 24, ou comme 1681 à 576. Si l'on retranche de chacun de ces deux nombres le carré de 15 ou 225, on aura pour le rapport entre les forces du fil d'acier, celui de 1456 à 351, qui diffère peu de celui de 4 à l'unité (1). Et parce que les distances correspondantes sont entre elles comme 1 est à 2, on en conclura que les forces sont en raison inverse du carré des distances.

Cependant le nombre d'oscillations faites en 60 secondes, ne donnait pas toujours exactement la quantité de l'action exercée par le fil d'acier. Cette exactitude n'avait lieu sensiblement qu'autant que l'aiguille était à des distances assez petites du fil d'acier, pour permettre de négliger la force du pôle supérieur de ce fil, qui alors était dirigée suivant une ligne peu éloignée de la verticale, et qui d'ailleurs agissait de beaucoup plus loin que le pôle inférieur. Mais lorsque l'aiguille était plus écartée du fil d'acier, alors la partie de la décomposition de cette force, qui était dans le sens horizontal, le même que celui suivant lequel agissait le pôle inférieur, devenait plus appréciable par rapport à la force de ce même pôle, et aussi n'était-ce qu'en faisant la petite correction qu'elle exigeait, que l'on parvenait à représenter la loi cherchée, avec toute la précision convenable.

873. L'autre méthode était analogue à celle que Coulomb avait employée relativement à l'électricité. Il faisait de la balance électrique une balance magnétique, en remplaçant, par une longue aiguille aimantée le levier suspendu au fil métallique, et en substituant à la balle de cuivre une semblable aiguille placée verticalement sur le méridien magnétique, c'est-à-dire, celui qui coïncide

(1) La différence 13 qui se trouve entre 351, et le quart de 1456, qui est 364, n'est très sensible que parce qu'elle tombe sur les carrés des nombres d'oscillations faites par l'aiguille; en sorte que celle qui lui correspond, relativement à ces derniers nombres, n'est qu'une fraction de l'unité. Si l'on suppose, par exemple, que l'aiguille dans sa seconde position, fasse 24 oscillations plus $\frac{1}{4}$, on aura, au lieu de 351, le nombre 363 plus une fraction, résultat qui se rapproche beaucoup de 364.

avec la direction naturelle de l'aiguille. Telle était la disposition respective des deux aiguilles, que quand celle qui était mobile allait toucher l'autre, en conservant sa position à peu près horizontale, le contact se faisait par un des centres d'action de la première, et le centre inférieur de la seconde.

La tendance naturelle de l'aiguille à revenir dans son méridien magnétique, était encore ici une action particulière qui se composait avec les actions réciproques des deux aiguilles; actions, il s'agissait de trouver le rapport, en les démantant de cette combinaison. Pour y parvenir, Coulomb compara d'abord la première force toute seule avec la force de torsion, et il trouva que si l'on tordait le fil métallique qui portait l'aiguille mobile, d'abord sous un angle de 35 degrés, l'aiguille s'écartait d'un degré de son méridien magnétique; et qu'ensuite si l'on tordait le fil sous des angles qui fussent successivement doubles, triples, quadruples, etc., de 35 degrés, l'aiguille allait se placer à 2 degrés, 4 degrés, etc., de son méridien magnétique; et ainsi en retranchant de chaque tension imprimée le nombre de degrés qui donnait la distance de l'aiguille au méridien, c'est-à-dire, la quantité dont le fil s'était détordu, en vertu du mouvement de l'aiguille, on trouvait que la force de l'aiguille, pour réagir contre chaque torsion, équivalait à autant de fois 35 degrés de torsion, que l'arc qui mesurait la distance de l'aiguille au méridien renfermait de degrés.

874. Cela posé, pour rendre plus sensible le procédé de Coulomb, nous allons donner encore ici l'exposé d'une de ses expériences. Soit *o* (fig. 5) la position du pôle inférieur de l'aiguille fixe, que nous supposons être le pôle sud. Cette aiguille étant située verticalement dans le plan de son méridien magnétique, Coulomb met en contact avec ce pôle celui de même nom *s* de l'aiguille mobile *sn*, et cela de manière que le fil métallique n'ait aucune torsion : à l'instant l'aiguille fixe repousse l'aiguille mobile à une distance de 24 degrés, en sorte que cette dernière prend la position *s'n'*.

Or, la tendance à retourner au méridien agit en sens contraire du mouvement que vient de faire l'aiguille mobile, et par conséquent elle diminue d'autant la véritable répulsion, ou celle qui

aurait lieu si cette tendance était nulle; c'est-à-dire, que celle-ci remplace la force de torsion qu'il faudrait ajouter à celle de 24 degrés pour maintenir l'aiguille à la même distance, en vertu de la seule répulsion. Mais, lorsque l'aiguille est à 24 degrés du méridien, la torsion qui mesure sa tendance à y retourner est égale à 35 fois 24 degrés, qui font 840 degrés. Donc la répulsion qu'il fallait d'estimer équivalait à une torsion de 840 degrés, plus 24 degrés, ou de 864 degrés.

Les choses étant dans cet état, Coulomb donne au fil métallique une nouvelle torsion égale à trois circonférences de cercle, en sens contraire du mouvement de 24 degrés qu'avait déjà fait l'aiguille suspendue au fil, c'est-à-dire, dans le sens *bod*, et alors cette aiguille se rapproche à 17 degrés de l'aiguille fixe, en prenant la position *s''n''*. Or, trois fois 360 degrés font 1080 degrés; et puisque cette torsion n'est qu'une continuation de celle qui existait déjà (1), et qui se trouve réduite à 17 degrés, on aura 1097 degrés pour la torsion qui mesure la force répulsive mutuelle des deux aiguilles, moins la tendance à retourner au méridien. Mais cette tendance équivaut à une force de torsion de 17 fois 35 degrés, ou de 594 degrés; donc si l'on ajoute 595 degrés à 1097 degrés, la somme 1692 degrés donnera la torsion qui fait équilibre à la répulsion qu'il fallait évaluer.

Il suit de là que les deux répulsions sont entre elles comme 864 à 1692, c'est-à-dire, dans un rapport qui approche beaucoup de celui de 1 à 2. Mais les distances correspondantes étaient 24 et 17, dont les carrés 576 et 289 approchent beaucoup du rapport de 2 à 1, d'où l'on voit que les répulsions magnétiques suivent la raison inverse du carré des distances.

Nous avons choisi pour exemples les résultats qui conduisent

(1) Si la torsion était produite par un mouvement imprimé immédiatement à l'aiguille mobile, il est évident que, pour continuer de tordre le fil, il faudrait faire tourner cette aiguille suivant le sens de son premier mouvement, dans un arc de 24 degrés. Mais comme la torsion agit par l'extrémité supérieure du fil, en vertu de la rotation imprimée à la tige qui tient ce fil suspendu, on conçoit aisément que pour continuer de tordre le fil, il faut faire tourner la tige en sens contraire du mouvement qui a déjà eu lieu vers le bas.

aux rapports les plus simples. Mais l'expérience a prouvé que la loi des répulsions était constante, quel que fût le rapport entre les distances, et l'on a obtenu des résultats analogues, en substituant l'attraction à la répulsion.

3. Des Attractions et Répulsions magnétiques.

875. Nous sommes maintenant en état d'expliquer les phénomènes que produisent les aimans en vertu de leurs actions mutuelles. La plupart de ces explications ne sont, pour ainsi dire, que la traduction de celles que nous avons données (682) des effets que présentent les corps isolans, dont une partie est à l'état vitré, et l'autre à l'état résineux, et particulièrement les tourmalines. Nous pouvons supposer, si nous voulons, que le fluide boréal d'un aimant fait la même fonction que le fluide vitré d'une tourmaline, et que le fluide austral est l'analogue magnétique du fluide résineux, et tout ce que nous avons dit de l'espèce de pierre dont il s'agit, s'appliquera comme de soi-même aux aimans. Ainsi le rapprochement des phénomènes qui appartiennent aux deux branches de connaissances, se trouve limité à ceux où chaque corps n'a que sa quantité naturelle de fluide, qui peut bien être décomposée, mais jamais augmentée ni diminuée. Au reste, si cette constance du fluide magnétique à rester engagé dans l'intérieur du fer, sans se produire au dehors, ne promet pas des phénomènes aussi frappans que ceux auxquels l'électricité donne naissance, elle en offre qui méritent d'autant mieux d'être étudiés par des observateurs attentifs, que plus une cause semble affecter de se cacher, et plus elle fait paraître la sagacité de ceux qui en ont pénétré le mécanisme.

Equilibre de deux morceaux de Fer dans l'état naturel.

876. Lorsque deux morceaux de fer A et B, en présence l'un de l'autre, sont dans l'état naturel, leur équilibre, ainsi que celui des corps qui ne donnent aucun signe d'électricité, dépend de quatre forces qui se détruisent mutuellement. En nous bornant à

considérer ces forces dans le corps A, parce que toute action est réciproque, nous devons concevoir que le fluide austral de ce corps agit par attraction sur le fluide boréal de B, et par répulsion sur son fluide austral; et que, d'une autre part, le fluide boréal de A agit par attraction sur le fluide austral de B, et par répulsion sur son fluide boréal. Un raisonnement semblable à celui que nous avons fait (561) par rapport aux actions électriques, prouvera que les quatre forces dont il s'agit ici sont égales entre elles; et comme il y a deux attractions et deux répulsions, il s'ensuit que toutes les forces sont en équilibre.

Action mutuelle de deux Aimans.

877. Nous avons vu (682) que quand deux corps idio-électriques ont leurs parties dans des états opposés, et qu'on les met en présence, ils s'attirent par leurs côtés différemment électrisés, et se repoussent par leurs côtés semblablement électrisés. De même, si deux aimans M, N (*fig. 6*) se regardent de manière que M tourne son pôle boréal B vers le pôle austral *a* de l'aimant N, le fluide boréal de B, par exemple, étant à une plus petite distance de l'aimant N que le fluide austral de A, nous pourrions considérer l'aimant M comme étant tout entier à l'état boréal, en vertu d'une force B', égale à la différence entre les forces de A et de B; et la force B' agissant plus par attraction sur le fluide austral du pôle *a* que sur le fluide boréal de *b*, qui est plus éloigné de l'aimant M, l'attraction l'emportera; et si les deux aimans sont libres de se mouvoir, ils s'approcheront jusqu'au contact et adhéreront l'un à l'autre; si, au contraire, le pôle *b* était tourné vers le pôle B, comme le représente la *fig. 7*, il est facile de voir, en faisant le même raisonnement, avec une simple inversion dans les termes, qu'il y aura répulsion entre les deux aimans. Ce sera la même chose, si l'on suppose que ces aimans tournent l'un vers l'autre leurs pôles A, *a*, sollicités par le fluide austral. En général, deux aimans s'attirent par leurs pôles de différens noms, et se repoussent par leurs pôles de même nom.

878. Il est facile, au moyen d'une expérience très connue, de

Vérifier ces différens résultats. Il suffit d'avoir une aiguille magnétique, mobile sur un pivot, et de lui présenter un barreau aimanté, dont on varie la position de manière à faire naître successivement les attractions et les répulsions qui dépendent des pôles, que l'on met en regard (1). Pour compléter l'expérience, on transportera le barreau derrière l'aiguille, d'un côté ou de l'autre, et dans le même alignement. Elle restera immobile, si les deux pôles voisins sont de nom différens; mais s'ils sont de même nom, on verra l'aiguille faire une demi-révolution autour de son centre et après plusieurs oscillations, se diriger en sens contraire de sa première position. Nous avons vu (753) que deux tourmalines chauffées, et placées dans des circonstances analogues, se comportent absolument de la même manière que les deux corps magnétiques dont nous venons de parler. Il nous arrive souvent, lorsque des savans qui cultivent la Minéralogie nous invitent à leur montrer l'expérience des tourmalines, de la faire précéder par celle des aimans, dont elle offre la répétition avec un fluide différent; ce qui ajoute un nouveau degré d'intérêt à celui qu'elle excite par elle-même.

Effets des Actions électriques et magnétiques exercées par un même corps.

878. Nous avons conçu l'idée de réunir dans un corps unique les actions qui ont lieu séparément avec les deux appareils précédens. Pour y parvenir, on prend une aiguille de boussole *ab* (fig. 8), montée sur un pivot auquel un bâton de gomme-laque sert de support. On la place entre un rhomboïde *gl* de spath d'Is-

(1) On substitue avec avantage à l'aiguille un petit barreau en prisme à bases carrées, semblable à celui qu'emploient les minéralogistes pour éprouver les mines de fer, dans lequel on a pratiqué une ouverture qui sert de chape, pour la tenir librement suspendue sur la pointe d'un pivot. Sa masse le garantit de la tendance qui sollicite l'aiguille à faire des oscillations nuisibles à l'effet principal. Il se fixe presque aussitôt qu'on l'a placé, et les mouvemens que lui imprime l'action du barreau qu'on lui présente en sont plus distincts et plus réguliers.

lande et un morceau de succin r' , aplani par le bas, de manière qu'il puisse se tenir debout. Ces deux corps ont été auparavant électrisés par le frottement, et ils sont situés de manière que l'aiguille reste dans la direction du méridien magnétique (1). Si ces mêmes corps agissent conformément aux lois ordinaires, le fluide électrique naturel de l'aiguille sera décomposé; le succin attirera vers l'extrémité de l'aiguille tournée de son côté le fluide vitré ν qui s'est dégagé de la combinaison, et le spath d'Islande attirera le fluide résineux r , provenu de la même force, vers l'extrémité opposée à la première. Dans cet état de choses, l'aiguille pourra être considérée comme ayant à la fois deux pôles magnétiques a, b , et deux pôles électriques r, ν , situés dans les mêmes points que les précédens. Maintenant, si l'on présente successivement un barreau aimanté aux pôles a, b , de l'aiguille, il agira sur elle à la manière d'un corps magnétique. Si ensuite on présente un bâton de cire à cacheter, électrisé par le frottement, d'abord au pôle r et ensuite au pôle ν , il agira par répulsion sur le premier et sur le second par attraction, comme si le magnétisme de l'aiguille s'était évanoui. Si enfin on substitue au bâton de cire un fragment de spath d'Islande, ou une topaze qui ait subi de même le frottement, le pôle ν sera repoussé, et le pôle r sera attiré.

Les deux corps que l'on présente à l'aiguille en dernier lieu, se trouvant dans les sphères d'activité du succin et du rhomboïde, l'électricité de ceux-ci tend à augmenter celle qu'ils ont acquise par le frottement, lorsqu'elle est d'espèce différente, et à la diminuer, lorsqu'elle est de la même espèce. Mais comme ils sont isolans, ce que l'électricité de l'un gagne à cette influence, et ce que l'autre y perd est peu sensible, en sorte qu'on en fait abstraction. On peut négliger de même l'effet des actions électriques que le succin et la cire exercent sur le barreau considéré comme étant

(1) Il est indifférent de disposer ces corps comme l'indique la figure, où les lettres a, b , désignent, l'une le pôle austral de l'aiguille, et l'autre son pôle boréal, ou de les placer dans un ordre inverse.

à l'état naturel, parce qu'elles n'empêchent pas l'action magnétique d'être prédominante.

Le résultat qui vient d'être exposé paraît très propre à faire ressortir la distinction des deux fluides, en nous les montrant dans une circonstance où leurs molécules, après s'être dégagées d'entre celles d'un même corps, agissent indépendamment les unes des autres, comme si chacun d'eux existait seul dans l'espace où ils sont réunis.

Action d'un Aimant sur le Fer dans l'état naturel.

879. Concevons que le corps N (*fig. 6*) soit un barreau de fer, qui, étant d'abord à l'état naturel, se trouve placé dans la sphère d'activité de l'aimant M, de manière que cet aimant tourne vers lui son pôle boréal B. La force B' de cet aimant, égale à l'excès de la force de B sur celle de A, agira pour décomposer le fluide de N; et il est visible que l'effet de cette action sera d'attirer vers *a* le fluide austral dégagé de la combinaison, et de repousser vers *b* le fluide boréal; c'est-à-dire, que le barreau N acquerra lui-même la vertu magnétique, en sorte que les pôles les plus voisins seront ceux de noms différens, et que les deux aimans s'attireront. Le résultat sera le même, si l'on suppose que le barreau de fer ait été présenté à l'aimant M du côté opposé, de manière que cet aimant tournât vers lui son pôle austral A. Concluons de là que lorsqu'on met en présence d'un aimant un barreau ou un morceau quelconque de fer qui était auparavant à l'état naturel, l'action de l'aimant lui communique un magnétisme contraire à celui du pôle dont ce barreau était le plus voisin, en sorte que, dans ce cas, il y a toujours attraction entre les deux corps. Le physicien ne fait encore ici que se servir du fluide magnétique pour imiter une expérience électrique; savoir, celle où un corps qui est dans un certain état d'électricité, commence par faire sortir l'autre corps de son état naturel, et ensuite l'attire à lui (673)

880. Le barreau qui a reçu le magnétisme agit à son tour sur l'aimant qui le lui a communiqué, en décomposant une nouvelle portion du fluide naturel de cet aimant, dont une partie est

attirée vers le pôle le plus voisin du barreau, et l'autre repoussée vers le pôle opposé. La même chose arrive, à plus forte raison, lorsqu'on fait prendre le magnétisme à un barreau par le contact immédiat d'un autre barreau déjà aimanté: il en résulte une espèce de paradoxe très embarrassant pour les physiciens qui admettaient des tourbillons ou des effluves magnétiques; c'est qu'un aimant pouvait devenir plus fort lorsqu'il paraissait avoir cédé une partie du fluide dans lequel résidait sa force. Au reste, ce surcroît de vertu acquis par l'aimant, n'est bien sensible qu'autant que la force coercitive de cet aimant n'est pas très considérable.

881. Réaumur a observé le premier, avec surprise, qu'un aimant qui avait à peine la force nécessaire pour soutenir un morceau de fer d'un poids déterminé, l'enlevait plus aisément lorsqu'on plaçait ce fer sur une enclume. Cet effet s'explique de soi-même dans la théorie que nous avons adoptée: le fer ne peut être en contact avec l'aimant, sans devenir aimant lui-même; dès lors il agit de son côté sur l'enclume pour l'aimanter aussi, et l'enclume à son tour, réagit sur lui pour augmenter la quantité de fluide libre dans chacun de ses pôles, c'est-à-dire qu'elle le rend plus attirable qu'il ne le serait sans elle.

882. Reprenons l'hypothèse où le corps N ayant passé de l'état naturel à celui de magnétisme, par l'action du corps M, les positions respectives des pôles étaient celles que représente la figure. Supposons de plus, pour mettre l'expérience dans le cas le plus favorable, que les deux corps soient en contact par leurs pôles B, α . Si l'on place derrière le corps N, auprès du point b , un nouveau corps qui soit dans l'état naturel, l'action de N le convertira, à son tour, en un aimant dont le pôle austral sera contigu au pôle b , et l'on pourra continuer cette série indéfiniment. Une manière assez curieuse de varier cette expérience, consiste à présenter un des pôles d'un petit barreau magnétique à l'une des extrémités d'une aiguille à coudre, puis à élever le barreau pour que l'aiguille y reste suspendue: l'extrémité inférieure de celle-ci sert ensuite comme d'amorce pour attirer une seconde aiguille, qui demeure de même suspendue à la première; et ainsi de suite,

tant que la force magnétique l'emporte sur la pesanteur qui agit pour rompre la chaîne.

883. Voici un autre résultat qui, tout élémentaire qu'il est aujourd'hui pour ceux qui connaissent tant soit peu la théorie de l'aimant, en offre une preuve si parlante, qu'il mérite, par cela seul, d'être cité. On a deux barreaux aimantés à peu près d'égale force, et l'on présente tour à tour à chacun d'eux une clef qu'il soit capable d'enlever, ce qui a lieu, quel que soit le pôle que l'on mette en contact avec la clef. On dispose ensuite un des barreaux sur une table, de manière qu'il la dépasse assez pour que la clef y reste suspendue. On pose alors l'autre barreau sur celui auquel la clef est adhérente, en faisant correspondre du même côté les pôles de différens noms; à l'instant la clef tombe, parce que l'action que le pôle en contact avec elle exerce pour attirer à lui le fluide hétérogène de cette clef, est presque détruite par l'action répulsive du second barreau; d'où l'on voit que l'explication du fait suppose nécessairement ce principe, que le fer mis en contact avec un aimant, devient aimant lui-même. On conçoit aussi la raison de l'espèce de surprise que cet effet occasionne, lorsque l'esprit n'est pas en garde contre le paradoxe qui se présente à l'œil, et qui consiste en ce qu'une force est détruite par l'addition d'une autre force qui, employée seule, produit en apparence un effet tout semblable.

Disposition des Parcelles de Fer en lignes courbes, par l'Action magnétique.

884. L'action du magnétisme se transmet librement à travers tous les corps qui ne sont pas susceptibles de l'acquérir. Que l'on interpose une planche, une glace, une plaque de cuivre, etc., entre deux aimans, on ne remarquera aucune altération sensible dans leurs actions réciproques. Le charlatanisme a profité de cette faculté qu'ont les forces magnétiques de n'être arrêtées par aucun obstacle, pour donner un air de prestige à des phénomènes très ordinaires, à l'aide d'un mécanisme qui en dérobait aux regards le véritable agent.

Mais ici l'expérience seule, dégagée de tout ce qui pourrait la déguiser, conduit à des résultats qui paraissent faits pour déconcerter la sagacité du physicien lui-même; et jamais une théorie n'est mieux établie que quand ses principes, que l'on aurait cru d'abord ébranlés par les difficultés qui naissent de ces résultats, empruntent, au contraire, une nouvelle force des solutions heureuses qu'ils en fournissent. Nous avons déjà eu occasion de citer plusieurs de ces solutions, et ce qui va suivre nous en offrira de nouveaux exemples qui ne sont pas moins remarquables.

885. On dispose verticalement, à une distance de quelques centimètres, deux barreaux de fer aimanté, dont les pôles opposés sont tournés du même côté: on recouvre ensuite les extrémités supérieures avec une planche mince ou une feuille de papier parsemée de limaille de fer; à l'instant les parcelles de cette limaille s'arrangent de manière à former une multitude de courbes plus ou moins évasees, qui se croisent toutes dans les points situés immédiatement au-dessus des extrémités supérieures des deux aimans. La *figure 9* peut donner une idée de cet assemblage de courbes.

Les physiciens ont regardé ce phénomène comme une preuve évidente de l'action des tourbillons magnétiques. Les autres expériences ne donnaient matière qu'à des conjectures sur l'existence de ces tourbillons: dans celle-ci on les voyait se peindre eux-mêmes.

886. Nous allons analyser le phénomène, pour en mieux faire saisir la véritable explication, d'après les principes de notre théorie. Soit CG (*fig. 10*), un aimant qui ait son centre d'action boréale en B , et son centre d'action australe en A . Concevons que l'on suspende librement une aiguille de fer extrêmement courte vers un point N plus voisin de B que de A : cette aiguille, que nous supposons avoir été jusque-là dans l'état naturel, deviendra elle-même un aimant; et parce que l'on peut regarder alors l'aimant CG comme sollicité par une seule force, en vertu d'une certaine quantité B' de fluide boréal (877), l'aiguille prendra une position oblique à l'aimant, telle que ba , de manière que a sera son pôle austral, et b son pôle boréal. Les choses étant

dans cet état, concevons que l'on fasse mouvoir le centre c de l'aiguille, d'une très petite quantité, le long de la ligne ad située sur le prolongement de cette aiguille, en sorte que son centre parvienne, par exemple, en g ; en vertu de ce seul mouvement, l'extrémité a de l'aiguille se rapprochera du point B; d'où il suit, que l'aiguille prendra une nouvelle position moins oblique que la précédente, et dirigée suivant une ligne em qui fera, avec la ligne bd , un angle infiniment petit. Si l'on fait faire au centre c un nouveau mouvement le long de la ligne em , de manière que ce centre parvienne en f , l'aiguille prendra une nouvelle direction, telle que fl , infiniment peu inclinée sur la direction précédente. Si l'on continue de faire mouvoir de la même manière le centre de l'aiguille, il est aisé de voir que ce centre décrira une courbe $cgfu$, etc., dont les côtés coïncideront avec les différentes directions de l'aiguille.

il y aura un point de la courbe où l'aiguille qui s'écartera continuellement du parallélisme avec CG , prendra une direction nr perpendiculaire sur cette ligne. Au-delà de ce point, l'extrémité a de l'aiguille tendant toujours à se rapprocher de plus en plus du point B, les nouveaux côtés rs de la courbe seront inclinés en sens contraire des premiers côtés cg , fg , etc.; et enfin lorsque l'extrémité a de l'aiguille sera infiniment près du point B, la courbe passera par ce même point. Au-dessous elle formera des côtés qui approcheront toujours davantage du parallélisme avec CG ; et lorsque le centre de l'aiguille sera en p , situé précisément au-dessous du centre O de l'aimant CG , la direction xy de l'aiguille sera parallèle à CG , à cause de l'équilibre entre les forces des pôles B et A. Au-delà de ce terme, la force du pôle A étant devenue prépondérante, la courbe s'infléchira vers le point A, et finira par y passer, en formant une nouvelle branche az AM, semblable à la branche opposée.

Imaginons maintenant que l'on ait disposé, sur la circonférence de cette courbe, les centres d'une multitude d'aiguilles très courtes; bientôt ces aiguilles prendront de telles positions, que chacune d'elles se dirigera suivant la tangente au point de la courbe, lequel se confondra avec le centre de l'aiguille; et comme

toutes ces aiguilles se regardent par leurs pôles de différens noms ; elles adhéreront entre elles, et formeront elles-mêmes une courbe continue.

887. Si l'on substitue à ces aiguilles des parcelles de limaille, et qu'au lieu de supposer ces parcelles librement suspendues, on conçoive qu'elles soient couchées sur un plan où elles éprouvent un certain frottement, la résistance produite par ce frottement les empêchera de glisser vers les points A, B, qui agissent pour les attirer; en même temps cette force attractive pourra être telle, que les parcelles de limaille prennent la direction qu'elles auraient, dans le cas où elles seraient mobiles autour de leurs centres, surtout si l'on seconde leur tendance, en secouant légèrement le plan qui les soutient, en sorte qu'elles y formeront, par leur assemblage, la ligne courbe dont nous avons parlé. On comprend aisément que si le plan est couvert de parcelles de limaille, celles-ci se dirigeront sur les côtés de différentes lignes courbes relatives à autant de systèmes d'actions particuliers, et qui auront deux intersections communes aux points A et B, ce qui est conforme à l'observation.

Explication d'un Paradoxe magnétique.

888. On peut expliquer, à l'aide du raisonnement, un petit phénomène qui a du rapport avec le précédent, et qui est d'autant plus piquant par sa singularité, qu'il semble mettre l'expérience en contradiction avec la théorie. Voici en quoi il consiste. On place sur une planche OR (*fig. 11*) un fil de fer délié, long de deux ou trois millimètres, et l'on tient au-dessus de cette table, à la distance de quelques centimètres, un barreau magnétique AB, dans une position verticale, dont l'extrémité inférieure, qui peut être indifféremment le pôle boréal ou le pôle austral, soit située de ce côté, par rapport au fil de fer. A l'instant ce fil s'élève par l'extrémité la plus voisine du barreau, en prenant une position oblique telle que *ba*. On imprime ensuite de légères secousses à la planche, de manière à faire un peu sautiller le fil de fer, et on le voit s'approcher continuellement du barreau, jusqu'à ce

qu'il vienne se placer immédiatement au-dessous du pôle B, dans une situation verticale.

Jusqu'ici il n'est rien arrivé que l'observateur n'eût deviné d'avance. Maintenant, si l'on place le barreau en dessous de la planche, ainsi qu'on le voit (*fig. 12*), et que du reste on opère comme dans le cas précédent, le fil *ba* se dressera de nouveau, en faisant un angle plus ou moins aigu avec la surface de la planche; mais à mesure qu'on imprimera de petites secousses à cette planche, le fil s'écartera continuellement du barreau, en se rapprochant du point R, quoiqu'il soit bien évident que le barreau exerce sur lui une force attractive.

889. Pour éclaircir ce paradoxe, reprenons le cas où le barreau était en dessus de la table. Soit B (*fig. 13*) le centre d'action inférieur de ce barreau. Au moment où le fil se dresse, nous pouvons le considérer comme un petit levier *ab* dont le point d'appui est au point *b*, et dont l'extrémité *a* est sollicitée à la fois par l'attraction du pôle B et par la pesanteur qui agit pour le faire descendre. Or, cette dernière force s'oppose en partie à l'effet de l'attraction de B, en sorte que l'angle *abs*, formé par la direction du fil avec le plan OR, est plus petit que l'angle *Bbs* qui aurait lieu dans l'hypothèse où le fil se dirigerait suivant la ligne *bB*, qui passe par le pôle du barreau.

Supposons maintenant que, par l'effet d'une force quelconque, le fil *ab* se détache du plan OR, de manière que son centre de gravité *c* se relève un peu au-dessus de sa première position, et parvienne au point *c*, situé sur la verticale *uc* *z*: si nous imaginons, pour un instant, qu'il ait pris la position *a' b'* parallèle à *ab*, il ne la conservera pas, mais ses extrémités *b'*, *a'*, étant alors toutes les deux libres de se mouvoir, le fil tournera autour du point *c'*, et tendra à se diriger sur une ligne qui passe par le pôle B, ce qui ne peut avoir lieu sans que son extrémité *b'* ne s'abaisse vers le plan OR; et lorsqu'elle le touchera, le fil ayant une direction telle que *b'' a''*, dont le prolongement passe par le pôle B, ou à peu près, son extrémité *b''* sera plus voisine de la verticale *sB*, que lorsqu'il avait la position *ba*. En même temps, la résistance du plan OR offrant de nouveau un point d'appui au petit levier qui repose

sur lui par son extrémité b'' , celle-ci restera fixe, tandis que l'extrémité opposée a'' descendra un peu par l'effet de la gravité, de manière que l'angle $a''b''s$ diminuera d'une petite quantité, en restant cependant toujours plus ouvert que le premier angle abs .

Pendant la descente du point a'' , le centre de gravité c' quittera la verticale uz , et se placera dans un point x , situé sur un arc dont $b''c'$ sera le rayon, d'où il suit qu'il se rapprochera de sB . Si l'on imprime au plan OR une seconde secousse, et que l'on imagine une nouvelle verticale qui passe par le point x , et le long de laquelle se meuve le centre de gravité du fil, le même effet se répètera, et ainsi de suite, en sorte que le point b'' aura un mouvement progressif vers le point s , et finira par coïncider avec lui, en se dirigeant dans le sens de la verticale sB .

890. La supposition que nous avons faite d'une verticale dont le centre de gravité du fil suivait la direction, en s'élevant au-dessus de sa position précédente, n'est pas tout-à-fait conforme à la vérité. Car l'aimant AB ne s'éloigne pas assez du fil, pour que l'on puisse regarder comme insensible la quantité dont les distances des pôles a, b , de ce fil au pôle B de l'aimant diffèrent l'une de l'autre, relativement à elles-mêmes. Il en résulte que l'attraction du pôle B sur le pôle a de l'aiguille est un peu plus forte que la répulsion sur le pôle b . Par une suite nécessaire, le centre de gravité du fil, tandis qu'il monte en vertu de la secousse imprimée au plan OR , laquelle est censée agir suivant une direction diamétralement opposée à la pesanteur, ne se meut pas exactement en ligne verticale; il dévie un peu vers l'aimant AB , et le même effet se répète pendant la descente du fil. Mais il est aisé de voir que l'action de la petite force dont il s'agit ne s'oppose pas au mouvement progressif du fil vers l'aimant; elle ne fait que détourner un peu ce fil de la route qu'il tend à prendre, en vertu des autres forces qui le sollicitent.

891. Essayons maintenant d'analyser de même l'effet inverse que présente le phénomène lorsque l'aimant est situé au-dessous du plan OR , comme on le voit (*fig. 14*), où l'on a supposé que le pôle A , le plus voisin du plan OR , était le pôle austral, ce qui

est indifférent pour le résultat. Dans cette hypothèse, le fil de fer ayant pris de lui-même la direction ba , si l'on donne une petite impulsion au plan OR, et que c' soit la nouvelle position du centre de gravité du fil, il est facile de voir que ce fil, au lieu de rester sur une direction $a'b'$ parallèle à ab , s'abaissera par son extrémité b' , de manière que quand celle-ci touchera le plan OR, la direction du fil sera sur la ligne $a''b''A$, qui passe par le pôle A de l'aimant, d'où il suit que l'extrémité b'' sera plus éloignée de la verticale As que dans sa première position. Mais au même moment le fil soutenu au point b'' par le plan descendra un peu par son extrémité a'' , en vertu de la pesanteur, et son centre de gravité se transportera à la droite de la verticale uz ; après quoi il est facile de concevoir comment les nouvelles secousses imprimées au plan OR détermineront le fil à se rapprocher du point R, de manière que l'attraction exercée sur lui par l'aimant paraîtra s'être changée en répulsion.

892. Nous avons encore fait abstraction de la tendance qu'a le centre de gravité du fil pour se porter vers l'aimant, qui attire davantage le pôle b qu'il ne repousse le pôle a . Or, cette attraction agit pour contrarier le mouvement rétrograde du fil ab ; mais son effet n'étant que le résultat de la légère différence qui existe entre les forces que l'aimant exerce sur les deux pôles du fil, paraît devoir être plus que balancé par celui des deux forces conspirantes qui agissent l'une sur le pôle b' , l'autre sur le pôle a' pour faire tourner le fil autour de son centre, et le diriger suivant $a'b''$. L'observation de ce qui se passe dans l'expérience, où chaque nouvelle secousse imprimée au plan OR détermine le fil à s'éloigner de l'aimant, vient ici à l'appui du raisonnement, et prouve que c'est réellement le second effet qui prédomine.

893. Nous indiquerons une expérience très facile à faire, qui offre un nombreux assemblage de petits phénomènes semblables à celui dont nous venons de donner l'explication. Au lieu d'un seul fil de fer, on met sur la planche OR une pincée de limaille, et on dispose l'aimant en dessous de la planche, de manière que sa direction prolongée passe par le centre de l'endroit recouvert de limaille. A mesure qu'on agite la planche par

de légères secousses, on voit les parcelles de limaille s'écarter de toutes parts, comme si elles étaient mues sur les rayons d'un cercle, et laisser à l'endroit qu'elles occupaient d'abord un vide autour duquel elles s'arrangent en forme de disque.

Distribution des deux Fluides dans un Aimant.

894. Avant d'aller plus loin, il est nécessaire de donner une idée de la manière dont les deux fluides magnétiques sont distribués dans l'intérieur d'un aimant. Cette distribution, qui est analogue à celle du fluide électrique autour d'un conducteur, ou à celle des deux fluides électriques dans une tourmaline, se fait en général, de manière que les densités magnétiques étant très considérables vers les extrémités, décroissent ensuite rapidement, et deviennent presque nulles dans un espace sensible situé vers le milieu de l'aimant. Il en résulte que les centres d'action sont, comme nous l'avons dit (870), à une petite distance des extrémités. Par exemple, cette distance n'était que de $22^{\text{mill}},5$, ou 10 lignes dans un fil d'acier de $67^{\text{cent}},5$, ou 25 pouces de longueur. On jugera à peu près de cette proximité des centres d'action à l'égard des extrémités d'un fil ou d'un barreau d'acier aimanté, en tenant ce barreau dans une position verticale, vis-à-vis d'une aiguille de boussole suspendue librement, et en le faisant monter et descendre, de manière que les différens points de sa longueur se présentent successivement à l'aiguille; on remarquera dans cette aiguille une tendance sensible vers un certain point du barreau, qui sera peu éloigné de l'extrémité située du même côté.

895. On peut obtenir un résultat analogue à celui que nous venons de décrire, en variant les fonctions du barreau et de l'aiguille. On donnera au premier une position horizontale, et on placera le support de l'aiguille verticalement sur sa face supérieure. Supposons qu'alors le support corresponde au milieu de la même face. Il est évident que, dans ce cas, la direction de l'aiguille sera parallèle à l'axe du barreau. On fera ensuite avancer

le support d'un côté ou de l'autre, et on verra l'aiguille s'incliner peu à peu vers l'extrémité du barreau, dont elle s'approchera, et qui sera, par exemple, celle dans laquelle réside le centre d'action australe; d'où il suit que le pôle de l'aiguille attiré par ce centre sera son pôle boréal. Si l'on poursuit le mouvement, l'aiguille s'inclinera de plus en plus, et lorsqu'elle sera arrivée à peu près à la distance de l'extrémité vers laquelle elle se meut, où l'axe de son support, en le supposant prolongé, passera par le centre d'action australe du barreau, on la verra aussitôt faire une demi-révolution autour de son pivot, et s'incliner en sens contraire, pour continuer de se présenter de la même manière à l'attraction du centre, qui alors agira elle-même suivant une direction opposée à la première. On voit que cette expérience n'est qu'une répétition de la première, dans laquelle le mouvement circulaire s'est substitué au mouvement d'oscillation.

896. La distribution des deux fluides magnétiques dans un aimant, telle que nous l'avons décrite, dépend de ce que les forces de ces deux fluides suivent la raison inverse du carré de la distance. A en juger par les apparences, l'action de chaque moitié de l'aimant provient uniquement de la présence d'un seul fluide à l'état de liberté. Mais tout nous conduit à admettre une hypothèse très heureuse de Coulomb, que nous avons déjà indiquée en parlant de l'électricité (756). Elle consiste à regarder chaque molécule de fer comme un petit aimant, qui a son pôle boréal et son pôle austral égaux en force l'un à l'autre. Tous les petits aimans dont un barreau magnétique est l'assemblage, sont rangés sur différentes files parallèles à l'axe du barreau, de manière que le pôle boréal de l'un est contigu au pôle austral du suivant, ou réciproquement. Nous allons essayer de faire voir comment cette hypothèse offre l'équivalent de ce qui aurait lieu, si chaque moitié de l'aimant était dans un seul état de magnétisme.

897. Concevons d'abord une aiguille infiniment déliée *mn* (fig. 15), composée d'une infinité de petites aiguilles partielles *c, d, e, f*, etc., et supposons que cette aiguille ait été mise à l'état de magnétisme par l'action d'un aimant. Dans ce cas, toutes les forces contraires des pôles contigus *b, a'*; *b',*

a'' , etc. (1), seront égales entre elles, en sorte que leurs actions se réduiront à zéro. Quant aux forces des deux pôles extrêmes, savoir, celle du pôle a de l'aiguille c , et celle du pôle b de l'aiguille r , qui seules sont en activité à cause de leur isolement, comme les quantités de fluide dont elles dépendent ne résident que dans deux points, elles sont censées agir sur tous les pôles intermédiaires à des distances infinies, et par conséquent leur action est nulle pour altérer l'état de l'aiguille entière.

Si donc il existait une pareille aiguille magnétique, ses deux centres d'action seraient situés dans ses points extrêmes, et tout l'espace intermédiaire serait censé être dans l'état naturel.

898. Mais l'hypothèse d'une aiguille infiniment déliée n'est qu'idéale, et tous les aimans ont une épaisseur plus ou moins sensible. Or, nous pouvons faire entrevoir, à l'aide du raisonnement, quel doit être le résultat de l'influence mutuelle des différentes aiguilles semblable à mn , dont un aimant est censé être l'assemblage, pour mettre cet aimant dans l'état où nous l'offre l'observation.

Imaginons que MN étant l'aimant dont il s'agit, la distribution des deux fluides soit d'abord la même, dans chacune de ses aiguilles composantes, que celle qui a lieu dans l'aiguille mn ; supposons, de plus, que l'on mette celle-ci en contact avec l'aimant MN , en sorte qu'elle ne forme plus qu'un avec lui, et examinons l'action qu'il doit exercer sur les différens points de cette aiguille. Si nous divisons l'aimant MN , par la pensée, en autant de parties C, D, E, F , etc., qu'il y a d'aiguilles partielles dans l'aiguille mn , nous aurons une suite d'aimans dans lesquels les forces des pôles contigus $B, A'; B', A''$; etc., se détruiront mutuellement, et ainsi MN , dans la supposition présente, ne pourra agir sur l'aiguille mn , qu'à l'aide des forces qui ont leur siège dans les pôles extrêmes, savoir, le pôle A de la partie C , et le pôle B de la partie R . Or, chacune de ces forces est celle

(1) La lettre b indique ici, comme à l'ordinaire, le pôle boréal, et la lettre a le pôle austral.

d'un fluide qui s'étend sur une surface égale à la base de la partie C ou R, composée d'une infinité de points, d'où il résulte qu'elle agit à des distances finies sur toutes les petites aiguilles c , d , e , f , etc.

Maintenant le fluide du pôle supérieur A attire à lui le fluide boréal du pôle b , b' , b'' , etc. de chacune de ces aiguilles, et repousse le fluide austral du pôle a , a' , a'' , etc. Donc il y aura un certain nombre de molécules hétérogènes qui se réuniront dans chaque aiguille, et recomposeront une partie du fluide naturel. Mais le fluide du pôle A agit plus fortement sur les aiguilles voisines de l'extrémité m , et plus faiblement sur celles qui sont à une certaine distance de m . Donc la quantité de fluide naturel recomposé décroîtra d'une aiguille à l'autre; et, par une suite nécessaire, les portions de fluide qui restent à l'état de dégagement iront, au contraire, en croissant depuis l'extrémité m . Les mêmes effets auront lieu en sens contraire en vertu de l'action du pôle inférieur B sur les aiguilles r , o , h , etc.

Il suit de là que si l'on représente par a , b , a' , b' , etc., les quantités de fluide qui restent à l'état de dégagement dans les aiguilles dont ces lettres nous ont servi à désigner les pôles, et si l'on compare les deux aiguilles c , d , on aura a' plus grand que b ; de même, en comparant e avec d , on aura a'' plus grand que b' , etc., d'où nous concluons que l'action $a'' - b'$ des deux suivans, équivaut à celle d'un pôle austral animé d'une force égale à l'excès de a' sur b , ou de a'' sur b' . En faisant un raisonnement semblable à l'égard des pôles suivans, jusqu'au milieu de l'aiguille mn , on en conclura que toute cette moitié est dans le même cas que si elle était sollicitée par une suite de quantités décroissantes de fluide austral. Ce sera le contraire par rapport à la moitié inférieure de l'aiguille mn . Les différences $b' - a$, $b'' - a'$, etc., entre les quantités de fluide qui appartiennent aux aiguilles partielles r , o , etc., représenteront chacune une force boréale, et toute cette moitié de l'aiguille sera censée être à l'état de magnétisme boréal. De plus, les points également distans des extrémités étant sollicités par des forces égales et con-

traires, on aura, au milieu de l'aiguille, $b''' - a''' = 0$; d'où il suit que ce point sera neutre (1).

Mais, parce que les forces de l'aimant MN suivent la raison inverse du carré de la distance, elles agiront avec une intensité incomparablement plus grande sur les aiguilles voisines des extrémités m, n , que sur celles qui sont à une certaine distance de ces extrémités, en sorte que si l'aiguille mn est un peu longue, l'effet de ces forces deviendra presque nul sur la partie moyenne de l'aiguille. Ainsi les fluides conserveront à peu près leur état primitif dans cette partie, d'où il résulte qu'elle ne différera pas beaucoup de l'état naturel.

Ce que nous avons dit de l'aiguille infiniment déliée mn , a également lieu par rapport à toutes les aiguilles dont un aimant MN d'une épaisseur sensible est l'assemblage, et cela en vertu des actions réciproques de ces aiguilles; de manière qu'à l'instant même où cet aimant a été tiré de l'état naturel, il s'est établi dans son intérieur une distribution générale des deux fluides, semblable à celle que nous avons considérée par rapport à une seule aiguille, pour aider nos conceptions.

(1) Pour rendre cette explication plus sensible, servons-nous de nombres pris arbitrairement, et représentons d'abord par $+ 16$ et $- 16$ les quantités de fluide qui sollicitaient les différens pôles a, b, a', b' , etc., dans l'état primitif de l'aiguille, le signe négatif indiquant ici le fluide boréal. Supposons qu'en vertu du contact de l'aimant MN, et de la nouvelle distribution qui en résulte relativement aux deux fluides renfermés dans l'aiguille mn , l'état de l'aiguille partielle e soit représenté par $+ 6 - 6$, celui de d par $+ 12 - 12$, celui de e par $+ 15 - 15$, celui de f par $+ 16 - 16$; et que, de même, en partant de l'extrémité opposée, l'état de r soit représenté par $- 6 + 6$ celui de o par $- 12 + 12$, celui de h par $- 15 + 15$, et celui de g par $- 16 + 16$; il est aisé de voir que les quantités de fluide austral qui resteront en activité dans la moitié supérieure de l'aiguille, formeront cette série : $+ 12 - 6, + 15 - 12, + 16 - 15, + 16 - 16$, ou plus simplement, $6, 3, 1, 0$. De même, les quantités de fluide boréal qui resteront en activité dans la moitié inférieure de l'aiguille, donneront cette série : $+ 6 - 12, + 12 - 15, + 15 - 16, + 16 - 16$ ou $- 6, - 3, - 1, 0$. Ainsi chaque moitié de l'aiguille sera censée être sollicitée par une seule force égale et contraire à celle de l'autre moitié.

Magnétisme complet d'un Segment de Barreau aimanté.

899. Il est facile maintenant de résoudre la difficulté que présente un phénomène qui a beaucoup étonné les physiciens, et dont *Æpinus* lui-même n'a donné qu'une explication peu satisfaisante. On coupe un barreau magnétique vers l'une de ses extrémités, de manière à en détacher une portion qui peut avoir si peu de longueur que l'on voudra, et à l'instant cette portion devient elle-même un aimant complet, qui a encore ses deux moitiés sollicitées par des forces égales et contraires. Comment concevoir, dans les théories ordinaires, le double magnétisme dont se trouve pourvu tout-à-coup, par une sorte de création, ce segment qui était auparavant tout entier dans un état unique, semblable à celui de la partie dont il a été ensuite séparé?

Pour faire disparaître ce paradoxe, reprenons d'abord l'hypothèse de l'aiguille infiniment déliée *mn*, qui offre, comme nous l'avons vu, une succession de pôles opposés, égaux en forces, et contigus deux à deux, excepté le premier et le dernier, qui sont isolés. Il est bien évident que si l'on cassait cette aiguille à un endroit quelconque de sa longueur, chaque partie aurait encore à ses extrémités deux pôles animés de forces égales et contraires, dont l'une, qui était d'abord isolée, avait dès-lors toute son intensité, et l'autre, qui était balancée par la force du pôle contigu, aurait été mise en activité, en se séparant de ce pôle.

La même chose aura lieu, si l'on suppose qu'une portion de l'aimant *MN* ait été détachée du reste, avec cette différence, que le pôle situé à l'endroit de la division aura d'abord plus de force que celui de l'extrémité opposée, puisque dans l'aimant encore intact, les quantités de fluide allaient en croissant d'un pôle à l'autre, depuis chaque extrémité. Mais à l'instant même, l'état de tout le système changera de manière à satisfaire aux conditions de l'équilibre, qui exige que tout soit semblable de part et d'autre, à égale distance des extrémités.

900. Nous avons vu (756) que les tourmalines offrent un phé-

nomène semblable; et il est effectivement naturel de penser que les molécules intégrantes des corps, soit magnétiques, soit électriques, étant de petits cristaux complets, qui ont des formes similaires, et qui sont disposés symétriquement dans le corps entier, chacune d'elles doit aussi subir complètement] la double action de l'électricité ou du magnétisme, pour mettre ses deux moitiés dans des états différens; en sorte que la distinction de ces mêmes états, relativement aux corps entiers, n'est qu'une suite de ce qui a lieu pour chaque molécule. L'effet de l'ensemble s'assimile à celui des parties composantes; et d'après cette hypothèse, très plausible, il n'y a plus rien d'extraordinaire dans les phénomènes produits par ces corps, que l'on pourrait appeler les *polytes du règne minéral*.

901. L'existence de l'action polaire dans les molécules du fer, à l'état du magnétisme, est une suite nécessaire du résultat d'une expérience facile à faire. Pour obtenir ce résultat, on se servira d'un bout de fil de fer délié, de cinq ou six centimètres de longueur. Les fils du même métal que l'on emploie pour monter un *piano* ont les qualités convenables pour l'expérience dont il s'agit. Ayant choisi une petite aiguille aimantée, d'une grande mobilité, on présentera d'abord successivement à ses deux pôles une même extrémité du fil, et si l'on s'aperçoit qu'il ait aussi la vertu polaire, comme cela arrive souvent, pour une raison que nous ferons connaître dans la suite, on augmentera cette vertu à l'aide d'une des méthodes d'aimantation dont nous parlerons bientôt. On coupera ensuite le fil avec des ciseaux, de manière à le diviser en parties toujours plus courtes, que l'on présentera tour à tour à l'action de l'aiguille, en les laissant dans la position qu'elles avaient, lorsqu'elles composaient le fil par leur assemblage. On trouvera que chacune d'elles aura encore deux pôles situés dans le même sens que ceux du fil entier. Ils continueront de se montrer dans toutes les parties que leur petitesse n'empêchera pas d'être saisies et présentées à l'aiguille. Et comme il n'y a pas de raison pour que la vertu polaire s'arrête plutôt à tel endroit qu'à tel autre dans la portion de série que l'imperfection de nos moyens rend inaccessible à l'expérience, on a droit d'en conclure qu'elle

s'étend jusqu'à la molécule intégrante qui en est le dernier terme.

4. De la communication du Magnétisme.

902. Nous avons déjà parlé (879) de l'action exercée par un aimant sur un morceau de fer qui, étant d'abord à l'état naturel, se trouve ensuite placé dans la sphère d'activité de cet aimant, et nous avons vu qu'il acquerrait lui-même la vertu magnétique, de manière que sa partie tournée vers l'aimant était dans un état opposé à celui du pôle qui avait agi sur elle à une plus grande proximité. Nous avons maintenant à exposer les différens moyens qui ont été imaginés pour porter au plus haut degré possible ce magnétisme acquis par communication. Mais il faut auparavant donner une idée d'un résultat qui a lieu quelquefois, par suite d'une distribution irrégulière des deux fluides mis en mouvement dans un corps qui passe à l'état de magnétisme.

Des Points conséquens.

903. Supposons que AB (*fig. 16*) soit un aimant vigoureux qui agisse sur un barreau de fer *mn*, pour lui communiquer la vertu magnétique; l'action de cet aimant, qui dépendra de l'exoès B' de la force du pôle boréal B sur celle du pôle austral A (879), attirera du fluide austral *a* dans les parties du barreau voisines de *a*, et repoussera du fluide boréal *b* dans les parties situées vers *m*. Or, deux causes font obstacle au mouvement de ce dernier fluide: savoir, la difficulté qu'éprouvent ses molécules à se mouvoir dans le fer, et qui provient de la force coercitive (869), et la répulsion qu'exercent sur ces mêmes molécules celle du fluide déjà accumulé vers l'extrémité *m*; et cette répulsion augmente continuellement, à mesure que l'accumulation va elle-même en croissant. Il peut donc arriver qu'il y ait un terme où la résistance qui naît du concours de ces deux causes devienne supérieure à la répulsion de la force B', et alors le fluide s'engorgera, pour ainsi dire, dans quelque point *b'*, en cédant à cette résistance, et il

G..

pourra même abonder tellement dans ce point, que son action produise dans la partie voisine a' le magnétisme austral.

Le barreau mn aura donc, dans ce cas, quatre pôles situés à la suite les uns des autres, et qui auront alternativement le magnétisme austral et le magnétisme boréal. On a donné le nom de *points conséquens* à ces différens pôles qui se succèdent dans un même aimant. Il y a une grande différence entre cette succession de pôles contraires et celle qui résulte de ce que les molécules du fer sont autant de petits aimans dont les pôles en contact ont des forces opposées; car nous avons vu que ces forces sont équivalentes à une seule force, qui ne varie d'un point à l'autre que par son intensité, au lieu que chaque point conséquent détermine une force réellement contraire à celle que manifesterait sans lui la partie dans laquelle il réside.

904. L'action d'un aimant sur une aiguille qui est déjà à l'état de magnétisme, mais qui n'a que deux pôles, à l'ordinaire, peut être assez forte pour faire acquérir un ou deux pôles de plus à cette aiguille, qui alors aura trois ou quatre points conséquens. Elle peut encore produire un autre effet, qui est lié avec le précédent, et d'où résulte un simple renversement des pôles de l'aiguille, de manière que le pôle austral prendra la place du pôle boréal, et réciproquement.

La circonstance qui détermine l'un de ces effets à avoir lieu plutôt que l'autre, dépend du rapport entre la force du barreau et celle de l'aiguille. Supposons que l'aiguille mn (*fig. 17*) étant mobile sur son pivot, on la présente par son pôle boréal b au pôle boréal B d'un barreau, en la maintenant avec la main, pour l'empêcher de tourner par l'effet de la répulsion. Il pourra arriver que la force B' du barreau (879) refoule tout le fluide b jusqu'à une certaine distance de l'extrémité n , et qu'en même temps elle décompose une nouvelle portion du fluide qui est encore à l'état naturel dans l'aiguille, et attire vers n le fluide austral qui faisait partie de ce fluide naturel. L'aiguille alors aura trois points conséquens, ainsi qu'on le voit (*fig. 18*), en sorte que si l'on fait passer successivement, vis-à-vis de ses différens points, le pôle austral d'une autre aiguille, qui ne soit pas assez forte pour

changer l'état de la première, les deux extrémités de celle-ci seront repoussées, et il y aura, entre l'une et l'autre, un point tel que *b* qui sera attiré.

905. Mais si le barreau AB (*fig. 17*) est assez vigoureux pour surmonter dans tous les points de l'aiguille *mn* la résistance de la force coercitive, il pourra se faire qu'il refoule jusqu'en *m* le fluide boréal de l'aiguille, et attire jusqu'en *n* son fluide austral, et dans ce cas, les pôles de l'aiguille seront renversés sans qu'il y ait aucun pôle intermédiaire entre les extrémités *m*, *n*.

906. L'analogie entre les aimans et les corps susceptibles de s'électriser par la chaleur, se soutient jusque dans cette espèce d'anomalie que présentent les points conséquens. Nous avons observé une topaze qui, après avoir été chauffée, avait ses deux extrémités à l'état résineux, tandis que la partie intermédiaire donnait des signes d'électricité vitrée (1).

Différences entre l'Acier et le Fer doux, relativement à la communication du Magnétisme.

907. Pour faciliter l'intelligence de ce qui doit suivre, nous rappellerons ici, avec plus de détail, ce que nous avons déjà dit (869) de la différence qu'apporte en général, dans le mouvement interne du fluide, le plus ou moins de dureté du fer. L'acier ne se prête à ce mouvement qu'avec beaucoup de difficulté; mais aussi dès qu'une fois les deux fluides composans ont franchi les obstacles qui tendaient à les empêcher de se distribuer dans les deux moitiés d'un barreau d'acier, la même difficulté qui avait retardé cette distribution, s'oppose à l'effet de la force attractive, qui tend à ramener les deux fluides l'un vers l'autre, et à faire rentrer, par leur combinaison, le barreau dans son état naturel. Au contraire, dans le fer doux, le dégagement des deux fluides se fait plus facilement et plus abondamment; mais le retour à

(1) Annales du Muséum d'Histoire naturelle, t. I, p. 350.

L'état de combinaison s'opère ensuite avec la même facilité, d'où il suit que le fer doux acquiert promptement un haut degré de magnétisme, mais qui est moins durable, au lieu que l'acier, beaucoup plus difficile à aimanter, conserve aussi plus long-temps sa vertu; et c'est pour cette raison que les barreaux d'acier sont seuls employés pour faire les aimans artificiels.

Nous conservons de petits barreaux d'acier de 5 centimètres (près de 2 pouces) de longueur, qui ont été aimantés il y a environ 50 ans, et qui agissent sensiblement par attraction et par répulsion sur une aiguille de boussole, à la distance de 11 centimètres (environ 4 pouces). D'une autre part, nous avons trouvé que des clefs et autres instrumens du même genre, qui avaient acquis l'action polaire par la méthode du double contact, que nous ferons bientôt connaître, la conservaient encore en partie au bout d'un mois et davantage, ce qui prouve que le magnétisme du fer doux n'est pas aussi fugitif qu'on aurait pu le croire.

Méthode d'aimanter par un seul Contact.

908. Le procédé le plus simple, pour communiquer le magnétisme à une verge de fer ou d'acier, consiste à frotter cette verge avec un barreau aimanté, dont on fait glisser un des pôles dans toute la longueur de la verge, en répétant plusieurs fois cette opération dans le même sens. Supposons que le pôle en contact avec la verge soit le pôle boréal du barreau : l'action de ce pôle attire le fluide austral de la verge, et repousse le fluide boréal; d'où il résulte que la partie de la verge en contact avec le barreau tend sans cesse vers l'état de magnétisme austral, et lorsque le barreau est arrivé à l'extrémité et qu'on le retire, la partie qu'il vient de quitter se trouve dans ce même état de magnétisme.

Le barreau, pendant son mouvement, agissait en même temps de part et d'autre, à une certaine distance, pour repousser le fluide boréal; mais, à mesure qu'il avançait vers l'extrémité qui devait être le terme de son mouvement, il détruisait l'effet de cette action dans les points dont il se rapprochait, et les faisait passer à l'état de magnétisme austral; d'où il suit qu'à la fin de

son mouvement les parties situées jusqu'à une certaine limite, vers l'extrémité qu'il vient de quitter, possèdent le magnétisme austral, et les parties ultérieures, situées vers l'extrémité opposée, ont acquis le magnétisme boréal; et ainsi, lorsque la verge restera ensuite abandonnée à elle-même, les deux fluides, pour satisfaire aux conditions de l'équilibre, s'y distribueront de manière que toute la moitié sur laquelle le barreau aura passé en dernier lieu, possédera le magnétisme austral, et l'autre moitié le magnétisme boréal.

Si l'on fait une nouvelle friction, toujours dans le même sens, elle agira en partie pour diminuer l'effet de la précédente, et en partie pour l'augmenter; et tant que le second effet l'emportera sur le premier, la verge continuera d'acquies. Mais cette augmentation de vertu magnétique sera très limitée, de manière qu'après un petit nombre de frictions la communication du magnétisme s'arrêtera.

Méthode du double Contact.

909. La manière d'aimanter inventée par Michelli, et à laquelle on a donné le nom de *méthode du double contact*, est beaucoup plus avantageuse que la précédente. Pour la mettre en pratique, on prend deux barreaux aimantés R, S (*fig. 19*), que l'on dresse verticalement à une petite distance l'un de l'autre, de manière que leurs pôles opposés A, B se correspondent. On les fait glisser, dans cette situation, d'un bout à l'autre de la verge que l'on veut aimanter, de manière qu'ils vont et viennent alternativement, sans leur permettre de dépasser les extrémités de cette verge; et, lorsqu'après plusieurs frictions les barreaux se retrouvent vers le milieu de la verge, on les enlève suivant leurs directions perpendiculaires à cette verge. Le résultat de cette opération est de mettre chaque extrémité de la verge dans l'état contraire à celui du pôle inférieur du barreau, situé vers cette même extrémité.

910. Pour concevoir l'effet de la méthode dont il s'agit, considérons d'abord ce qui se passe dans la partie de la verge qui ré-

pond à l'intervalle entre les centres d'actions a' et b' des pôles inférieurs, les seuls qui influent, d'une manière bien sensible, sur le résultat : il est facile de voir que chacune des molécules de fluide austral, telle que x , renfermée dans cette partie intermédiaire, est attirée, de gauche à droite, par le centre d'action boréal b' , et repoussée, dans le même sens, par le centre d'action austral a' . Chaque molécule m de fluide boréal est attirée, au contraire, de droite à gauche par le centre a' , et repoussée, dans la même direction, par le centre b' . Ces effets sont contrariés, jusqu'à un certain point, par les actions que les barreaux exercent sur les parties ultérieures; par exemple, le barreau S repousse vers la droite les molécules de fluide boréal qui sont derrière lui, au lieu qu'il repousse, de droite à gauche, celles qui sont en avant, dans l'intervalle entre les centres. Mais la première répulsion est détruite, en grande partie, par l'attraction contraire de l'autre barreau R sur les mêmes molécules; en sorte que, tout compensé, l'opération tend sans cesse vers son but, qui est, en général, de produire le magnétisme austral dans toute la moitié de la verge située à droite, et le magnétisme boréal dans la moitié opposée. La précaution que l'on prend d'enlever les barreaux du milieu de la verge, à la fin de l'opération, sert à favoriser la distribution symétrique des fluides dans les deux moitiés de cette verge abandonnée à elle-même.

911. Il se présente ici une considération relative à la distance requise entre les barreaux, pour que leurs actions aient la plus grande influence possible sur l'effet principal, c'est-à-dire, sur celui qui est produit dans l'espace que ces barreaux interceptent. La détermination de cette distance dépend de la quantité dont les centres d'action a' , b' sont élevés au-dessus du barreau $A'B'$, qui reçoit le magnétisme. Pour concevoir ceci, supposons que les barreaux étant à une distance quelconque l'un de l'autre, leurs centres d'action se trouvent en a et en b (*fig. 20*), et que $A'B'$ soit toujours le corps qu'il s'agit d'aimanter. Bornons-nous à considérer, pour plus de simplicité, l'action répulsive du centre b sur une molécule m du fluide boréal renfermé dans le barreau $A'B'$. Cette action étant dirigée obliquement, par rapport à la

longueur de ce barreau, qui est le sens suivant lequel le fluide doit être poussé pour arriver en B' , elle se décompose en deux autres actions, l'une suivant bp perpendiculaire sur $A'B'$, et qui est nulle par rapport à l'effet proposé; l'autre suivant br , menée parallèlement à $A'B'$ jusqu'à la rencontre de mr , perpendiculaire sur la ligne de jonction des centres; et cette seconde force contribue seule au mouvement de la molécule vers B' .

Or, d'une part, la ligne br augmente, à mesure que l'angle bma est plus ouvert, ou, ce qui revient au même, à mesure que les deux barreaux sont plus éloignés l'un de l'autre; mais en même temps l'intensité de l'action de b diminue, à raison d'une plus grande distance entre ce centre et la molécule m . Supposons cette distance nulle, l'action représentée par br s'évanouira; supposons, au contraire, la distance infinie, l'intensité de la force de b deviendra zéro à son tour. Il y a donc, par rapport à l'angle bma , une certaine mesure moyenne qui donne, pour la force réelle, la plus grande valeur possible. *Æpinus*, qui supposait que l'action des forces magnétiques suivait la raison inverse de la simple distance, avait trouvé que l'angle bma était droit dans le cas du *maximum*; mais, si l'on rétablit la véritable loi, savoir, celle qui suit la raison inverse du carré de la distance, on aura $70^{\text{d}} 31' 44''$ pour la valeur de l'angle dont il s'agit (1).

912. Supposons, par exemple, que les barreaux dont on se sert

(1) Représentons la force oblique suivant bm par la partie om de cette ligne, et menons og parallèle à br ; og sera la quantité dont il faut chercher le *maximum*. Soit $br = x$, et $rm = a$, et soit z en général le nombre qui indique le degré de la puissance relative à la loi de l'attraction ou de la répulsion.

Nous aurons $om = \frac{1}{(bm)^z}$. De plus, om , ou bien $\frac{1}{(bm)^z} : og :: bm : x$. Donc

$og = \frac{x}{(bm)^{z+1}} = \frac{x}{(a^2 + x^2)^{\frac{z+1}{2}}}$, quantité dont la différentielle égale à

zéro, donne $x = \pm \frac{a}{\sqrt{z}}$.

Si l'on fait $z = 1$, on a $x = a$, ce qui conduit au résultat d'*Æpinus*. Si l'on fait $z = 2$, conformément à la véritable loi, on trouve $a : x :: \sqrt{2} : 1$, d'où l'on déduit l'angle dont nous avons parlé.

soient dans le même état que le fil d'acier dont nous avons parlé plus haut (894), qui avait $67^{cent.},5$ de longueur, et dans lequel les centres d'action étaient à $22^{mil.},5$ des extrémités; il faudra, pour obtenir le *maximum* d'action, placer les barreaux à la distance respective de 32 millimètres.

La même Méthode perfectionnée.

913. Æpinus a employé la méthode du double contact par un procédé différent, qui consiste à incliner les barreaux en sens contraire, comme on le voit (*fig. 21*), en sorte que chacun d'eux fasse un petit angle d'environ 15 ou 20 degrés avec le barreau A' B'. Il se fondait sur ce que l'on gagne deux choses dans cette manière d'opérer: d'abord, les centres d'action $a' b'$, qui étaient élevés d'une certaine quantité au-dessus de la surface du barreau A' B', quand les barreaux qui agissaient sur celui-ci avaient une position verticale, se trouvent beaucoup plus près de lui, et leur action en est plus efficace. En second lieu, l'intervalle entre les centres d'action étant considérablement augmenté, en conséquence de l'angle très ouvert que les barreaux font entre eux, cette nouvelle circonstance recule les limites entre lesquelles était resserré l'effet des forces conspirantes, et seconde d'autant mieux l'activité de ces forces.

914. Mais ces avantages étaient balancés, jusqu'à un certain point, par l'inconvénient qu'avait l'opération de produire souvent, dans le barreau A' B', des points conséquens, dont l'action, quoique peu sensible, ne devait cependant pas être négligée, surtout lorsqu'il s'agissait des aiguilles de boussole, dont la perfection tient en partie à l'unité de leurs pôles. Pour concevoir l'inconvénient dont il s'agit, supposons que les barreaux AB, en se mouvant de A' vers B', soient parvenus au milieu du barreau A' B'. Soit rz une perpendiculaire abaissée du centre d'action de A sur ce dernier barreau. Une molécule s de fluide boréal, située à la droite de cette perpendiculaire, est fortement sollicitée à s'en approcher, en vertu de l'action des deux barreaux AB; mais en même temps une molécule s' du même fluide, située à la gauche de la

même perpendiculaire, est attirée en sens opposé; et cette action n'est plus sensiblement détruite par la force contraire du centre b' , comme dans le cas où les barreaux AB sont situés verticalement. Or, il peut arriver que le fluide s, s' se soit tellement accumulé dans l'espace qu'il occupe, que lorsqu'ensuite les deux barreaux continueront leur mouvement, la force coercitive du barreau $A'B'$ ne leur permette de refouler vers B' qu'une partie du même fluide. Il se formera donc dans l'espace ss' un pôle boréal qui, à son tour, pourra faire naître un pôle austral dans l'espace voisin, situé vers B' , ce qui introduira dans cet espace une espèce de force perturbatrice, par rapport à celle de l'extrémité B' .

Pour parer à cet inconvénient, Coulomb, après avoir posé les deux barreaux AB sur le milieu du barreau $A'B'$, en les inclinant comme faisait Æpinus, les tire en sens contraire l'un de l'autre, jusqu'à une petite distance de l'extrémité la plus voisine, puis recommence, en partant toujours du milieu. De cette manière, les forces des centres a' et b' étant plus divisées, sans cesser d'être conspirantes, ne produisent plus ces accumulations de fluide d'où résultent les points conséquens.

Moyen d'aimanter fortement deux Barreaux d'acier.

915. Il est important, pour le succès de l'opération que nous venons de décrire, d'avoir en sa disposition deux barreaux doués d'une puissante vertu magnétique. Or, c'est à l'aide de la méthode elle-même que l'on peut se les procurer. Pour y parvenir, on en prend quatre, égaux et semblables, dont deux au moins doivent avoir un commencement de magnétisme. On dispose les deux autres parallèlement entre eux, comme M, N (*fig. 22*), et l'on applique contre leurs extrémités deux parallépipèdes T, T de fer doux, de manière que l'ensemble présente la figure d'un rectangle. On se sert ensuite des deux barreaux R, S qui sont déjà dans l'état magnétique, pour communiquer la même vertu à l'un

des premiers barreaux, tel que *M*, en employant la méthode d'Æpinus, ou, si on l'aime mieux, celle de Coulomb. Ce barreau acquiert des pôles dont les positions sont indiquées sur la figure, et déjà l'autre barreau *N*, en vertu de la communication qui s'établit entre lui et le barreau *M*, par l'intermède des contacts, reçoit lui-même un commencement de magnétisme; et il est facile de concevoir que chacun de ses pôles correspond au pôle contraire du barreau *M*, comme on le voit encore sur la figure. Après un certain nombre de frictions, on retourne le barreau *M*, sans changer la disposition de ses pôles, et l'on répète l'opération sur l'autre face. On fait des frictions semblables successivement sur les deux faces du barreau *N*, en observant de renverser les positions des pôles des barreaux *R*, *S*, parce que ceux du barreau *N* sont eux-mêmes situés en sens contraire des pôles du barreau *M*. Cette opération terminée, on substitue les barreaux *R*, *S* aux barreaux *M*, *N*, et l'on se sert de ces derniers pour augmenter la vertu des autres. Lorsqu'on jugera que la communication du magnétisme est parvenue à son dernier degré, on emploiera de préférence les barreaux qui auront reçu les dernières frictions, pour aimanter des aiguilles d'acier et d'autres corps de la même espèce.

On seconde l'effet de cette opération, en y faisant concourir les deux autres barreaux comme moyens auxiliaires. On dirige alors ces barreaux sur une même ligne, comme on le voit *fig. 23*, à une distance moindre que la longueur de l'aiguille que l'on veut aimanter, et l'on donne à celle-ci une position *ab* qui répond à l'intervalle entre les deux barreaux, de manière qu'elle repose sur eux par ses extrémités.

Si les barreaux *M*, *N* (*fig. 22*) avaient déjà un certain degré de magnétisme, il est évident qu'il faudra les placer d'avance dans les positions respectives analogues à celles que représente la figure, où les pôles de différens noms se répondent du même côté.

916. Supposons que, par un moyen quelconque, les barreaux *M*, *N* soient maintenus dans une position invariable, par rapport à eux-mêmes et à l'un des contacts *T*; et qu'ayant suspendu ver-

ticalement cet assemblage, de manière que le point d'attache soit du côté du contact fixe, on place à l'endroit de l'autre contact une pièce de fer doux, garnie inférieurement d'un crochet, comme celle qui est en dessous de l'aimant PS (*fig. 24*). On pourra, en suspendant différens corps à ce crochet, évaluer le poids que l'aimant est capable de porter en vertu de sa force attractive. C'est sur ce principe que sont construits les aimans artificiels; toute la différence consiste en ce que l'on substitue aux barreaux M, N (*fig. 22*) deux faisceaux de lames d'acier, que l'on a d'abord aimantées séparément, et que l'on a ensuite réunies de manière que, dans, chaque faisceau, elles fussent contiguës par les pôles de même nom. Coulomb a fait exécuter de ces aimans, qui pesaient environ dix kilogrammes, ou vingt livres, et dont la force était équivalente à un poids d'environ cinquante kilogrammes, ou cent livres (1). Dans les petits aimans, le rapport s'accroît entre le poids de l'assemblage et celui de la charge. Ingen-Housz cite un de ces derniers qui portait plus de cent fois son propre poids, et ajoute que M. Knigt lui avait dit qu'on pouvait aller beaucoup au-delà (2).

Des Armures.

917. Les aimans naturels que l'on soumet à l'expérience dans l'état où ils étaient, en sortant du sein de la terre, ne manifestent communément qu'un médiocre degré de magnétisme, qui est même susceptible de s'affaiblir par succession de temps. On a conçu l'idée heureuse de leur associer des lames de fer doux nommées *armures*, qui étant soumises continuellement à l'action des pôles auxquels elles sont appliquées, exercent sur ceux-ci une réaction capable non-seulement de leur conserver leur vertu, mais même de la faire croître dans un grand rapport.

918. Avant d'armer un aimant, on le taille en parallélépipède restangle PS (*fig. 24*) de manière que si l'on conçoit un plan qui

(1) Mémoires de l'Académie des Sciences ; 1789, p. 505.

(2) Nouv. Expér. et Observ. sur divers objets de Physique, t. I, p. 329.

passé à égale distance de deux faces opposées, parallèlement à ces mêmes faces, les deux moitiés interceptées par ce plan seront dans deux états différens de magnétisme, comme celles d'un barreau aimanté. Chaque armure fh ou $f'h'$, a la forme d'une équerre dont une des branches f, f' , qui est plus longue que l'autre, et que l'on nomme *la jambe* de l'armure, s'applique contre une des faces dont nous venons de parler; et l'autre branche h, h' qui est *le pied* de l'armure, s'applique contre la face adjacente, que l'on peut considérer comme la base du parallélépipède. L'armure ne recouvre cette base que sur un espace de quelques millimètres de longueur.

19. Analysons maintenant l'effet de l'armure qui répond, par exemple, au pôle B de l'aimant. La force de ce pôle agit pour décomposer le fluide naturel de l'armure; elle attire le fluide austral dans les parties de l'épaisseur de l'armure les plus voisines de l'aimant, et repousse le fluide boréal dans les parties les plus éloignées; et comme elle agit beaucoup plus efficacement sur la jambe f , le fluide austral se portera de préférence dans l'épaisseur de celle-ci, et le fluide boréal sera refoulé en grande partie dans le pied h , tant par l'action de l'aimant, que par la force répulsive mutuelle de ses propres molécules.

Le pied de l'armure acquerra donc l'espèce de magnétisme qui existe dans la partie correspondante de l'aimant, c'est-à-dire, le magnétisme boréal. On prouvera, par un raisonnement semblable, que les effets contraires ont lieu relativement à l'autre armure.

Or la jambe agit à son tour par un magnétisme austral, sur le pôle boréal de l'aimant, pour y attirer de nouveau fluide, et cet effet n'est que faiblement balancé par l'action opposée du pied de l'armure, qui est à une plus grande distance. Par une suite nécessaire, le pied acquerra un surcroît de force, et c'est en général de cette combinaison d'actions réciproques que dépend l'avantage qu'ont les armures, d'ajouter un nouveau degré d'activité à la force que les aimans ont reçue de la nature.

20. La jambe de l'armure doit être d'une certaine épaisseur, que l'on ne pourrait ni diminuer ni augmenter sans inconvénient;

car si elle se trouvait tellement mince, que le pôle adjacent de l'aimant fût capable d'y attirer une nouvelle quantité de fluide, dans le cas où elle serait plus épaisse, elle ne produirait pas tout son effet. D'une autre part, si son épaisseur excédait de beaucoup la limite jusqu'à laquelle peut s'étendre le fluide attiré par le pôle voisin, l'autre fluide repoussé par le même pôle, passant en partie dans le reste de l'épaisseur, y produirait un magnétisme semblable à celui du même pôle, et dont la réaction sur ce pôle s'opposerait à l'effet principal. Il y a donc un certain degré d'épaisseur qui donne, relativement à la jambe de l'armure, le *maximum* de magnétisme contraire à celui du pôle adjacent, et pour le pied, le *maximum* de magnétisme semblable à celui du même pôle. L'artiste qui veut diriger la construction de l'armure vers la plus grande perfection de l'aimant, doit chercher ce degré, auquel on ne peut arriver que par tâtonnement.

5. Du Magnétisme du Globe terrestre.

921. Les phénomènes naturels du magnétisme, comparés à ceux de l'électricité, présentent une des différences les plus tranchées entre les modifications des fluides qui produisent ces deux classes de phénomènes, liés à d'autres égards par des analogies si marquées. Ceux qui appartiennent à l'électricité ne sont bien sensibles que dans des circonstances locales et variables, et prennent ordinairement naissance au milieu des météores, qui n'ont eux-mêmes qu'une existence passagère. Le magnétisme exerce une action universelle et durable, qui se rapporte à des points déterminés, qui ne varie que par un progrès lent et gradué, et qui a son siège dans le globe même que nous habitons. Il est devenu, par sa généralité, un sujet inépuisable d'observations qui se répètent dans toutes les parties des mers; pour lui, tous les navigateurs sont physiciens, et ne cessent de fixer un œil attentif sur cette aiguille que sa présence semble animer, et qui est capable de leur servir de guide jusque dans les pays les plus reculés.

Déclinaison de l'Aiguille aimantée.

922. Avant de faire connaître les opinions des physiciens sur la cause du magnétisme naturel, nous allons exposer ce que l'on a observé par rapport à la position de l'aiguille aimantée. Lorsqu'on dit de cette aiguille qu'elle tourne une de ses extrémités vers le nord, quand elle est librement suspendue, cela n'est vrai que dans un sens général et qui admet un grand nombre de restrictions. Si l'on porte l'aiguille successivement à différens points du globe, il y en aura quelques-uns où sa direction coïncidera exactement avec une ligne tirée du midi au nord, ou avec le méridien du lieu. Mais dans d'autres points, elle s'écartera de cette ligne, tantôt vers l'Orient, tantôt vers l'Occident, et la quantité de l'écartement variera suivant les lieux. On a donné à cette déviation le nom de *déclinaison*.

Pour mesurer la déclinaison, on suppose un plan vertical qui passe par la direction de l'aiguille. Le cercle qui coïncide avec ce plan, s'appelle *méridien magnétique* (873), et l'angle formé par ce méridien avec le méridien terrestre qui appartient au même lieu, est l'*angle de déclinaison*.

Inclinaison.

923. L'aiguille est sujette à une autre espèce de déviation. Supposons qu'étant en équilibre sur son pivot, avant d'être aimantée, elle se trouvât située dans un plan exactement parallèle à l'horizon : dès qu'elle aura reçu la vertu magnétique, elle prendra une position plus ou moins inclinée par rapport à ce plan, excepté à certains endroits de la terre. On a donné à cette seconde déviation le nom d'*inclinaison*.

Variation dans la Déclinaison.

924. Si l'on part de l'un des endroits où la déclinaison est nulle, et qu'on s'avance vers le nord ou vers le sud, on pourra

passer par une suite de points où elle sera pareillement nulle; mais ces points ne se trouveront pas sur un même méridien : ils formeront une courbe irrégulière, qui aura des inflexions en différens sens:

925. Halley est un des premiers qui ait entrepris de tracer sur une mappemonde ces suites de points où la déclinaison est zéro, et que l'on a appelées *bandes sans déclinaison*.

On a observé jusqu'ici trois bandes sans déclinaison, qui ont été suivies, par les marins jusqu'à des latitudes plus ou moins considérables.

926. Mais de plus, la déclinaison varie avec le temps dans un même lieu, et ses variations ne croissent point dans le même rapport que le temps; en sorte que les bandes sans déclinaison changent continuellement et de position et de figure. A Paris, la déclinaison était nulle en 1666; le 12 floréal an 10, c'est-à-dire, 136 ans après cette première époque, Bouvard l'a trouvée de 22^d 3' vers l'ouest.

927. Il arrive aussi quelquefois que la déclinaison subit des interruptions, en sorte que l'aiguille reste sensiblement stationnaire pendant un certain temps : par exemple, l'aiguille ne fit aucun mouvement à Paris, depuis 1720 jusqu'en 1724, et, durant cet intervalle, elle se tint constamment à 13^d du méridien.

928. L'observation prouve encore que les variations de la déclinaison comparées entre elles, à divers points du globe, suivent des rapports différens. Mais un fait très digne d'attention, est celui qui a été remarqué par le célèbre Hallé, à la simple inspection de la table de déclinaison publiée par Van-Swinden auquel ce même fait avait échappé. Dans cette table, on distingue trois endroits où l'aiguille a subi les plus grandes déclinaisons, et qui sont situés, 1^o. au milieu de la mer des Indes, à 10 et 15^d de latitude méridionale, et à 82 et 87^d de longitude orientale, en partant de l'île de Fer : dans cet endroit, la variation a été de 11^d à 11^d 15' depuis 1700 jusqu'à 1756; 2^o. dans l'Océan Ethiopique, depuis 5^d de latitude septentrionale jusqu'à 20^d ou 25^d de latitude méridionale, et dans l'intervalle de 10, 15 et 20^d de longitude orientale; la variation relative à cette

localité a été, entre les mêmes époques, de 10^d à $10^d 45'$ principalement sous la ligne et dans l'étendue de 5^d vers le sud; 3^o . à 50^d de latitude septentrionale et entre 17^d de longitude orientale et 10^d de longitude occidentale. On a eu dans cet endroit, pendant le même espace de temps, une variation de 11^d à $11^d 45'$.

Or, en considérant sur la table de Van-Swinden, les trois endroits dont il s'agit, M. Hallé a trouvé qu'ils formaient comme trois centres autour desquels les nombres qui indiquent les quantités de la variation décroissent insensiblement à mesure qu'on s'éloigne de chacun des mêmes centres; de manière qu'il en résulte un nouvel ordre d'observations, qui correspond aux lieux où la variation a été la plus faible pendant le même cours d'années.

Ces lieux sont : 1^o. toute la mer d'Amérique, sans y comprendre le golfe du Mexique, c'est-à-dire, en allant de la pointe orientale de l'Afrique jusqu'à la hauteur de l'île Bermude. Il faut encore remarquer ici que, dans l'Océan, situé entre l'Afrique et l'Amérique méridionale, la grandeur des variations est beaucoup moindre vers les côtes de l'Amérique que vers celles de l'Afrique; 2^o. les environs de l'île de Madagascar, et une partie de la côte de Zanguebar; 3^o. la partie de mer qui est au sud et au sud-est des îles de la Sonde, entre celles-ci et la Nouvelle-Hollande; 4^o. enfin, dans la même mer, vers le 4^e degré de latitude méridionale, et le 97^e degré de longitude orientale; c'est-à-dire, au milieu de l'espace compris entre l'angle occidental de la Nouvelle-Hollande et la pointe méridionale de l'Afrique. Dans tous ces divers lieux, les variations qu'a subies la déclinaison de l'aiguille aimantée, pendant les 66 années dont il s'agit, n'ont pas été en tout à un degré (1).

Si des observations du même genre avaient été faites également dans la mer Pacifique, dans les mers du Nord, dans les mers Australes, et même dans les principales divisions des grandes mers, comme la Baltique, la Méditerranée, le golfe du Mexique, etc., elles auraient offert probablement de semblables points; et l'on sent de quel intérêt serait pour l'étude du magnétisme

(1) Encyclopédie méthodique; médecine, deuxième partie, t. I., p. 418.

naturel un ensemble de faits subordonnés à un certain nombre de centres, autour desquels ils viendraient se ranger suivant l'ordre de leurs rapports.

229. L'aiguille aimantée est sujette de plus, dans certains endroits, à une variation diurne particulière, dont la marche a été suivie par Van-Swinden, avec l'attention et la constance qui caractérisent cet excellent observateur. Telle est, en général, la loi de cette variation, que l'aiguille s'avance vers l'ouest le matin, jusque vers midi, ou peu après midi, pour reculer ensuite vers l'est dans la soirée.

Ce double mouvement est sujet à quatre modifications. La première a lieu lorsque l'aiguille s'avance progressivement, dans toute la matinée, vers l'ouest, jusqu'au *maximum*, et revient ensuite, par un seul trajet, vers l'est pendant la soirée, en achevant une période unique représentée par O, E. Dans la seconde modification, l'aiguille s'approche d'abord un peu de l'est le matin; et, à ce petit mouvement, succède la période ordinaire, en sorte que sa marche est alors représentée par e, O, E. La troisième modification est celle où la période ordinaire est suivie, vers la fin de la soirée, d'un petit mouvement vers l'ouest; ce qui donne, pour l'expression du mouvement total, O, E, o. Enfin, la quatrième modification participe de la seconde et de la troisième, et son expression est e, O, E, o (1). L'aiguille fait donc ainsi continuellement de petites oscillations, dont tel est le résultat général, que la somme des mouvemens qui ont lieu vers l'ouest l'emporte sur celle des mouvemens en sens contraire, de manière que la déclinaison va en augmentant du même côté.

230. Ce n'est pas tout encore, et ces variations qui, au milieu de leur inconstance, ont, jusqu'à un certain point, une marche suivie et réglée, sont sujettes à des espèces d'anomalies subites et fugitives, qui portent visiblement le caractère d'une cause perturbatrice. Aussi les marins ont-ils désigné ces anomalies sous le nom d'*affollemens*; et, lorsqu'ils les aperçoivent, ils disent

(1) Recueil de Mémoires sur l'Analogie de l'Electricité et du Magnétisme, par Van-Swinden, t. III, p. 4 et suiv.

que l'aiguille est *affolée* (1). On a remarqué que l'aiguille est quelquefois agitée par un temps d'orage, et souvent, lorsqu'il paraît une aurore boréale (2). Mais on n'a point déterminé jusqu'ici l'influence immédiate de ces phénomènes, considérés comme causes des affollemens de l'aiguille.

Variations dans l'Inclinaison.

931. L'inclinaison de l'aiguille a aussi ses variations, qui sont surtout sensibles lorsqu'on change de latitude. Elle est nulle à peu près à l'équateur, de manière que tous les points où l'aiguille est exactement parallèle à l'horizon, forment une courbe qui coupe l'équateur sous de petits angles, et à laquelle on a donné le nom d'*équateur magnétique*. A mesure que l'on s'écarte de cette courbe, en allant vers un pôle ou vers l'autre, l'inclinaison va en augmentant, de sorte que l'extrémité de l'aiguille qui regarde le pôle voisin s'abaisse continuellement en dessous de sa première position. La plus grande inclinaison dont on ait encore parlé est de 82^{d} , et a été observée par Phipps à $79^{\text{d}} 44'$ de latitude méridionale, et 13^{d} de longitude. L'inclinaison était, à Paris, de 71^{d} en 1787; elle varie aussi avec le temps dans un lieu donné. On en corrige l'effet, au moins pour un certain nombre d'années et relativement à un même point du globe, en rendant inégaux les poids des deux moitiés de l'aiguille, dans le rapport nécessaire, pour que la force qui tire par en bas un des côtés de cette aiguille, soit compensée par l'excès de pesanteur de la partie opposée, de manière que l'aiguille prenne une position horizontale.

(1) Recueil de Mémoires sur l'Analogie de l'Electricité et du Magnétisme, par Van Swinden, t. III, p. 2 et suiv.

(2) *Même ouvrage*, t. I, p. 466, et t. III p. 187 et suiv.

Variations dans l'Intensité des Forces qui agissent sur l'aiguille.

932. Outre ces deux grandes classes de phénomènes, dont les uns appartiennent à la déclinaison et les autres à l'inclinaison, il en est une troisième qui comprend les variations que subit l'intensité des forces magnétiques qui sollicitent l'aiguille, suivant la diversité de ses positions relativement au globe terrestre. Les observations du célèbre Humboldt ont dévoilé, à cet égard, un fait très remarquable, qui consiste dans l'accroissement que prend cette intensité des forces magnétiques, en allant de l'équateur vers les pôles (1).

M. De Humboldt, avant de partir de Paris pour le grand voyage dont il a rapporté une récolte de connaissances relatives à la Physique, non moins précieuse que celle dont l'Histoire naturelle lui est redevable, avait soumis à l'expérience une boussole qui donnait 245 oscillations en dix minutes. La même boussole n'en a plus donné que 211 au Pérou, pendant un temps égal, et la marche générale de ses oscillations a toujours varié de la même manière, en sorte que leur nombre diminuait ou augmentait, suivant que l'on s'approchait de l'équateur ou qu'on s'en éloignait.

M. De Humboldt a souvent fait osciller l'aiguille dans deux plans différens ; savoir : dans celui du méridien magnétique du lieu, et dans un plan perpendiculaire à ce méridien. D'une autre part, il avait observé chaque fois l'inclinaison de l'aiguille. Depuis le retour de ce savant voyageur, M. de Laplace a proposé un moyen de déterminer, à l'aide du calcul, l'inclinaison de l'aiguille, en partant des observations relatives à l'oscillation. Il suffit, pour cela, de décomposer la force qui a lieu dans le sens perpendiculaire au méridien magnétique, et de comparer la partie de cette force,

(1) Mémoires de MM. Humboldt et Biot, sur les variations du Magnétisme terrestre à différentes latitudes ; Journal de Physique, frimaire an XIII, p. 24) et suiv.

dont l'action s'exerce sur l'aiguille, avec la force totale relative au plan dont nous venons de parler. On a ainsi deux données qui conduisent à la solution du problème. Or, la conformité qui règne entre l'inclinaison calculée et celle qui a été trouvée directement, garantit la justesse des observations de M. de Humboldt sur l'intensité des forces magnétiques.

933. Les actions de ces forces ne s'étendent pas seulement à tous les points de la surface du globe terrestre; elles se propagent encore dans l'espace environnant; et des expériences faites par des observateurs aussi éclairés qu'attentifs démontrent le peu de fondement de l'opinion émise par quelques physiciens, que l'intensité des forces magnétiques devenait insensible à une certaine hauteur au-dessus de la surface du globe. Dans le voyage aérostatique entrepris par MM. Biot et Gay-Lussac (498), ces deux savans ont trouvé que le nombre d'oscillations faites par l'aiguille aimantée, au haut des airs, dans un temps donné, ne différait pas sensiblement de celui qui avait eu lieu à la surface de la terre. Ce résultat a été confirmé depuis, dans un nouveau voyage où M. Gay-Lussac était seul, et où il est parvenu à une élévation de 7,016^{mètres}, ou 3,600^{toises} au-dessus du niveau de la mer, c'est-à-dire, au point le plus haut que l'homme eût encore atteint, en voyageant soit sur les montagnes, soit dans les régions aériennes. Une aiguille aimantée faisait alors à peu près 10 oscillations en 42 secondes, comme avant le départ de l'observateur (1). Ainsi, tout nous porte à croire que la force magnétique se répand indéfiniment dans l'espace, et sans doute elle y subit des décroissemens qui deviendraient sensibles à un certain terme, s'il nous était donné d'y arriver.

(1) Journal de Physique; frimaire au XIII, p. 457.

*De la détermination des centres d'action
magnétique du globe.*

934. Tout ce qui précède confirme de plus en plus l'idée qui s'était offerte depuis long-temps aux physiciens; savoir, que le globe fait la fonction d'un véritable aimant; et les variations que subit l'aiguille, surtout relativement à son inclinaison, qui a lieu dans des sens opposés, sur les espaces compris entre l'équateur magnétique et les pôles, indiquaient l'existence de deux centres d'action situés de part et d'autre du centre de cet équateur. Mais cette idée une fois admise, combien de recherches laborieuses et délicates il restait à faire, pour la suivre dans ses applications aux différens phénomènes du magnétisme; pour saisir, au milieu de tous ces dérangemens qui compliquent la marche de l'aiguille aimantée, des lois susceptibles d'être exprimées à l'aide du calcul; enfin pour démêler les circonstances où les actions de ces lois se montrent dans toute leur pureté, de celles où les influences de diverses causes particulières, en s'associant à ces mêmes actions, les modifient par des espèces de perturbations locales et passagères!

Nous allons essayer de donner une idée du but vers lequel doivent être dirigées les recherches relatives à ce sujet. Supposons d'abord un fil magnétique OL (*fig. 25*), qui ait ses deux centres d'action en B et en A , et imaginons que l'on place au-dessus de ce fil une aiguille aimantée ab , suspendue librement. D'après ce qui a été dit plus haut (886), telle sera la direction que prendra cette aiguille, qu'elle coïncidera avec un plan vertical qui passerait par l'axe du fil magnétique. De plus, dans le cas représenté par la figure, l'aiguille s'inclinera par son pôle austral a vers l'extrémité O du fil magnétique, la plus voisine du pôle boréal B de ce fil.

935. Considérons maintenant les actions que le fil exerce sur l'aiguille pour produire cette inclinaison, et bornons-nous à celle qui ont lieu l'une par rapport à une molécule de fluide austral située en α , et l'autre à l'égard d'une molécule de fluide boréal située

en b . La première est attirée dans le sens aB par le pôle boréal B , et repoussée suivant Aa par le pôle austral A . Représentons la quantité de l'attraction par as , et celle de la répulsion par ar situé sur le prolongement de Aa , puis terminons le parallélogramme $arbs$, la molécule tend, en vertu des deux forces qui la sollicitent, à se mouvoir suivant la diagonale ab de ce parallélogramme. À l'aide d'une construction semblable, nous pourrions représenter l'attraction que le pôle A exerce sur la molécule boréale située en b , par une certaine partie bx de la ligne bA , et la répulsion du pôle B par bg prise convenablement sur le prolongement de Bb . Donc, si nous complétons de même le parallélogramme $bghx$, le mouvement de la molécule de fluide boréal se fera suivant la diagonale bh , qui différera sensiblement de l'autre diagonale ab , soit par sa direction, soit par sa longueur, et l'inclinaison de l'aiguille passera par la résultante commune des deux diagonales.

937. Ce que nous venons de dire suppose que la longueur de l'aiguille ait un rapport appréciable avec celle du fil OL , comme cela a lieu dans les expériences magnétiques ordinaires. Mais si nous voulons maintenant ramener le système d'actions que présentent les expériences dont il s'agit, à celui qui résulte du magnétisme naturel, nous devons concevoir que ces actions s'exercent à des distances presque infinies en comparaison de celle qui existe entre les deux pôles a et b d'une aiguille magnétique, en sorte que les deux lignes Ba , Bb , ou Aa , Ab , qui représentent les directions des forces d'un même pôle B ou A , sont censées se confondre; par une suite nécessaire, on a $bg=as$, et $bx=ar$.

Cela posé, soit GPK (*fig. 26*), la circonférence d'un des méridiens magnétiques, GK l'axe de l'équateur magnétique, et B , A , les deux centres d'action du globe situés sur cet axe à des distances égales du milieu C . Une aiguille placée dans un point z voisin de la surface du globe, ayant une longueur presque infiniment petite à proportion de sa distance à chaque centre d'action B ou A , l'effet des forces exercées par ces centres pour diriger l'aiguille sera le même que si toutes les molécules boréales du fluide de cette aiguille étaient concentrées dans deux points a , b , cou-

tigus en z . Or, dans cette hypothèse, les diagonales ak et bk , dont l'une représente le mouvement du fluide austral de l'aiguille, et l'autre celui de son fluide boréal, sont égales et situées sur une même direction; et il est visible que cette direction est celle que prendrait une aiguille magnétique suspendue librement. Il suffit donc, pour la déterminer, d'avoir la résultante des deux forces qui s'exercent suivant Bz et Az sur une seule molécule de fluide soit boréal, soit austral.

937. M. Biot, en combinant les observations faites sur l'inclinaison de l'aiguille par le célèbre Humboldt, à différens points du globe, en a déduit, à l'aide du calcul, la conséquence, que les deux centres d'action B, A , sont à une distance infiniment petite du centre C , en sorte que, suivant l'expression de ce savant, on peut les regarder comme placés en quelque sorte dans une même molécule.

Cette distribution ne s'accorde pas avec celle que paraît indiquer une observation faite en 1819 par le capitaine Parry, pendant son voyage dans les régions polaires. Il s'était avancé jusqu'au 74° degré $45'$ de latitude, et se trouvait au-delà du 100° degré de longitude occidentale, lorsqu'il vit la fleur de lis qui terminait d'un côté l'aiguille de boussole dont il se servait, et qui auparavant regardait le nord, se tourner vers le sud, ce qui prouvait, selon la remarque de ce navigateur, que l'on était alors au nord du pôle magnétique du globe (1).

Cette conséquence est analogue à celle qui se tire du résultat d'une expérience que nous avons citée plus haut (895), et dans laquelle on fait avancer une aiguille de boussole vers une des extrémités d'un barreau magnétique, suivant une direction parallèle à l'axe de ce barreau. Arrivée à un certain terme, qui n'est pas éloigné de la même extrémité, elle se retourne, par une suite de ce qu'elle se trouve alors située au-dessus du centre d'action vers lequel son mouvement primitif était dirigé. Ce résultat tendait à faire croire que les pôles magnétiques du globe sont à une

(1) Annales de Chimie et de Physique, t. XV, décembre 1820, p. 435.

grande distance l'un de l'autre, d'après l'opinion qui assimilait l'action de ce globe, au moins dans ce qu'elle offrait de plus général, à celle des aimans ordinaires, et qui semble être confirmée par l'observation du capitaine Parry.

*Egalité des Forces qui tirent en sens contraire
une Aiguille aimantée.*

L'étude du magnétisme naturel a conduit encore les physiciens à d'autres résultats d'observations, qui étant constamment les mêmes dans tous les lieux, ont été pris pour principes, et dont on a fait des applications utiles, surtout dans la construction des boussoles. Parmi ces résultats, nous en choisirons trois qui sont trop remarquables pour être passés sous silence.

938. Lorsqu'une aiguille aimantée est suspendue librement à un fil, son pôle austral est tiré vers le nord, tandis que son pôle boréal est tiré en sens contraire vers le midi; et il est évident que, dans le cas où les deux forces qui agissent sur cette aiguille varieraient par leur intensité, leur résultante étant toujours sur une seule ligne droite, l'aiguille resterait constamment sur cette même ligne. Mais, de plus, l'observation prouve que les deux actions qui tirent l'aiguille dans deux sens opposés sont sensiblement égales, quel que soit le point de la terre où se trouve l'aiguille. C'est la conséquence nécessaire d'une expérience de Bouguer qui, ayant suspendu à un fil par le milieu, une aiguille non aimantée, auquel cas la direction du fil était verticale, puis ayant aimanté l'aiguille, observa que le fil conservait son aplomb. Coulomb a tiré la même induction, de ce que le poids d'une aiguille aimantée restait le même qu'avant l'opération qui avait produit le magnétisme. On voit effectivement, que si l'une des deux actions l'emportait sur l'autre, son excès pourrait être considéré comme une force particulière, dont la direction faisant un angle avec celle de la pesanteur, déterminerait un mouvement composé, en sorte que l'aiguille n'exercerait pas sur la balance la même pression que quand elle n'était pas encore aimantée.

939. La raison de cet effet est facile à saisir d'après ce que

nous avons dit plus haut (936), que les pôles magnétiques B, A, du globe terrestre étant censés agir sur une aiguille placée en z (fig. 27), à des distances qui sont comme infinies relativement à la longueur de cette aiguille, les diagonales ak et bh , dont la première représente le mouvement du fluide austral de l'aiguille et la seconde le mouvement en sens contraire du fluide boréal, sont égales et situées sur une même direction. Car il suit de là évidemment que l'aiguille, dont la position coïncide avec la ligne kh , a ses deux pôles également tirés en sens opposés.

Force directrice de l'Aiguille.

940. Maintenant, pour faire concevoir en quoi consiste le second résultat, supposons qu'ayant dérangé une aiguille de la position qu'elle avait dans son méridien magnétique, on l'abandonne ensuite à elle-même; elle tendra aussitôt à reprendre sa première position, et cette tendance sera l'effet des différentes forces qui, à ce moment, agissent dans des sens obliques à la longueur de l'aiguille. Or, on peut, en les supposant décomposées, leur substituer une seule force perpendiculaire à l'aiguille, et appliquée à un point situé entre le milieu de cette aiguille et l'extrémité qui regarde le pôle dont elle est plus voisine. Cette force est ce qu'on appelle la *force directrice de l'aiguille*, et l'observation fait voir qu'elle est proportionnelle au sinus de l'angle que fait l'aiguille dérangée de sa direction naturelle avec cette direction elle-même.

941. Coulomb est parvenu à ce résultat par un moyen analogue à celui qu'il avait employé pour déterminer la force électrique mise en équilibre avec la force de torsion d'un fil métallique très délié (607). Nous rappellerons ici que, toutes choses égales d'ailleurs, la force de torsion est proportionnelle à l'angle de torsion, ou au nombre de degrés que parcourt un point quelconque pris sur la surface du fil, tandis que l'on tord celui-ci. Cela posé, l'aiguille étant d'abord librement suspendue à un fil métallique exempt de toute torsion, Coulomb imprime à ce fil une torsion d'un certain nombre de degrés; alors l'aiguille s'écarte de son

méridien magnétique, jusqu'à ce que la force directrice qui tend à l'y ramener soit en équilibre avec la force de torsion. L'observateur mesure l'angle que fait alors l'aiguille avec sa première direction, puis il augmente la torsion d'un certain nombre de degrés. L'aiguille, dans ce cas, s'écarte encore davantage de son méridien magnétique, et en même temps la force directrice qui tend à l'y faire revenir se trouve augmentée, parce que les forces dont elle est la résultante agissent suivant des directions moins obliques à la longueur de l'aiguille. La torsion terminée, l'aiguille prend de nouveau la position sous laquelle sa force directrice se trouve encore en équilibre avec la force de torsion, qui est mesurée par la première torsion, plus l'accroissement qu'elle a reçu. Or, on trouve que les nombres de degrés qui mesurent les deux torsions sont proportionnels aux angles que faisait l'aiguille avec sa première direction, dans les deux positions qui ont donné l'équilibre.

942. Le troisième résultat n'est qu'un corollaire du précédent. Quelles que soient les directions des forces réelles qui agissent sur les différens points d'une aiguille, pour la ramener à son méridien magnétique lorsqu'elle en a été écartée, on peut toujours supposer à ces forces une résultante parallèle au méridien magnétique; et il est facile de concevoir que cette résultante doit passer par un point placé dans la moitié de l'aiguille qui répond au pôle nord du globe, si l'expérience se fait dans une des contrées boréales, ou au pôle sud, dans le cas contraire. Or, en partant du fait que les forces directrices sont proportionnelles aux sinus des angles d'écartement, on trouve que la résultante, dont nous venons de parler est une quantité constante, qui passe toujours par un même point de l'aiguille.

943. Il est facile de prouver la justesse de cette conséquence. Supposons que nk (*fig. 28*), étant la direction de l'aiguille située dans son méridien magnétique, une force quelconque ait fait prendre à cette aiguille la direction lc ; la force directrice peut être considérée comme une puissance appliquée à l'extrémité f du levier cf . Représentons-la par fz perpendiculaire sur cf ; si par le point f , nous menons fd parallèle à nk , la résultante de toutes

les forces qui agissent sur l'aiguille, estimée parallèlement au méridien magnétique, coïncidera avec fd . Menons par le point z la ligne zd , parallèle à fc , jusqu'à la rencontre de fd , et par le point f le sinus fg de l'angle fc ; le triangle dzf étant semblable au triangle cgf , nous aurons $fg : fz :: cf : df$, ou $\frac{fg}{fz} = \frac{cf}{df}$. Mais le premier rapport est constant, à cause que la force directrice est proportionnelle au sinus de l'angle fc . Donc le second rapport est aussi constant; et puisque cf est le rayon, la résultante df sera pareillement une quantité constante, qui passera toujours par le point f de l'aiguille.

944. Réciproquement, si la résultante de toutes les forces qui agissent sur l'aiguille, prise parallèlement au méridien magnétique, est une constante, quelle que soit la quantité dont l'aiguille ait été écartée de ce méridien, les forces directrices seront proportionnelles aux sinus des angles d'écartement. Or, pour concevoir que la résultante dont il s'agit doit être une constante, il suffit encore de considérer que les pôles magnétiques du globe exercent leurs actions à des distances de l'aiguille qui sont presque infinies. Car, supposons que l'aiguille ab (*fig. 29*), étant d'abord dans la direction $k'h'$, la même que celle qui est représentée (*fig. 26*), on lui fasse prendre une autre direction gu , de manière qu'elle continue de faire le même angle avec l'horizon; imaginons un plan qui passe par les lignes ab, gu (*fig. 29*), et menons par le point g , dans le même plan, la ligne ig , parallèle et égale à ok' , cette ligne ig représentera la résultante des forces qui agissent obliquement sur le point g , pour le ramener vers le point a . Or, la force suivant ig se décompose en deux autres, l'une ip , parallèle à og , et l'autre ie , perpendiculaire sur og . Donc, si nous complétons le parallélogramme $ipge$, la ligne pg représentera la partie de la force ig qui agit directement pour pousser le point g vers le point a . D'une autre part, soit lu , parallèle et égale à ok' , la résultante des forces qui s'exercent obliquement sur le point u , pour le ramener vers b . A l'aide d'une décomposition semblable à la précédente, la ligne ut , perpendiculaire sur ot , représentera

la partie de la force oblique lu , dont l'effet est de pousser le point u vers le point b .

Maintenant, puisque les forces qui agissent sur l'aiguille concourent toutes à la faire tourner dans le même sens, pour la rapprocher de sa première position, nous pouvons les considérer comme étant appliquées au point g de l'aiguille, en doublant, par la pensée, l'intensité des actions suivant ig et ie . Dans cette hypothèse, ig représentera la résultante de toutes les forces qui sollicitent l'aiguille, prise dans un sens parallèle à la direction ab , qui coïncide avec le méridien magnétique, et ie ou pg représentera la force directrice. Or, comme dans tous les changemens de direction que subit l'aiguille, en s'écartant du méridien magnétique, les positions de ses pôles ne varient qu'infinitement peu, eu égard aux distances des pôles magnétiques du globe, il est aisé de voir que la ligne ig est une constante. On peut même déduire immédiatement de la construction qu'offre la figure, la conséquence que les forces directrices sont proportionnelles aux angles d'écartement. Car, si l'on prend ig pour le rayon, relativement à l'angle egi , ou à son égal abg , la ligne ie , qui représentera la force directrice, étant le sinus du premier de ces angles, sera proportionnelle au sinus du second angle, qui mesure la quantité dont l'aiguille est écartée du méridien magnétique.

Différence entre l'Action du Globe et celle d'un Aimant ordinaire, sur une Aiguille magnétique.

945. Ce qui précède peut servir à rendre raison d'une contradiction apparente qu'offre l'action du globe comparée à celle des aimans ordinaires. Si l'on met une aiguille magnétique sur une lame de liège, de manière qu'elle nage à fleur d'eau dans un vase d'une largeur suffisante, et que l'on place à une certaine distance un aimant, même d'une force médiocre, qui regarde le vase par un de ses pôles, l'action de cet aimant produira deux effets. D'abord l'aiguille se dirigera de manière que si c'est le pôle boréal de l'aimant qui se trouve le plus près du vase, elle

tourneras on pôle austral vers cet aimant; et toutes les fois qu'on l'aura dérangée de cette position, elle y reviendra dès qu'on l'abandonnera à elle-même. En même temps elle s'avancera jusqu'au bord du vase, pour se rapprocher de l'aimant le plus qu'il sera possible. Or, si l'on répète cette expérience, par exemple vers le nord, en laissant agir le globe seul sur l'aiguille, il sera, par rapport à cette aiguille, dans le cas d'un aimant dont le pôle boréal exercerait sur elle une action plus forte que celle du pôle austral; aussi l'aiguille se dirigera-t-elle de manière à regarder le nord par son pôle austral, et si l'on change sa direction, elle la reprendra spontanément; mais elle ne fera aucun mouvement vers le nord, et restera stationnaire sur l'eau à l'endroit où elle aura été placée.

946. Cette diversité dans les résultats des deux expériences provient de ce que les centres d'action du globe sont, comme nous l'avons dit, à une distance presque infinie de l'aiguille; d'où il suit que la différence entre les forces qui agissent pour tirer l'aiguille dans deux sens opposés, est sensiblement nulle; et ainsi la tendance de l'aiguille à se porter vers le nord, qui dépend de cette différence, doit pareillement se réduire à zéro. Or, la même chose n'a pas lieu lorsqu'on se sert d'un aimant qui agit sur les deux pôles de l'aiguille à des distances respectives comparables entre elles : alors la différence entre les deux actions devient appréciable, et il en résulte une action boréale qui détermine l'aiguille à s'avancer vers l'aimant. Nous avons vu, d'une autre part, que le globe exerce sur une aiguille magnétique *gu* (*fig. 29*), pour la ramener à sa première direction, des forces conspirantes suivant *ie* et *tu*; et ici la grandeur de la distance n'empêche pas que ces forces ne conservent assez d'intensité pour produire leur effet.

Du Double magnétisme.

947. Le fer, que la main bienfaisante du Dieu qui a créé l'univers a répandu dans le sein de la terre avec une abondance proportionnée aux services qu'il nous rend, étend son existence bien au-delà des mines où il se présente comme de lui-même

pour être approprié à nos usages. Il s'introduit partout, et remplit la nature entière de ses modifications. Il s'unit intimement ou par voie de mélange aux autres métaux. Il est disséminé en grains, ou en particules imperceptibles dans une multitude de pierres. Il fait la fonction de principe colorant dans les marbres, dans les agathes, et dans une grande partie des pierres précieuses, où, combiné avec différentes quantités d'oxygène, il parcourt tous les degrés de l'échelle du spectre solaire.

948. Les physiciens et les minéralogistes emploient avec avantage, pour reconnaître sa présence, lorsqu'elle échappe aux yeux, ou est masquée par l'oxidation, l'action d'un petit barreau magnétique monté sur un pivot, en profitant de la propriété qu'il a de faire servir le fer à se décèler lui-même. Nous préférons à ce barreau une aiguille en forme de losange, comme étant plus mobile et plus sensible à l'action du fer.

949. Mais l'usage de cette aiguille est limité, et même plus que dans le cas où l'aiguille resterait abandonnée à ses seules forces. Deux causes diminuent sa tendance naturelle pour obéir à l'action des corps qu'on lui présente. L'une est la résistance produite par le frottement qui a lieu au point de suspension; l'autre, dont l'influence est plus sensible, dépend de l'action que la force magnétique du globe exerce sur l'aiguille pour la maintenir dans sa direction, et qui se manifeste par le mouvement que fait cette aiguille pour reprendre sa première position toutes les fois qu'on l'en a écartée. On peut rendre l'effet de la première cause presque nul, en suspendant l'aiguille sur un pivot terminé par une pointe très délicate; mais l'effet de l'autre cause subsistera encore: et si la quantité de fer contenue dans le corps soumis à l'expérience est si petite ou tellement chargée d'oxygène, que son action soit inférieure à la force qui maintient l'aiguille dans sa position, celle-ci restera immobile.

950. En réfléchissant sur ces effets, nous avons conçu l'idée de diminuer tellement la force qui s'oppose au mouvement de rotation de l'aiguille, qu'elle fût incapable de dérober celle-ci à l'action de quelques particules de fer qui, dans une expérience faite à l'ordinaire, seraient comme si elles n'existaient pas. L'exposé

faite à l'ordinaire, seraient comme si elles n'existaient pas. L'exposé du moyen à l'aide duquel nous avons rempli ce but, nous paraît mériter d'autant mieux de trouver ici sa place, qu'il a ajouté un nouveau phénomène à ceux qu'avait offerts jusqu'alors le magnétisme, et donné un nouveau développement à leur théorie. Soit *mr* (*fig. 30*) l'aiguille suspendue sur son pivot, auquel cas elle tournera son pôle austral *a* vers le nord et son pôle boréal *b* vers le sud. Nous disposons à une certaine distance de l'aiguille, et au même niveau, d'un côté ou de l'autre, par exemple vers le midi, un barreau aimanté *MR*, dont la direction approche, autant qu'il est possible, d'être sur le prolongement de celle de l'aiguille, et dont les pôles *A, B*, soient renversés à l'égard des siens. Nous faisons avancer ensuite doucement le barreau vers l'aiguille. A un certain terme celle-ci s'écarte de sa direction naturelle, et commence à tourner autour de son centre; et, sans la force que le globe exerce sur cette aiguille pour la ramener à sa première position, elle ferait une demi-révolution autour d'elle-même comme dans l'expérience que nous avons citée plus haut (877). Mais elle ne s'écartera de sa première direction que jusqu'au terme où la force qui agit pour l'y ramener se trouvera en équilibre avec celle que le barreau exerce sur elle pour le faire mouvoir en sens contraire. Supposons que cet équilibre ait lieu au moment où le pôle *a* de l'aiguille a décrit l'arc *ae* (*fig. 30*), en sorte que cette aiguille ait pris la direction *eh* (1); et analysons les actions des forces qui déterminent l'équilibre dont il s'agit. Le pôle boréal *N* du globe, qu'il faut se représenter éloi-

(1) L'expérience nous a paru se faire plus facilement, lorsque l'arc que parcourt l'aiguille est du côté de l'observateur plutôt que du côté opposé. C'est ce qui aura lieu dans le cas que représente la figure, si l'on suppose cet observateur situé en *O*. Pour amener cette disposition, après avoir placé le barreau *MN* sur la direction prolongée de l'aiguille, comme nous l'avons dit, l'observateur le fera mouvoir de son côté, parallèlement à lui-même, l'une quantité égale à 5 ou 6 millimètres; ensuite il le conduira doucement vers l'aiguille, en lui conservant la même direction, jusqu'à ce qu'elle ait commencé à faire un mouvement sensible dans l'arc *ae*, après quoi il le remettra dans sa première position, et continuera de l'approcher de l'aiguille, qui, à son tour, poursuivra sa marche dans le même sens.

gné à une grande distance, attire le pôle austral a' de l'aiguille et repousse son pôle boréal b' ; et, comme ces deux forces conspirent pour faire rétrograder l'aiguille dans l'arc ea , nous pouvons, pour simplifier, les réduire par la pensée à une seule force qui agisse par attraction sur le pôle a' , en augmentant à proportion celle qui était censée d'abord n'agir que par son propre fluide pour attirer le même pôle. D'une autre part, le pôle austral S du globe exerce des actions analogues sur les deux pôles de l'aiguille; il attire de son côté le pôle boréal b' , et repousse en sens contraire le pôle austral a' . Il est évident que ces deux forces conspirent, comme les premières, pour faire rétrograder l'aiguille dans l'arc ea , en sorte que si, pour simplifier encore davantage, nous les ajoutons, par la pensée, à la force que nous supposons maintenant appliquée au pôle a' de l'aiguille, les choses se passeront comme si ce pôle n'était sollicité que par une seule force attractive qui fût l'équivalent de toutes les forces réelles à l'aide desquelles le globe agit sur l'aiguille.

A l'égard des actions du barreau sur l'aiguille, il est facile de concevoir que l'attraction du pôle B sur le pôle a' de cette aiguille et sa répulsion sur le pôle b' , s'accordent à produire dans le pôle a' une tendance à décrire l'arc ei . D'une autre part, la répulsion du pôle A du barreau sur le pôle a' de l'aiguille et son attraction sur le pôle b' font naître dans le pôle a' une tendance à se mouvoir en sens contraire dans l'arc ea . Mais les secondes forces, à raison d'une plus grande obliquité et d'une plus grande distance, agissent plus faiblement que les premières, en sorte que celles-ci l'emportent.

951. Maintenant nous pouvons nous servir ici du même moyen de simplification que pour les actions du globe sur l'aiguille, en réduisant toutes les forces à l'aide desquelles le barreau agit sur elle à une seule force, que nous supposerons appliquée au pôle a' . Pour opérer cette réduction, il faudra augmenter l'action que le pôle B exerce directement sur le pôle a' , à proportion de ce qu'elle gagne à être secondée par l'action du même pôle sur le pôle b' , et la diminuer à proportion de ce que lui font perdre les actions contraires du pôle A du barreau sur les deux pôles de l'aiguille.

D'après cette manière d'envisager les choses, l'aiguille n'est plus censée être sollicitée que par deux forces appliquées au pôle a' , et dont les actions, égales et contraires, l'une pour faire mouvoir l'extrémité de cette aiguille dans le sens de l'arc ea , et l'autre pour lui faire décrire l'arc ei , se détruisent mutuellement, en sorte que l'aiguille reste en équilibre. Si l'on continue de faire faire au barreau de petits mouvemens vers l'aiguille, de manière que le pôle B passe successivement en D, F, G, elle s'écartera de plus en plus de sa direction primitive; en même temps l'action du globe sur le pôle a' , pour ramener l'aiguille à cette direction, s'accroîtra parce qu'elle s'exercera toujours moins obliquement à mesure que l'aiguille approchera davantage de la direction Lx , perpendiculaire à la direction primitive NZ, qui est la plus favorable à l'action du globe, parce qu'alors l'aiguille se trouve entièrement tournée vers le pôle nord de ce globe, dans lequel réside la force qui agit par la faire revenir à sa première position.

Chaque fois que l'on arrête le barreau, l'aiguille, de son côté; reste stationnaire, parce qu'autant la force du barreau se trouve augmentée par la diminution de distance, autant la force du globe, qui agit en sens contraire, s'est accrue elle-même par une suite de ce qu'elle agissait moins obliquement.

Mais, dès qu'une fois l'aiguille est parvenue à la direction Lx ; si l'on fait faire au barreau un nouveau mouvement vers elle, l'attraction qu'il exerce sur le pôle a' s'accroîtra encore, et l'aiguille étant forcée de prendre une position telle que st , inclinée en sens contraire à l'égard de sa première direction NZ, la force du globe diminuera en recommençant à agir obliquement, en sorte que l'équilibre ne pouvant plus s'établir, l'aiguille continuera de tourner, pendant que le barreau restera immobile, jusqu'à ce qu'elle se retrouve sur sa première direction NZ, avec cette différence que sa position sera renversée à l'égard de celle qu'elle avait naturellement avant l'expérience.

Le moment le plus favorable pour présenter un corps qui renfermerait une petite quantité de fer à l'un des pôles de l'aiguille, paraîtrait être celui où sa position coïnciderait avec la ligne Lx ;

car on conçoit que, dans ce cas où la force que le globe exerce sur l'aiguille tend à diminuer, pour le peu que celle-ci poursuive son mouvement de rotation, une très petite force peut suffire pour la déranger dans le sens de ce mouvement. Mais comme il serait difficile d'arrêter le barreau précisément au terme où la plus légère impulsion qu'on lui donnerait ensuite vers l'aiguille déterminerait le retour de celle-ci à sa première direction, il suffira que la position de l'aiguille soit très voisine de ce terme, en restant un peu en deçà. On placera alors le corps destiné pour l'expérience vis-à-vis du pôle *l*, du côté du barreau. De cette manière, l'attraction du corps sur le pôle auquel on le présente conspire, avec la tendance de ce corps, pour s'avancer vers le barreau en continuant son mouvement de rotation. Il nous est arrivé quelquefois de saisir la position du barreau à laquelle répond la direction de l'aiguille sur la ligne *lx* (fig. 30), et, à l'approche d'un corps qui renfermait une petite quantité de fer, l'aiguille partait et achevait d'elle-même son demi-tour. Nous désignons ce genre d'expérience, sous le nom de *méthode du double magnétisme*.

952. On voit que cette méthode donne une grande extension à l'usage du caractère qui se tire de l'action magnétique pour la distinction d'une multitude de substances minérales, qui portent l'empreinte des différentes modifications que le fer a subies en s'unissant à leurs molécules. L'aiguille mise en équilibre fait reparaître l'action dont il s'agit, dans plusieurs de celles où le fer est à un haut degré d'oxidation, telles que la variété que l'on appelle vulgairement *Ætite* ou *Pierre d'aigle*, et les masses terreuses d'une couleur brune ou jaunâtre. Mais, pour satisfaire les physiciens auxquels ces variétés sont inconnues, et qui désireraient de vérifier l'expérience du double magnétisme, nous leur indiquerons, comme sujet de cette expérience, une des substances minérales que nous avons le plus souvent entre les mains. Nous voulons parler du laiton, ou cuivre jaune, qui est un alliage de zinc et de cuivre. Mais ce dernier métal, tel qu'on l'emploie dans la fabrication d'une grande partie des ouvrages dont cet alliage fournit la matière, se tire d'une espèce de mine appelée *cuivre pyriteux*, et qui renferme une grande quantité de fer. Le laiton

n'ayant pas subi les opérations nécessaires pour l'amener à l'état de pureté, a retenu des molécules ferrugineuses, qui se sont interposées entre ses molécules propres. Nous avons présenté successivement à l'aiguille, même en la laissant dans sa position naturelle, des chandeliers, des instrumens de Physique, et autres ouvrages faits de laiton, et presque tous ont produit dans l'aiguille un mouvement marqué.

Il n'en était pas de même des épingles, que l'on sait être faites du même alliage, et qui, à raison de leur petit volume, ne sont pas aussi susceptibles d'agir sur l'aiguille. Quoique parmi celles que nous lui présentions, il y en eût une partie qui exerçaient sur elle une petite action, elles étaient plus rares, et il était plus facile d'en trouver qui, après l'avoir laissée immobile dans la même circonstance, l'attiraient ensuite, d'une manière sensible, quand nous l'avions mise en équilibre. D'après ces résultats, il sera facile de faire servir le laiton à des expériences comparatives, sur les deux espèces de magnétisme, en variant le volume des corps à éprouver, et par suite, la quantité de fer renfermée dans leur intérieur. On peut obtenir des effets analogues avec des fragmens de vases d'une couleur rougeâtre à l'intérieur, dont la matière est une argile mêlée de fer oxidé. La cuisson rend ce fer susceptible d'agir sur l'aiguille, soit dans l'expérience ordinaire, soit seulement à l'aide du double magnétisme; et quelquefois un même fragment produit successivement les deux actions, par deux points pris à deux endroits différens.

Il n'entre pas dans notre plan d'exposer ici les avantages qu'offre le double magnétisme pour faire reconnaître certaines pierres dont les formes naturelles ont disparu entre les mains de l'art qui les a converties en objets d'ornement, et qui pourraient occasionner des méprises, par la ressemblance de leur couleur, si l'on s'en rapportait au jugement de l'œil (1). Nous nous bornerons à un seul exemple qui nous sera fourni par une des plus généralement connues. Nous voulons parler du grenat, dont le principe

(1) Voyez le Traité des caractères physiques des Pierres précieuses, Paris, 1817.

colorant est l'oxide rouge de fer. Une partie des morceaux taillés de cette pierre, surtout ceux dont le rouge est altéré par une nuance d'obscur, agissent sur l'aiguille dans l'expérience ordinaire. Mais cette action s'arrête souvent au terme où la couleur de la pierre, plus pure et plus vive, tend à la faire confondre avec des pierres très différentes qui, dans aucun cas, ne sont susceptibles du magnétisme; et c'est alors que l'aiguille, mise en équilibre, se présente à propos pour servir à lever l'équivoque.

Action du Globe sur le Fer non aimanté.

Nous avons maintenant à considérer des phénomènes où le parallèle se soutient entre le globe et les aimans qui sont à notre portée, relativement à la faculté qu'ont ces derniers de communiquer le magnétisme au fer placé dans leur sphère d'activité. De même l'action du globe, qui s'étend dans l'espace à des distances immenses, est capable de produire un certain degré de vertu magnétique dans les verges de fer et autres corps semblables, dont la force coercitive n'est pas assez grande pour s'opposer à cette action.

953. Rappelons-nous ici ce qui a été dit (935) de cette même action sur deux molécules, l'une de fluide boréal, l'autre de fluide austral, pour faire mouvoir la première dans la direction bh (fig. 26), et l'autre dans la direction ak . Comme la communication du magnétisme est due à de semblables mouvemens qui ont lieu pour toutes les molécules magnétiques situées dans l'intérieur d'une verge de fer, il est d'abord évident que la position la plus favorable pour que cette verge acquière le plus haut degré de magnétisme possible, est celle qui coïncide avec la direction kl . Si l'on suppose ensuite que la verge, en restant toujours dans le même plan GPK , prenne une autre position, telle que mn (fig. 31), et si nous considérons les lignes ok , oh , qui coïncident avec la direction primitive, comme les résultantes des forces exercées par le globe, lorsque la position est la plus avantageuse, il faudra, dans le cas présent, décomposer la force ok suivant deux directions, l'une kx perpendiculaire sur om , et qui

ne contribue en rien à l'effet; l'autre ox qui coïncide avec om , et qui représente la force réelle; c'est-à-dire, que la force ok se trouve diminuée dans le rapport de ok à ox . Si nous décomposons de même la force oh suivant deux directions, l'une hl perpendiculaire sur on , l'autre ol , qui se confond avec cette dernière ligne, ol représentera la force qui agit seule pour produire l'effet demandé.

A mesure que la verge s'écartera de la position mn , en prenant une direction pr qui fasse un angle encore plus ouvert avec la première, la quantité de la force réelle os ou oy ira toujours en diminuant; et lorsque la verge sera située sur la ligne tz qui fait un angle droit avec kh , la force réelle se trouvera réduite à zéro.

Passé ce terme, si l'on augmente l'angle que fait avec kh la nouvelle position de la verge, de manière, par exemple, que cette position coïncide avec bd , les mêmes effets recommenceront, c'est-à-dire, que si l'on mène les lignes kf et gh perpendiculaires, l'une sur od , et l'autre sur ob , of représentera la force qui détermine le mouvement du fluide austral vers d , et og celle qui sollicite le fluide boréal à se mouvoir vers b .

Si l'on place la verge dans un autre plan que GPK (*fig. 26*), il est facile de concevoir que sa position la plus favorable, relativement à ce second plan, sera celle où sa direction fera le plus petit angle possible avec la ligne kh , et que le magnétisme acquis deviendra encore nul, lorsque la longueur de la verge, en restant dans le même plan, fera un angle droit avec kh .

954. On peut vérifier ces différens résultats, à l'aide d'une expérience aussi curieuse que simple et facile à faire. Vous prenez une barre de fer doux, et vous la tenez dans une des positions où l'action du globe puisse lui communiquer le magnétisme. La position la plus favorable, à Paris, est celle qui est inclinée d'environ 72^{d} à l'horizon, parce que c'est cette position que prendrait naturellement une aiguille dont les deux moitiés auraient des poids égaux, et qui serait mobile autour d'un axe, à l'endroit de son centre de gravité; mais la position verticale suffit au succès de l'expérience. La verge étant donc située de cette manière

vous présentez son extrémité inférieure au pôle austral d'une aiguille aimantée placée sur son pivot; et vous observez qu'elle repousse ce pôle. Vous faites ensuite descendre la verge en la maintenant dans la même direction, jusqu'à ce que son extrémité supérieure se trouve vis-à-vis du même pôle de l'aiguille, et alors il y a attraction. Vous renversez la position de la verge, et aussitôt les pôles eux-mêmes se trouvent renversés. L'extrémité qui repoussait le pôle austral de l'aiguille l'attire, et celle qui l'attirait le repousse. Le fer doux n'opposant qu'une résistance peu considérable au mouvement interne des deux fluides qui se sont dégagés du fluide naturel, le magnétisme qu'il acquiert n'est qu'un effet fugitif qui, par le simple renversement de la verge, fait place à l'effet opposé. L'alternative subite de ces attractions et répulsions a un air de prestige qui tendrait à faire soupçonner de subtilité la main du physicien, au point que cette belle expérience semble y perdre dans l'esprit des spectateurs.

On réussira à produire des effets semblables, même avec une simple clef, ou tout autre corps fait de fer mou et d'une forme allongée. Mais quand ce corps a peu de masse, il faut employer une aiguille qui soit faiblement aimantée, et dont l'action immédiate sur ce même corps ne puissent troubler celle du magnétisme naturel.

955. On peut varier de la manière suivante l'expérience dont il s'agit ici : la verge étant d'abord dans une position verticale, on fera avancer son extrémité inférieure jusqu'à une telle distance du pôle austral de l'aiguille, que la répulsion ait commencé à se manifester, et l'on s'arrêtera à ce terme. On maintiendra ensuite l'extrémité inférieure de la verge dans la même position, tandis que l'on fera tourner doucement cette verge autour du même point dans un plan perpendiculaire à la direction de l'aiguille. Bientôt la répulsion diminuera, en sorte que l'aiguille se rapprochera de la verge, et finira par reprendre sa direction naturelle, au moment où la verge sera située à angle droit sur cette direction. Alors, si l'on continue de faire tourner la verge, l'aiguille se portera vers elle par l'effet de l'attraction qui aura succédé à la répulsion; et en faisant osciller légèrement la verge de part et

d'autre de la position où son action était nulle, on verra l'aiguille prendre elle-même un mouvement d'oscillation, en vertu duquel elle s'écartera et s'approchera tour à tour de l'extrémité de la verge.

956. Æpinus a remarqué que lorsqu'on frappait à coups redoublés avec un corps dur une verge de fer que l'on tenait dans une position favorable, on secondait à l'égard de cette verge l'action du magnétisme terrestre. Les secousses imprimées à la verge par ces percussions, occasionnent dans sa masse une espèce de vibration générale, qui en déplace un peu les particules, et qui diminuant leur force coercitive, facilite le dégagement des deux fluides, et leurs mouvemens vers les deux extrémités de la verge.

C'est probablement en vertu d'un mécanisme semblable que l'on parvient à aimanter les aiguilles qui étaient encore dans l'état naturel, ou à renverser leurs pôles si elles étaient déjà aimantées, en leur faisant subir une forte commotion électrique.

957. Les physiciens ont profité du degré de magnétisme que produit dans une verge la seule action du globe, pour résoudre ce problème singulier: *aimer des barreaux d'acier jusqu'à saturation, sans avoir eu préalablement aucun aimant entre les mains.* Il ne s'agit que de faire prendre d'abord à des barreaux de fer mou un commencement de vertu, en les plaçant d'une manière convenable, relativement au méridien magnétique du lieu. On emploie ensuite ces barreaux pour en aimanter d'autres plus durs, que l'on passe avec frottement sur leur surface. Ces derniers font à leur tour la même fonction par rapport à de nouveaux barreaux; à l'aide d'une méthode analogue à celle dont nous avons parlé, en traitant de la communication du magnétisme (908), on parvient à faire croître la force des barreaux dont il s'agit jusqu'à son *maximum*.

958. Les détails qui précèdent peuvent servir à expliquer certains faits qui ont dû causer d'abord beaucoup de surprise, tels que le magnétisme qu'acquière naturellement les barres de fer qui ont une position constante au haut des édifices. Une des premières observations de ce genre dont on ait parlé, est celle

que fit Gassendi , relativement à la tige qui soutenait la croix du clocher de Saint-Jean d'Aix en Provence. Cet observation a été renouvelée depuis sur d'autres tiges semblables.

959. Il n'est peut-être aucun point de Physique qui prouve mieux que celui qui nous occupe ici , combien les idées qui ont rapport à une science s'étendent et s'agrandissent , à mesure que la science elle-même fait des progrès et marche vers sa perfection. Un aimant passait autrefois pour une espèce de merveille , autant par sa rareté que par ses effets, et aujourd'hui l'observation nous apprend que tous ces instrumens de fer mou que nous avons à chaque instant sous les yeux et entre les mains, sont maintenus dans un état habituel de magnétisme polaire, par l'influence du globe terrestre. Seulement leurs pôles sont variables et se renversent continuellement par les changemens de position que ces corps subissent d'un instant à l'autre.

Nous avons parlé de l'action qu'exerce le globe , pour communiquer un commencement de vertu aux barreaux de fer mou, dont on se sert ensuite pour faire naître la même vertu dans des barreaux d'acier. Au lieu de les disposer simplement dans les directions que nous avons indiquées, on peut, en même temps qu'on les tient dans une position verticale, les frapper à coups redoublés, à l'aide d'un marteau. Les secousses que leur impriment ces percussions occasionnent dans leur masse une espèce de vibration générale, qui déplace un peu leurs particules, les écarte les unes des autres, et donnant ainsi plus de liberté au mouvement des fluides magnétiques, facilite l'action du globe pour les refouler vers les extrémités des barreaux.

960. A l'égard des instrumens d'acier, que leur grande force coercitive rend capables de résister à l'action du globe pour leur communiquer la vertu magnétique, cette action ne laisse pas de produire son effet, lorsqu'elle est secondée par des circonstances particulières. Ainsi les limes, les ciseaux, et autres instrumens qui sont exposés à des frottemens et à des secousses capables de donner du jeu à leurs molécules, passent peu à peu à l'état de magnétisme, et deviennent susceptibles d'enlever des parcelles de limaille ou des fils de fer d'un petit volume.

Cependant il serait difficile de croire que l'influence du globe fût la seule cause du magnétisme que le fer est susceptible d'acquies sans l'intervention immédiate d'un aimant. Il semble que l'on doive plutôt attribuer à une simple cause mécanique celui qui lui survient instantanément dans certaines circonstances. Telle est celle où se trouve un fil de fer que l'on plie et que l'on tord en divers sens par une de ses extrémités, jusqu'à ce qu'il se rompe. Cette extrémité présentée successivement aux deux pôles d'une aiguille aimantée, agit sur l'un par attraction, et sur l'autre par répulsion (1). La pression qu'exerce la filière sur le fer que l'on force de passer par la petite ouverture dont elle est percée, pour lui faire prendre une forme déliée, peut aussi amener ce fer à l'état de magnétisme polaire; c'est ce qui a souvent lieu, en particulier, à l'égard des fils du même métal qui composent une partie des cordes employées pour monter les *piano*.

Diverses observations prouvent que la foudre est capable de faire naître la vertu magnétique dans une verge de fer qui en serait frappée, et cette cause peut concourir, avec l'action du globe pour produire dans les tiges qui soutiennent les croix des clochers le magnétisme dont nous avons parlé plus haut.

Les décharges électriques ont aussi la propriété de décomposer le fluide magnétique renfermé dans le fer, et de faire passer ce métal de l'état naturel à l'action polaire. On peut obtenir cet effet en se servant d'un clou d'épingle, que l'on tient par le milieu à l'aide d'une pince, et dont on met la pointe en contact avec le bouton d'une bouteille de Leyde fortement chargée. On tire ensuite l'étincelle de la petite surface plane qui termine le clou du côté opposé, en lui présentant une des boules d'un excitateur, qui communique par l'autre boule avec la garniture extérieure de la bouteille. Le clou acquiert, par ce moyen, un magnétisme dont l'effet est très sensible, et qui se conserve pendant un terme plus ou moins considérable.

(1) Il faut s'être assuré, avant l'expérience, que le fil de fer ne soit pas déjà à l'état de magnétisme, comme cela aurait pu être d'après ce qui va suivre.

6. Du Magnétisme des Mines de Fer.

Les mines de fer répandues dans l'intérieur du globe avec une abondance proportionnée à l'utilité de ce métal, le plus précieux de tous, ont été l'objet de diverses observations particulières, qui offrent une confirmation des principes que nous avons établis, relativement à la manière d'agir des forces magnétiques.

961. On a quelquefois observé que des morceaux d'aimant qu'on venait de retirer de la terre et qu'on laissait dans la même position où ils étaient avant l'extraction, avaient leurs pôles situés en sens inverse de celui qui aurait dû avoir lieu dans l'hypothèse où ces morceaux auraient acquis leur magnétisme par l'action d'un aimant placé au centre du globe, ou par celle du globe même, considéré comme faisant l'office d'un aimant. Pour lever la difficulté qui paraît en résulter, il faut simplement supposer avec *Æpinus*, qu'il se forme naturellement dans les mines d'aimant des *points conséquens*, analogues à ceux que l'on observe quelquefois par rapport au fer que nous aimantons par les procédés ordinaires (399). On concevra dès-lors comment il peut se faire que quand on détache un fragment de mine dans laquelle il existe une série de points conséquens, la séparation ait lieu de manière que les deux pôles qui terminent le fragment soient autrement tournés que dans les morceaux qui ont reçu le magnétisme ordinaire.

962. Les minéralogistes ont regardé comme une espèce particulière de mine de fer, qu'ils ont nommée *aimant*, celle qui a les deux pôles magnétiques; c'était le *ferrum attractorium* de *Linnaeus*. Parmi les autres mines, celles qui n'avaient point de pôles distincts, mais seulement la faculté d'être attirées par le barreau aimanté, s'appelaient *ferrum retractorium*: enfin, on nommait *ferrum refractarium* celles qui se refusaient à l'action de ce barreau. *Delarbre* annonça, en 1786, que les fers spéculaires de *Volvic*, du *Puy-de-Dôme* et du *Mont-d'Or*, avaient deux pôles bien marqués (1), et nous avons entendu parler d'une observa-

(1) *Journal de Physique*; 1786, p. 119 et suiv. *Romé de Lisle* avait déjà dit la même chose par rapport à une mine de fer spéculaire de *Philadelphie*, *Cristal.*, t. III, p. 187, note 35.

tion semblable faite sur un cristal de fer octaèdre de Suède, ou de quelque autre endroit ; mais il restait un sujet de surprise à la vue de tant d'autres corps qui renfermant une certaine quantité de fer à l'état métallique, avaient séjourné si long-temps dans le sein de la terre, sans paraître avoir participé à l'action qui avait converti les premiers en aimans.

963. Nous avons entrepris récemment de faire des expériences pour éclaircir ce point de Physique ; mais nous avons considéré que si nous nous servions d'un barreau d'une certaine force, comme on le fait communément pour éprouver le magnétisme des mines de fer, il pourrait arriver que des corps qui ne seraient que de faibles aimans attirassent indifféremment les deux pôles du barreau ; parce que dans le cas où l'on présenterait, par exemple, le pôle boréal du corps soumis à l'expérience, au pôle boréal du barreau, la force de celui-ci pourrait détruire le magnétisme de l'autre, et de plus y faire succéder l'état contraire, ce qui changerait la répulsion en attraction. Nous avons donc pris une aiguille qui n'avait qu'un assez léger degré de vertu, semblable à celles dont on garnit les petites boussoles à cadran ; dès cet instant tout devint aimant entre nos mains. Les cristaux de l'île d'Elbe, ceux du Dauphiné, de Framont, de l'île de Corse, etc. repoussaient un des pôles de la petite aiguille par le même point qui attirait le pôle opposé. Nous avons trouvé peu d'exceptions ; et peut-être les corps qui sont dans ce cas ont-ils perdu leur magnétisme, depuis qu'ils ont été retirés de la terre. Ce qui peut le faire présumer, c'est la facilité avec laquelle ils acquièrent des pôles lorsqu'on les met en contact, seulement une ou deux secondes, avec un barreau d'une force moyenne.

Il serait possible d'ailleurs que quelques cristaux eussent échappé à l'action du magnétisme du globe pour avoir été situés de manière que leur axe fût perpendiculaire à la direction du méridien magnétique de leur lieu natal.

964. Il nous vint en idée qu'il pourrait se faire qu'un cristal à l'état d'aimant parût, en conséquence de cet état même, n'avoir aucune action sur un autre aimant. Pour vérifier cette conjecture, nous avons substitué à l'aiguille le barreau dont on se sert ordi-

nairement, et nous avons présenté à l'un des pôles de ce barreau un cristal de l'île d'Elbe, par le pôle de même nom. Le barreau n'ayant à peu près que la force nécessaire pour détruire le magnétisme du pôle qu'on lui présentait, et remettre ce pôle dans l'état naturel, il n'y eut ni attraction, ni répulsion sensible de ce côté; tandis que le même pôle du cristal, présenté à l'autre pôle du barreau, faisait mouvoir celui-ci. On voit par là qu'en se bornant à une seule observation, on pourrait en tirer une conclusion très opposée à la vérité.

Il restait à dissiper une petite incertitude relativement aux résultats que nous venons d'énoncer. Lorsqu'on présente un morceau de fer non aimanté, par exemple une clef, dans une position verticale, ou à peu près, au pôle austral d'une aiguille aimantée, ce pôle est toujours repoussé par le bout inférieur de la clef, tandis que le même bout attire le pôle boréal (1); c'est, comme nous l'avons vu (954), l'effet du magnétisme que l'action du globe terrestre communique à la clef, et qui est si fugitif que, si l'on renverse la position de cette clef, à l'instant les effets contraires auront lieu; mais on ne pouvait pas dire que les cristaux soumis à l'expérience fussent dans la même circonstance que cette clef, soit parce que leur action était constante, quelle que fût la position qu'on leur donnait, soit parce qu'il s'en trouvait dont l'extrémité inférieure repoussait le pôle boréal de l'aiguille, et attirait son pôle austral.

965. Il résulte, de ces observations, que tous les morceaux de fer enfouis dans la terre; qui n'abondent pas trop en oxygène, ou du moins la très grande partie, sont des aimans naturels, qui seulement varient par leur degré de force entre des limites très étendues: en conséquence, l'aimant ne doit pas former une espèce à part en Minéralogie; et ce qu'on appelle communément de ce nom, n'est que le premier terme et le mieux prononcé d'une série où la nature marche par nuances, à son ordinaire, et où nous pouvons la suivre très loin, en employant des moyens assés à la délicatesse des mêmes nuances.

(1) Nous supposons ici que l'observation se fasse dans nos contrées.

Du Magnétisme du Nickel et du Cobalt.

966. Nous ajouterons ici quelques détails sur deux substances métalliques, qui paraissent douées, ainsi que le fer, d'une vertu magnétique très sensible. L'une est de nickel qui, dans l'état où la nature l'a offert jusqu'ici, est toujours uni à l'arsenic et au fer. Il ne produit alors aucun mouvement dans le barreau aimanté. Mais cette observation ne prouve rien, parce que l'arsenic a cette propriété singulière, que sa présence, même lorsqu'il est en petite quantité, masque entièrement l'action du magnétisme.

Bergmann, qui a fait de nombreuses expériences sur le nickel, s'était aperçu que quand on avait épuré ce métal, autant qu'il était possible, il agissait sur le barreau aimanté. Le célèbre Klaproth, de son côté, après avoir découvert que la variété d'agate, nommée *Chrysoprase*, devait sa couleur verte à l'oxide de nickel, crut pouvoir regarder comme très pure la portion de ce métal qu'il avait obtenue par l'analyse de la pierre dont il s'agit (1); et voyant que le nickel, dans cet état, continuait d'être attirable, il pencha fortement à croire que ce même métal partageait avec le fer les propriétés magnétiques.

Cependant on pouvait être tenté de soupçonner que le nickel, lorsqu'on le croyait pur, recélait encore quelques molécules ferrugineuses que la puissance des agens chimiques n'avait pu lui arracher.

967. Nous nous sommes proposé d'écarter, s'il était possible; ce soupçon, en soumettant à l'expérience une lame de nickel épuré obtenue par M. Vauquelin, dont le poids est de 45 centigrammes, ou environ 8 grains $\frac{1}{2}$, et la longueur de 16 millimètres, à peu près 7 lignes. Cette lame agissait d'abord par attraction sur l'un et l'autre pôle d'une aiguille aimantée; mais on parvint facilement à lui communiquer le magnétisme polaire, en employant la méthode de Coulomb (913), en sorte qu'elle exerçait des attractions et des répulsions très marquées sur l'aiguille; et qu'ayant été

(1) *Annales de Chimie*, t. I, p. 169.

suspendue à un fil de soie très délié, elle se dirigea aussitôt dans le plan du méridien magnétique. De plus, un fil de fer dont le poids était à peu près la moitié de celui de cette lame, ayant été mis en contact avec elle, y demeura suspendu par l'effet du magnétisme.

M. Biot a comparé depuis la force magnétique du nickel avec celle de l'acier, en faisant osciller deux lames rectangulaires de 0^{m^{tt}},2127 de longueur sur 0^{m^{tt}},006 de largeur, et dont l'une, qui était de nickel, pesait 5^{gram},178, et l'autre, qui était d'acier, pesait 4^{gram},586. La première avait été épurée avec tout le soin possible par M. Thenard, dont l'habileté est connue.

Les deux lames ayant été aimantées à saturation furent suspendues à des fils de soie; celle de nickel fit 10 oscillations en 87^{sec}., et celle d'acier en fit le même nombre en 45^{sec}.,5. Mais les forces magnétiques de deux corps, à égalité de dimensions, sont en raison directe des poids, et en raison inverse des carrés des temps employés à faire un nombre donné d'oscillations: donc la force magnétique du nickel est à celle de l'acier comme $\frac{5,178}{(87)^2}$ est à $\frac{4,586}{(45,5)^2}$, ou comme 0,000684 est à 0,002215; c'est-à-dire que la première est un peu moins que le tiers de la seconde.

Or, la quantité de fer qu'il faudrait supposer dans les lames de nickel, dont nous venons de parler, était trop considérable pour permettre de croire qu'elle eût entièrement échappé aux moyens employés par les deux célèbres chimistes, qui semblaient avoir épuisé toutes les ressources de l'art pour amener ces lames à l'état de pureté.

968. Cependant M. Laugier, si avantageusement connu par la grande précision qui caractérise ses opérations, soupçonna depuis que le terme auquel s'était arrêtée l'analyse, dans les tentatives faites pour épurer le nickel, n'était pas le dernier auquel il fût possible d'atteindre, et entreprit de nouvelles recherches dans la vue d'essayer s'il ne débarrasserait pas ce métal d'une petite quantité de matière étrangère, qui serait restée jusqu'alors comme enchaînée à ses molécules propres.

Il fut utilement secondé dans son travail par M. Silveira, jeune médecin portugais, d'un mérite distingué. On peut lire dans le mémoire qu'il a présenté à l'Académie des Sciences, et qui a obtenu le suffrage de cette compagnie, le détail des épreuves nombreuses et variées par lesquelles ces deux savans ont fait passer successivement le métal, et des précautions scrupuleuses qu'ils ont prises pour écarter jusqu'aux plus petites causes d'erreur, et pour arriver à un résultat qui pût être regardé comme étant en quelque sorte le dernier mot de la Chimie (1).

Ce que la propriété magnétique du nickel a gagné à ce résultat, offre une raison de plus de croire que M. Laugier a atteint le but qu'il s'était proposé, puisque si, comme on n'en peut douter, le nickel jouit par lui-même de la propriété dont il s'agit, il est naturel de penser que plus il est pur, et plus elle doit avoir en lui d'énergie. M. Laugier, à qui nous témoignâmes le désir d'éprouver ce qu'elle aurait acquis entre ses mains, voulut bien nous donner une lame de son nickel, d'une forme à peu près circulaire, et dont le diamètre était de 25 millimètres (près d'un pouce), et l'épaisseur de 2 millimètres (environ une ligne). En faisant tourner cette lame vis-à-vis d'une des extrémités d'une aiguille aimantée, nous nous aperçûmes qu'elle avait deux pôles situés sur la direction d'un même diamètre. A la vérité l'aiguille n'avait qu'une médiocre vertu. Avec une autre aiguille plus vigoureuse, la répulsion était quelquefois remplacée par l'attraction. Mais l'action polaire était très marquée. Nous ne voulûmes pas l'augmenter à l'aide de l'aimantation; nous préférâmes d'observer plutôt la durée, et nous trouvons que déjà elle s'est soutenue sans altération sensible depuis plus de six mois que nous l'avons éprouvée pour la première fois. L'action polaire est doublement remarquable dans le cas présent, comme étant le résultat d'une simple opération d'analyse, qui semble être entièrement

(1) Expériences sur le traitement des mines de Cobalt et de Nickel etc. ; Mémoires à l'Académie royale des Sciences, le 10 août 1818. Annales de chimie et de physique, t. IX, p. 267 et suiv.

étrangère aux moyens qu'on emploie communément pour la faire naître.

969. L'autre substance est le cobalt, qui, dans ses mines, est de même toujours mêlé de fer et d'arsenic, et qui, étant épuré autant que les ressources de la Chimie peuvent le permettre, manifeste aussi un magnétisme très sensible. Wenzel a fait, avec ce métal, des aiguilles qui, après avoir été aimantées, se dirigeaient comme celles des boussoles ordinaires (1). Au fond, rien ne répugne à ce que d'autres métaux aient, ainsi que le fer, la faculté de retenir le fluide magnétique engagé dans leurs pores; et cette espèce de prérogative que l'on croyait accordée au fer seul, devait même paraître d'autant plus singulière, qu'en général la nature n'est pas ainsi exclusive dans sa manière d'agir.

7. Des différentes Hypothèses imaginées par les Physiciens, sur la cause du Magnétisme qu'exerce le Globe terrestre.

970. Descartes et les physiciens qui ont suivi sa doctrine, avaient expliqué les phénomènes des aimans ordinaires, à l'aide d'une hypothèse qui leur paraissait s'adapter comme d'elle-même au magnétisme naturel. Ils pensaient que le globe terrestre était en grand ce qu'était un aimant en petit; que le fluide magnétique circulait continuellement d'un pôle à l'autre, et entraînait dans sa direction les aiguilles aimantées librement suspendues. Comme le tourbillon formé par ce fluide suivait la courbure du globe, il déterminait l'aiguille à s'incliner vers un pôle ou vers l'autre, à mesure qu'on l'écartait de l'équateur. A l'égard de la déclinaison, on essayait de l'expliquer, en supposant que les pôles du tourbillon magnétique ne coïncidaient pas avec ceux du globe, mais s'en écartaient d'une certaine quantité. Avec cette manière plutôt vague que générale de concevoir la cause du magnétisme,

(1) Gren, Manuel systém. de Chimie, deuxième édition, t. III, p. 516, et suiv.

on éludait la détermination de tous les phénomènes particuliers, ou, pour mieux dire, de toutes les anomalies apparentes que présente l'observation assidue des mouvemens de l'aiguille. On ignorait alors cette vérité si importante pour le progrès des sciences, que, si les idées générales sont les bases des théories, c'est par les détails qu'on juge de la solidité de cette base.

971. Depuis qu'on a cherché à mettre de la précision dans l'explication des phénomènes du magnétisme, les tourbillons ont disparu, et l'on a substitué aux impulsions imprimées par leurs molécules aux aiguilles magnétiques, des forces qui s'exerçaient à distance sur ces aiguilles, et qui avaient leurs centres d'action dans l'intérieur même du globe. Et comme il était naturel de donner un sujet aux forces dont il s'agit, les physiciens se partagèrent, à cet égard, entre deux opinions différentes, mais puisées dans l'analogie avec les phénomènes déjà connus. Les uns eurent recours à l'action des mines d'aimant, que l'on supposait être très abondantes vers les pôles. La disposition irrégulière des masses dont ces mines étaient formées occasionnait les diversités que l'on observe, pour un instant, dans les déclinaisons et les inclinaisons des aiguilles situées à différens points de la terre; et les changemens successifs que subissaient les mines, par l'action des diverses causes qui les altéraient, ou les détruisaient à tel endroit, tandis qu'ailleurs il s'en produisait de nouvelles, faisaient varier à leur tour, avec le temps, la quantité de la déclinaison ou de l'inclinaison, pour chaque lieu particulier.

972. Halley, Æpinus, et d'autres physiciens, sans nier l'influence des mines d'aimant sur la direction des aiguilles, l'ont regardée seulement comme une force secondaire, et ont supposé que la force principale provenait d'un très gros aimant de figure globuleuse, ou à peu près, qui formait comme le noyau du globe terrestre. Halley avait de plus imaginé que ce noyau devait avoir un mouvement très lent, par lequel sa position changeait continuellement à l'égard du globe; ce qui servait à expliquer, selon ce physicien, les variations que le temps apporte dans l'inclinaison et la déclinaison des aiguilles, relativement à un même lieu.

973. Æpinus n'admet point ce mouvement, qui lui paraît in-

suffisant et même absolument inutile, et, pour ramener les phénomènes à l'hypothèse d'un noyau fixe, il observe d'abord que si le fluide était distribué uniformément dans ce noyau, en sorte que ses deux centres d'action, ayant des forces égales, fussent situés sur l'axe de la terre à des distances égales du centre, la déclinaison serait nulle à tous les points du globe, tandis que l'inclinaison, nulle seulement à l'équateur, croîtrait vers les pôles, suivant une loi qui serait en relation avec le changement de latitude.

Mais la distribution du fluide se fait irrégulièrement à l'intérieur du noyau magnétique. Dans certaines parties le fluide est plus accumulé; dans d'autres il est plus rare; et il en résulte que les positions des centres d'action changent continuellement à l'égard d'une aiguille portée à différens points de la terre. Si le point auquel répond actuellement l'aiguille est tellement situé, que la résultante de toutes les forces qui agissent diversement sur elle des différens points du noyau magnétique soit parallèle à l'axe de la terre, la déclinaison sera nulle; et suivant que cette résultante fera un angle plus ou moins ouvert avec l'axe du globe, la déclinaison elle-même sera plus ou moins considérable.

D'un autre côté, la distribution du fluide change avec le temps dans l'intérieur du noyau, et ces changemens déterminent ceux que subissent la déclinaison et l'inclinaison de l'aiguille dans un même lieu.

974. A l'égard de la variation diurne en déclinaison, M. Canton a cru pouvoir l'expliquer par la diminution de force attractive que la chaleur des rayons solaires devait occasionner dans le noyau magnétique du globe. Cette diminution ayant lieu le matin, par rapport aux parties situées vers l'est, l'aiguille, moins attirée de ce côté, devait décliner vers l'ouest, et l'effet opposé devait avoir lieu pendant l'après-midi.

975. Une observation faite par Lahire semble donner une nouvelle couleur à l'hypothèse dont nous venons de parler. Ce physicien ayant taillé, en forme de sphère, un aimant naturel qui pesait près de cent livres, et en ayant déterminé l'axe d'après la position des pôles magnétiques, traça sur cette sphère un

équateur et un certain nombre de méridiens. Il fit ensuite correspondre une aiguille aimantée successivement à différens points de cet aimant, et il remarqua que, dans quelques-uns de ces points, elle se dirigeait exactement d'un pôle à l'autre, et que, dans d'autres points, elle déclinait à droite ou à gauche; en sorte que la plus grande déclinaison observée se trouvait être d'environ 26 degrés.

976. Tel était l'état de nos connaissances, relativement au magnétisme naturel, lorsque M. Coulomb, à qui la détermination de toutes les petites forces qui exigent des attentions délicates semble être tombée en partage, fut conduit, par des expériences de ce genre, à des résultats imprévus, qui tendent à répandre un nouveau jour sur le point de Physique qui nous occupe. Ce savant célèbre prit deux barreaux aimantés, qu'il disposa sur une même ligne droite, de manière que leurs pôles opposés étaient éloignés l'un de l'autre d'environ 15 millimètres. Il plaça dans l'espace intermédiaire, successivement, de petits cylindres faits de diverses matières, et dont la longueur était de sept à huit millimètres. Chaque cylindre était suspendu librement à un fil de soie, tel qu'il sort du cocon. M. Coulomb observa que ce cylindre, de quelque matière qu'il fût composé, se disposait toujours exactement suivant la direction des barreaux, et si on le détournait de cette direction, il y était constamment ramené, après un certain nombre d'oscillations. L'or, l'argent, le cuivre, le plomb, l'étain, le verre, la craie, les os des animaux, et différens bois furent soumis à l'expérience, et tous ces corps éprouvèrent l'action des barreaux magnétiques (1).

Il se présentait deux manières d'expliquer ces phénomènes : l'une consistait à dire que tous les élémens qui entrent dans la composition de notre globe étaient, par leur nature, susceptibles de la vertu magnétique, mais que, dans la plupart des corps, cette vertu était presque insensible; en sorte que, jusqu'à présent, elle n'avait guère été observée que dans le fer, qui la possède à un degré éminent; l'autre explication supposait que l'ac-

(1) Journal de Physique; floréal an x, p. 367 et suiv.

tion magnétique exercée par les barreaux dans les expériences que nous avons citées, était due à des molécules de fer répandues indistinctement dans les différentes substances naturelles, et qui échappaient à tous les efforts de l'analyse chimique. M. Coulomb, qui avait d'abord penché en faveur de la première explication, paraît avoir balancé depuis entre l'une et l'autre; il a projeté une suite d'expériences dont il a même exécuté quelques-unes, et dont le but était de mesurer l'action des barreaux sur les différens corps, et de chercher quelle serait, relativement à la masse de chacun de ces corps, la quantité de fer qu'il faudrait supposer disséminée dans son intérieur pour produire le nombre d'oscillations qu'il fait dans un temps donné.

La grande précision que M. Coulomb avait coutume de mettre dans toutes ses opérations, semblait ne laisser aucun lieu de douter de la justesse des résultats qui viennent d'être décrits. Cependant plusieurs physiciens ayant entrepris de les vérifier, n'ont pu y réussir; nous avons tenté nous-même inutilement d'en obtenir de semblables, en employant des barreaux plus vigoureux que ceux dont on se sert ordinairement, et en n'omettant aucune des précautions propres à garantir le succès de l'expérience. Les oscillations que faisaient les aiguilles, pendant le premier instant, répondaient à des arcs qui étaient coupés très inégalement par une ligne parallèle aux axes des barreaux, qui aurait dû faire ici la même fonction que la verticale dans les oscillations du pendule. Lorsqu'ensuite l'aiguille avait cessé d'osciller, la direction sur laquelle elle s'était arrêtée faisait un angle plus ou moins ouvert avec les mêmes axes, et qui variait d'une expérience à l'autre.

La seule manière de concilier ici la diversité des résultats avec la marche uniforme des opérations, consisterait à dire que l'action du magnétisme sur les aiguilles, ne commençant à devenir sensible qu'à un certain degré d'énergie, les expériences restent sans effet, ou réussissent suivant que la force des barreaux employés est en deçà du degré dont il s'agit, ou l'a atteint. Et ce qui semble confirmer cette explication, c'est que dans des expériences dont on a annoncé le succès, on avait substitué à de simples bar-

reaux des faisceaux de lames magnétiques, qui devaient emprunter de leur réunion un grand surcroît d'énergie. Mais nous n'avons pas été à portée de nous procurer un appareil qui offrit le même avantage.

977. Les recherches des physiciens modernes pour perfectionner la science du magnétisme ne sont pas encore arrivées à leur terme. Parmi les phénomènes qui en attendent de nouvelles, la déclinaison de l'aiguille et la variation de l'intensité de la force magnétique sont ceux à l'égard desquels nos connaissances soient le plus en retard. Quelques savans ont cru avoir trouvé la loi de la déclinaison, et ramené ce phénomène à une espèce de progression qui devait en donner la quantité pour chaque lieu de la terre. On a même été jusqu'à prétendre que la déclinaison pouvait servir à résoudre le problème des longitudes. Mais, suivant la remarque de M. Biot, la recherche extrêmement difficile des lois auxquelles sont soumises la déclinaison et l'intensité exigerait, pour être tentée avec succès, des observations peut-être plus nombreuses et plus précises que celles qui ont été recueillies jusqu'à présent. On pourrait dire qu'à cet égard la Physique du magnétisme n'est pas encore mûre pour la Géométrie.

978. Nous terminerons par une comparaison succincte des fluides électrique et magnétique, considérés relativement à leur manière d'agir et aux fonctions qu'ils exercent. L'un étend son empire sur tous les corps de la nature; ce qu'il y a de prouvé par rapport à l'autre, c'est que le fer, le nickel et le cobalt sont les seuls corps soumis à son pouvoir. Le fluide électrique tantôt se communique librement d'un corps à l'autre, tantôt reste engagé dans le corps où il s'est décomposé; jamais le fer ne partage son fluide avec un autre fer, il le retient constamment comme enchaîné dans ses pores.

L'électricité se manifeste aux yeux par des jets de lumière, par de bruyantes étincelles. Le magnétisme agit paisiblement et en silence; il n'est sensible que par les mouvemens qu'il inspire aux corps en prise à son action. Les phénomènes électriques excitent un étonnement plus vif; les phénomènes magnétiques une admiration plus tranquille.

Enfin la décomposition spontanée du fluide électrique dans la nature dépend de causes locales, variables et passagères. Le fluide magnétique a ses forces à peu près concentrées dans certains points de notre globe, comme dans des espèces de foyers d'où elles s'exercent à chaque instant sur tous les corps ferrugineux. Sans cesse elles sollicitent les aiguilles de boussole, sinon d'une manière constante, du moins avec des variations assez petites pour que l'instrument soumis à leur action puisse servir de guide aux navigateurs, et les dédommager en quelque sorte de l'absence des étoiles; et ainsi l'aimant, qui n'a été pendant long-temps qu'un objet d'amusement, fournit aujourd'hui à la marine un de ses instrumens les plus précieux; et ceci nous apprend que les objets qui ne semblent d'abord conduire qu'à des spéculations curieuses, ne doivent pas être pour cela condamnés à l'oubli. Outre qu'il en résulte toujours des connaissances propres à exercer la sagacité de l'esprit et à orner la raison, ces connaissances peuvent receler elles-mêmes une utilité cachée qui enfin se déclarera; et les momens que nous leur donnons préparent peut-être celui où elles tourneront vers nous leur côté le plus intéressant, et cesseront d'être stériles pour le bien de la société.

Expériences électro-magnétiques.

Observations préliminaires.

979. L'existence du fluide électrique dans les phénomènes dont on doit la découverte à Galvani, avait été méconnue par ce physicien, et la cause qu'il leur assignait, en les faisant dépendre d'un fluide qui circulait dans le corps des animaux, tendait à rejeter leur théorie bien loin de sa véritable direction. Dans la suite, après que Volta en eût découvert la vraie cause et eût mis le fluide électrique en activité dans la pile qui porte son nom, les effets que cet instrument offrit à l'observation parurent lui assigner encore un rang à part dans l'ensemble des corps électriques; et tandis que ceux de ces corps qui étaient connus jusqu'alors s'assimilaient aux corps magnétiques par les lois auxquelles était sou-

mis le fluide qui les sollicitait, ce fluide se montrait, sous certains rapports, différent de lui-même, par la manière dont la pile se chargeait, par la faculté qu'elle avait de reprendre sans cesse ce qu'elle avait perdu, et par la distribution des deux fluides qui circulaient dans son intérieur. Des expériences très remarquables, faites par M. OErsted, ont prouvé que le fluide magnétique, qui jusqu'alors n'avait fourni qu'un terme de comparaison aux phénomènes électriques, concourait réellement à ceux de la pile.

Nous allons exposer, le plus clairement qu'il nous sera possible, les résultats de ces belles expériences, où des phénomènes si connus, et avec lesquels nos yeux étaient familiarisés depuis si longtemps, se sont montrés sous des caractères qui semblent en avoir fait des phénomènes tout nouveaux.

Exposé des Phénomènes.

980. On sait que l'action exercée par une pile sur le fluide naturel des disques métalliques qui entrent dans sa composition, a pour effet de séparer les deux électricités dont il est formé, et qu'elle tend continuellement à les refouler en sens contraires vers les extrémités. De là résultent deux états différens du fluide développé par la pile, suivant que ces extrémités sont isolées l'une de l'autre par des corps non conducteurs, ou communiquent ensemble par un fil conducteur. Le premier état est un état d'équilibre, ou de *tension électrique*; les deux électricités s'accu- mulent chacune dans la partie de la pile vers laquelle elle est portée, jusqu'à ce que leur tendance à se réunir contrebalance l'action contraire que la pile exerce pour les séparer. Mais si l'on forme un circuit en joignant les extrémités de la pile par un fil métallique, alors il n'y a plus de tension : les deux fluides, dégagés par l'action continue de la pile, se répandent en sens opposés dans le fil conducteur, où s'établit par leur réunion le second état de l'électricité, que l'on a désigné sous le nom de *courant électrique*. Cet état est caractérisé par un nouvel ordre de phénomènes, auquel appartiennent ceux que nous ont dévoilés les expériences de MM. OErsted, Ampère et Arago.

1°. Phénomènes découverts par M. OErsted.

981. Ces phénomènes consistent dans les actions que M. OErsted a reconnues entre le fil métallique qui joint les deux pôles d'une pile et un aimant ; actions qui sont dépendantes non seulement de la position du fil par rapport à l'aimant, mais encore des directions que suivent dans ce fil les deux électricités. Comme ces directions sont opposées, il suffit, pour les déterminer, d'indiquer le sens dans lequel se meut l'électricité positive; c'est ce que l'on appelle le *sens du courant électrique*. Cela posé, on peut présenter, comme l'a fait M. Ampère, tous les faits particuliers observés par M. OErsted, sous un point de vue qui les ramène aux deux résultats généraux, que nous allons exposer.

982. 1^{er} *résultat*. Lorsqu'on approche une aiguille aimantée d'une portion quelconque d'un circuit galvanique, on la voit se détourner de sa direction primitive, et tendre à se mouvoir de manière que son axe soit perpendiculaire à cette portion du circuit. De plus, si l'on se place, par la pensée, dans le sens du courant, de manière qu'il soit dirigé des pieds à la tête de l'observateur, et que celui-ci ait la face tournée vers l'aiguille, c'est toujours à sa gauche que le pôle austral est porté par l'action galvanique.

983. Supposons, par exemple, qu'une pile soit placée horizontalement à peu près dans le sens du méridien magnétique, et qu'on ait disposé, dans une direction parallèle à ce méridien, une portion plus ou moins grande du fil conjonctif. Supposons de plus que le pôle positif de la pile regarde le nord, de manière que le courant galvanique soit dirigé du sud au nord dans la pile, et du nord au sud dans la partie rectiligne du conducteur ; que l'on place deux aiguilles aimantées mobiles sur des pivots, l'une sur la pile elle-même, et l'autre au-dessus ou au-dessous du fil conducteur, le pôle austral de la première se portera vers l'est, et celui de la seconde se détournera du côté opposé, lorsqu'on la placera au-dessus du conducteur, et du même côté lorsqu'elle sera placée au-dessous.

Dans cette expérience, l'action du courant galvanique se combine toujours avec celle que le globe terrestre exerce sur l'aiguille aimantée, en sorte que celle-ci ne parvient jamais à la position perpendiculaire, et s'arrête obliquement en faisant un angle plus ou moins ouvert avec le méridien magnétique. Mais on peut rendre nulle l'influence du globe, ainsi que l'a fait M. Ampère, en fixant l'aiguille aimantée perpendiculairement à un axe, auquel on donne la direction de l'aiguille d'inclinaison. Dans ce cas, elle fait toujours un angle droit avec le fil conducteur; celui-ci agissant seul pour la diriger.

984. 2^e *résultat*. Un conducteur galvanique, supposé fixe, et une aiguille aimantée, suspendue librement à un fil, s'attirent quand la position de l'aiguille est celle qu'elle tendait à prendre dans l'expérience précédente, en vertu de l'action directrice du conducteur; et se repoussent quand l'aiguille est dans la position contraire. Dans le cas où l'attraction a lieu, si le conducteur et l'aiguille viennent à se toucher, ils restent attachés l'un à l'autre, comme le feraient deux aimans.

2°. Attractions et Répulsions Galvaniques observées par M. Ampère.

985. Comme les actions que l'on vient d'exposer sont réciproques entre l'aiguille aimantée et le fil conjonctif, il est clair qu'elles se manifesteraient également dans le cas où l'aiguille étant fixe, on lui présenterait un conducteur mobile; et comme le globe terrestre lui-même fait la fonction d'un véritable aimant, on doit en conclure qu'il dirigerait constamment dans le même sens un tel conducteur, auquel on donnerait une disposition analogue à celles des aiguilles de boussole. Aussi, lorsqu'on forme avec un fil métallique un cercle presque fermé, où l'on ne laisse que l'interruption suffisante pour faire communiquer les deux extrémités du fil avec les pôles de la pile, et que l'on rend cet appareil mobile autour d'un axe compris dans le plan du cercle, l'action du globe amène ce plan dans une position perpendiculaire à une

aiguille aimantée, qui, assujettie à tourner autour du même axé, obéirait de son côté à la même action. Cette expérience, que M. Ampère a tentée le premier, est délicate : on peut voir dans le mémoire (1) où l'auteur l'a décrite, les précautions qu'il a prises pour en assurer le succès.

986. Le même savant a découvert de plus, entre deux fils métalliques faisant partie d'un même circuit, une action mutuelle tout-à-fait analogue à celle qu'exerce un fil conjonctif sur un aimant, ou qui est réciproque entre deux aimans. Pour la rendre sensible, il dispose dans des directions parallèles deux portions rectilignes du conducteur, de manière que l'une soit fixe, et que l'autre ait une suspension mobile qui lui permette de s'approcher ou de s'éloigner de la première, en lui restant toujours parallèle. Alors, si l'on fait passer un courant électrique à la fois dans les deux fils, on observe qu'ils s'attirent mutuellement, quand leurs courans respectifs ont lieu dans le même sens, et qu'ils se repoussent quand les courans ont lieu dans des directions opposées. Dans le cas de l'attraction, s'ils parviennent au contact, ils restent attachés l'un à l'autre comme deux aimans ; et, de plus, ces effets ont lieu dans le vide comme dans l'air.

987. M. Ampère a introduit dans un tube de verre une partie du fil conjonctif, et a plié l'autre partie en hélice sur le tube : puis, suspendant le tout comme une aiguille aimantée, il a obtenu de cette manière un appareil qui exécutait, à l'approche d'un barreau aimanté, les mêmes mouvemens que fait cette aiguille dans les mêmes circonstances.

3°. Observations de M. Arago, relatives à l'aimantation des Lames de fer ou d'acier par le Courant Galvanique.

988. M. Arago a d'abord remarqué que le fil conjonctif se chargeait de limaille de fer, comme le ferait un aimant, et qu'on ne

(1) Annales de Chimie et de Physique, t. XV, octobre 1820.

pouvait attribuer cet effet à une action électrique ordinaire, puisque l'expérience ne réussissait point avec de la limaille de cuivre, ou avec de la sciure de bois. De plus, il a vu que le fil ne communiquait au fer doux qu'un magnétisme fugitif, mais qu'en se servant de parcelles d'acier, on obtenait un effet durable. Bientôt après, des vues théoriques le conduisirent à former avec le fil une hélice, au centre de laquelle il plaça une aiguille d'acier, enveloppée de papier. Au bout de quelques minutes, l'aiguille avait reçu un degré assez considérable de magnétisme. En répétant cette expérience, l'auteur observa qu'on obtenait une position constante des pôles, en rapport avec la direction du courant dans l'hélice.

Dans une autre expérience, le même savant employa deux hélices symétriques, séparées par une partie rectiligne. Les spires de l'une étaient dirigées dans un sens; celles de l'autre dans le sens contraire. Deux aiguilles tout-à fait semblables furent placées dans les deux hélices. Le changement de la direction suivant laquelle circulait le courant dans ces deux parties du fil, a suffi pour donner lieu à un renversement des pôles dans les aiguilles. En introduisant un seul et même fil d'acier dans plusieurs hélices tournées dans des sens alternativement contraires, il obtint une série de pôles intermédiaires, analogues à ceux que nous avons désignés sous le nom de *points conséquens*.

M. Arago a reconnu depuis que l'électricité ordinaire produisait tous les phénomènes d'aimantation qu'il avait observés au moyen de l'appareil voltaïque. Il est parvenu à communiquer une forte vertu magnétique à un barreau d'acier, placé dans un tube de verre, autour duquel un fil de laiton était roulé en hélice, en faisant passer à travers ce fil une série d'étincelles électriques.

989. L'objet de la théorie, relativement aux nouveaux phénomènes de la pile, sera de les ramener à un principe qui les rattache aux lois bien connues des fluides électrique et magnétique, et aux actions mutuelles de leurs propres molécules. Mais, pour remplir cet objet, il faudrait avoir des données plus positives sur cette disposition particulière de l'électricité, que l'on a désignée par le nom de *courant électrique*. En attendant, MM. Biot et Ampère ont cher-

ché à déterminer par l'expérience l'action mutuelle de deux portions infiniment petites de fils conjonctifs : ils ont trouvé que, pour une même position respective de ces portions de fils, cette action était en raison inverse du carré de leur distance; considérant ensuite les fils d'une longueur finie comme des assemblages d'éléments soumis à cette loi, ils ont déduit du calcul les expressions des effets composés que l'on observe dans les attractions et répulsions de ces fils. C'est ainsi qu'ils sont parvenus à ce résultat, que, dans le cas de deux fils rectilignes dont les directions sont parallèles, si l'on en suppose un d'une longueur infinie, la résultante des actions de toutes ses parties sur une portion déterminée de l'autre est en raison inverse de la plus courte distance des deux fils. Ces manières géométriques de représenter les phénomènes ont ouvert la route que la théorie doit parcourir pour arriver à son véritable but.

Réflexions sur les Phénomènes électro-magnétiques.

990. A ne juger des phénomènes que nous venons de décrire que par ce qu'ils offrent d'extraordinaire au premier coup-d'œil, et par l'étonnement général qu'ils ont excité, lorsqu'on les a annoncés, on pourrait être tenté de les mettre au rang des découvertes qui ont changé la face des sciences auxquelles elles appartenaient; mais le point de vue n'est plus le même, lorsque la surprise ayant fait place à la réflexion, on examine ce que nos connaissances, sur le sujet dont il s'agit, ont encore à acquérir pour ne laisser plus rien à désirer. C'est cet examen qui nous a suggéré les réflexions suivantes.

991. Il nous paraît d'abord bien prouvé que le fluide magnétique est distingué, par sa nature, du fluide électrique. Nous avons cité différens faits qui établissent cette distinction, et dont les uns sont relatifs aux circonstances naturelles qui développent les deux fluides et les mettent en activité; les autres sont donnés par les expériences qui nous montrent de près les actions des mêmes fluides dans les corps que nous avons à notre disposition.

992. En second lieu, les théories de l'électricité et du magnétisme, telles que les ont adoptées jusqu'ici tous les physiciens, sont

démontrées sans retour par l'accord du calcul avec l'observation; et elles le sont d'autant mieux, qu'elles se vérifient mutuellement par l'identité des lois auxquelles les deux fluides, quoique distingués entre eux, obéissent d'une manière invariable dans les expériences destinées à leur détermination.

Maintenant les nouveaux phénomènes qu'ont offerts ses expériences faites en Danemark, se réduisent aux trois suivans : l'un dépend de l'influence qu'exerce l'action électrique de la pile sur une aiguille aimantée, pour la détourner de sa direction naturelle; le second, consiste dans la propriété qu'a le fluide de la pile de décomposer, dans certaines circonstances, le fluide magnétique, et de faire naître l'action polaire dans une aiguille où un barreau de fer; le troisième enfin dérive des actions mutuelles de deux fils métalliques traversés par deux courans d'électricité galvanique. Cette électricité produit seule le phénomène dont il s'agit, tandis que les deux autres ont lieu en vertu du concours de l'électricité et du magnétisme.

993. Mais, pour ne parler d'abord que de ce dernier phénomène, on observe, dans les corps électriques et magnétiques que nous soumettons à l'expérience, des effets qui ont dû surprendre les premiers observateurs, mais qui s'expliquent aujourd'hui d'une manière satisfaisante, d'après les théories généralement reçues; on doit croire qu'il en sera de même dans la suite de celui dont il s'agit ici. D'une autre part, l'action qu'exerce la pile pour faire passer le fer de l'état naturel à celui de magnétisme polaire, ne lui est pas particulière; la bouteille de Leyde la partage avec elle, en produisant le même effet sur le fer à travers lequel on la décharge. Cet effet est connu depuis long-temps, et l'on n'a pas jugé que le refus qu'il a fait jusqu'ici de se prêter à une explication satisfaisante portât aucune atteinte à la théorie: on peut en dire autant d'un effet non moins remarquable qui provient de l'action d'un autre fluide étranger au magnétisme et à l'électricité; nous voulons dire celui du calorique, qui a la prérogative de faire naître des pôles électriques dans la tourmaline, qui est si remarquable sous le rapport des propriétés qu'elle acquiert dans cette circonstance.

994. C'est le premier des phénomènes cités, celui que présente

une aiguille magnétique dérangée de sa position naturelle par l'influence de la pile, qui imprime à cet appareil son véritable caractère distinctif. Aucun autre agent n'est capable de l'imiter; la conséquence qui s'en déduit, c'est qu'il existe dans sa manière d'agir une circonstance particulière qui détermine le phénomène dont nous venons de parler, et que les physiciens parviendront probablement un jour à saisir par le côté qui la rattache aux lois si bien démontrées du magnétisme et de l'électricité. Ce que l'on peut dès maintenant inférer du retard où se trouve la science par rapport à l'explication de ce phénomène et des autres dont nous avons parlé, c'est qu'elle ne sera pas exposée à revenir sur ses pas pour la trouver, et qu'elle aura plutôt de nouveaux pas à faire pour arriver à son but.

VIII. DE LA LUMIÈRE.

Après avoir développé les différens phénomènes produits par les fluides répandus autour de nous et dans les régions voisines de notre globe, nous nous élèverons maintenant jusqu'à la considération de la lumière, qui a sa source dans les astres, et dont l'action embrasse la sphère entière de l'univers.

La Physique ne nous offre nulle part un objet plus digne de notre étude, soit par la beauté, soit par le nombre des phénomènes. Les services que nous tirons du fluide qui nous éclaire seraient seuls capables d'exciter toute notre attention pour bien connaître ses propriétés. Si l'air, en servant de véhicule à la parole, nous met en commerce de pensées avec nos semblables, la lumière ajoute un grand prix à ce commerce, en nous rendant présente leur image, qui elle-même a tant de choses à nous dire. Plus susceptible d'impressions variées que les autres sens, l'œil, par le secours de la lumière, saisit tout à la fois dans les corps les formes qui les terminent, les couleurs qui les embellissent, les rapports de leurs positions, les mouvemens qui les transportent dans l'espace; il démêle, sans aucune confusion, toutes ces modifications qui semblent se jouer de mille manières dans cette grande diversité d'objets auxquels s'étend le pouvoir d'un simple regard.

Mais si la vision n'était que directe, la partie même dans laquelle l'œil a son siège, celle qui nous caractérise et qui nous fait reconnaître par les autres, serait restée inconnue pour nous-mêmes : la lumière y supplée, en nous offrant notre portrait fidèle derrière les surfaces réfléchissantes dont l'action multiplie tout ce qui se présente devant elles.

Ce n'est point encore là que se bornent les services que nous tirons de ses propriétés. Au-delà des globes qui brillent sur nos têtes, il en existe d'autres qui se dérobent à notre vue par l'immensité de leur éloignement, tandis que près de nous, des milliers d'êtres organiques échappent de même à nos yeux par leur extrême petitesse. La lumière, en se repliant dans les corps diaphanes terminés par des faces curvilignes, nous a mis à portée d'apercevoir ces deux espèces d'infinis; elle a ouvert un nouveau ciel à l'Astronomie, et un nouveau champ à l'Histoire naturelle.

995. On a cet avantage, dans la théorie de la lumière, que la marche de ce fluide est géométrique, en sorte qu'en partant d'un petit nombre de lois, on parvient à déterminer les résultats par des méthodes précises et rigoureuses. On sait que le célèbre Saunderson, quoique aveugle depuis sa première enfance, donnait des leçons publiques d'Optique; il considérait les rayons de la lumière comme de simples lignes matérielles, qui agissaient sur l'œil par contact; en voyant ces lignes par la pensée, il faisait concevoir aux autres comment leurs yeux voyaient les objets mêmes dont elles excitaient en eux l'impression.

996. On peut considérer la lumière, dans l'état de composition qui lui est naturel, et sous lequel on la voit d'une blancheur éclatante, ou comme étant décomposée en différentes espèces de rayons diversement colorés. Les propriétés relatives au premier état conduisent à déterminer ce qu'on peut appeler *les routes de la lumière*. Ce fluide tend toujours par lui-même à se mouvoir en ligne droite. Mais il arrive souvent qu'il rencontre un obstacle qui lui refuse le passage, et lui permet seulement de se réfléchir sur sa surface; ou bien un milieu, c'est-à-dire, un corps transparent, qu'il pénètre en éprouvant une déviation, à laquelle on a donné le nom de *réfraction*. En comprenant, sous la dénomi-

nation générale d'*Optique*, tout ce qui concerne la science de la lumière, on a appliqué plus spécialement cette dénomination à la partie qui traite de la lumière directe : on a appelé ensuite *Catoptrique* celle qui considère la lumière réfléchi par les surfaces des miroirs, et *Dioptrique* celle qui a pour objet la lumière réfractée à son passage d'un milieu plus dense dans un autre plus rare, ou réciproquement. Plusieurs physiciens, pour s'être attachés à suivre rigoureusement l'ordre prescrit par cette sous-division, ont manqué un but plus essentiel, qui est de ramener les idées elles-mêmes à la méthode analytique, et d'éviter de faire entrer, dans l'explication d'un phénomène, des connaissances qui ne seront exposées que dans la suite. Ainsi on a compris dans l'*Optique* proprement dite, plusieurs effets de la vision qui supposent l'intelligence de la structure de l'œil, tandis que cette structure elle même ne peut être bien conçue que d'après les principes de la *Dioptrique*.

Voici l'ordre que nous nous sommes proposé de suivre pour conserver, autant qu'il sera possible, la liaison des idées, et ne point laisser prendre l'avance aux vérités dont le tour n'est pas encore venu.

Nous examinerons d'où provient la lumière, sous quelle forme elle se répand, quelle est sa vitesse, et suivant quelle loi son intensité diminue à mesure qu'elle s'éloigne du corps lumineux.

De ces principes, qui ont rapport à la lumière directe, nous passerons aux lois générales de la réflexion et de la réfraction ; nous exposerons ensuite les phénomènes qui concernent la lumière décomposée et les couleurs.

Ces principes une fois établis, nous en ferons l'application à la vision soit naturelle, soit aidée par les instrumens de *Catoptrique* et de *Dioptrique*.

1. De la Nature et de la Propagation de la Lumière.

997. Lorsqu'un corps lumineux répand sur tous les autres corps renfermés dans sa sphère un éclat qui affecte nos yeux, et rend ces corps visibles pour nous, cet effet suppose nécessairement l'existence d'un fluide dont l'action s'exerce et sur les objets éclairés, et sur l'organe qui les aperçoit. Ce fluide est-il une matière subtile qui remplit toute la sphère de l'univers, et à laquelle le corps lumineux imprime une agitation qui se transmet ensuite de proche en proche, comme les vibrations du corps sonore se propagent par l'intermède de l'air? Telle était l'hypothèse de Descartes, admise par plusieurs physiciens modernes qui, pour l'adapter au phénomène de la réflexion et à celui de la propagation de la lumière, y ont fait quelques changemens, en supposant que les particules de ce fluide, au lieu d'être inflexibles et tout-à-fait contiguës, comme le voulait Descartes, étaient élastiques et laissaient entre elles de petits intervalles. La lumière provient-elle, au contraire, d'une émission ou d'un écoulement des particules propres du corps lumineux qu'il lance sans cesse de tous côtés, par un effet de l'agitation continuelle que lui-même éprouve? Dans cette hypothèse, qui est celle de Newton, il en serait de la lumière, du moins quant à la manière dont elle est produite, comme des corpuscules émanés des corps odorans.

Un rayon de lumière, selon Descartes, est une file de molécules dont les mouvemens consistent dans de très petites oscillations qui se répètent continuellement: suivant Newton, c'est une file de molécules qui ont toutes un mouvement de transport, et se succèdent sans interruption.

Dans les deux hypothèses, on considère chaque point d'un corps lumineux comme le sommet commun d'une infinité de cônes d'une très petite épaisseur, composés de rayons qui s'étendent indéfiniment tant que rien ne les arrête. On donne quelquefois à ces cônes eux-mêmes le nom de *rayons*, et alors l'axe du

cône est la ligne à laquelle on rapporte la direction du mouvement de la lumière.

Le système de Descartes a été adopté par Euler, avec la différence que nous avons énoncée plus haut, et d'après laquelle la matière d'où dépend la propagation de la lumière, et à laquelle il donne le nom d'éther, est douée d'une élasticité incomparablement plus grande que celle de l'air (1).

L'opinion d'Huygens, sur l'émission de la lumière, rentre dans celle dont nous venons de parler ; mais le terme de comparaison auquel il rapporte cette émission, n'est pas le même, et il la considère comme l'effet d'un mouvement ondulatoire, imprimé par le corps lumineux à la matière éthérée, et semblable à celui que produit dans l'eau une pierre que l'on y a jetée.

998. Dans cette même opinion, un point lumineux est le centre d'une sphère composée d'arcs concentriques qui subissent une dilatation, en même temps que leurs particules font de petites vibrations analogues à celles qui sont produites dans l'air pendant la transmission du son. Mais, de plus, chacune des particules qui composent l'onde devient à son tour le centre d'une onde particulière dont l'arc terminal est tangent à celui de l'ondulation totale. Il en résulte que les arcs des ondes voisines s'entrecoupent de toutes parts, en sorte que les particules de l'éther sont soumises à deux sortes d'actions, dont l'une est dirigée suivant des lignes perpendiculaires à la surface de l'onde totale, et l'autre, qui a lieu sur des directions transversales, provient des pressions mutuelles que les ondes exercent les unes sur les autres dans le même sens. Mais, à cause de la symétrie qui règne dans les positions de ces ondes, soit entre elles, soit à l'égard de l'onde totale, les pressions dont il s'agit se font équilibre et s'entre-détruisent, en sorte que la seule action dont l'effet subsiste sans altération, est celle qui fait mouvoir les particules dans le sens de la normale. Huygens conclut de là que les rayons de la lumière peuvent être considérés comme autant de lignes droites.

(1) Lettres à une Princesse d'Allemagne, t. I, p. 86.

999. Les deux hypothèses ont chacune en leur faveur des autorités d'un grand poids. Cependant, si on les compare sous tous les rapports, on ne pourra refuser la préférence à celle de Newton. Celle de Descartes a d'abord contre elle une objection très forte, à laquelle on a tenté en vain de répondre d'une manière satisfaisante; car, dans cette hypothèse, la lumière ne se répandrait pas seulement en ligne directe, mais son mouvement se transmettrait dans tous les sens comme celui du son, et irait porter l'impression des corps lumineux dans les espaces situés au-delà des obstacles qui se présenteraient pour l'arrêter. Nous devrions donc avoir un jour perpétuel; et jamais, dans les éclipses totales de soleil, nous n'aurions cette disparition de la lumière qui change tout d'un coup l'éclat d'un jour serein en une nuit profonde.

1000. Les difficultés qu'on oppose à l'hypothèse newtonienne n'ont pas, à beaucoup près, la même force. On a objecté que les rayons de la lumière qui nous sont envoyés par les astres sous une infinité de directions différentes, se feraient obstacle les uns aux autres, et ne pourraient continuer leur mouvement rectiligne. Mais on peut supposer que les molécules de la lumière étant d'une ténuité extrême, comme tout nous porte à le croire, leurs distances respectives sont incomparablement plus grandes que leurs diamètres; et comme les molécules d'un rayon trouvent un passage d'autant plus libre entre celles des autres rayons, ou sont d'autant moins exposées à les rencontrer, que le rapport entre les distances et les diamètres est plus considérable, l'obstacle deviendra sensiblement nul, si l'on conçoit que le rapport soit presque infini (1).

Par une suite nécessaire, la quantité de lumière fournie par les astres, même pendant une durée immense, sera si petite, que leur volume n'en sera pas sensiblement diminué.

Les partisans de l'autre hypothèse n'ont point à résoudre ces difficultés, parce qu'il en est des vibrations de la lumière, dans cette hypothèse, comme de celles de l'air; et ainsi on peut leur

(1) Smith, Traité d'Optique, traduction française; 1767, p. 721.

appliquer ce que nous avons dit (544) de la propagation des sons simultanés, qui se croisent sans se confondre : mais l'avantage qu'elle paraît avoir à cet égard est déjà plus que balancé par l'objection que nous avons citée; et tous les faits que nous exposerons dans la suite tendront à établir de plus en plus la supériorité de l'hypothèse newtonienne. En général, on ne pourrait reprocher à celle-ci que de mener à des conséquences qui étonnent l'imagination, et elle a cela de commun avec plusieurs vérités incontestables.

Au reste, quand même on ne la regarderait pas comme suffisamment démontrée, elle mériterait d'être adoptée, par cela seul qu'elle conduit à une explication aussi heureuse que satisfaisante des phénomènes, entre autres, de ceux de la réfraction et de l'aberration, tandis qu'il est très difficile de les concevoir dans l'hypothèse de Descartes.

Affaiblissement de la Lumière, à mesure qu'elle s'éloigne des Corps lumineux.

1001. Considérons maintenant un des cônes de lumière qui ont leurs sommets aux différens points d'un corps lumineux, et concevons un plan qui coupe ce cône dans un sens que nous supposons, pour plus grande simplicité, être perpendiculaire à l'axe du cône. Si nous faisons mouvoir ce plan parallèlement à lui-même, en allant du sommet vers la base, il interceptera des cercles dont les surfaces iront en croissant comme le carré de la distance au sommet, laquelle est mesurée par la partie de l'axe qu'il intercepte en même temps; et puisqu'il reçoit toujours un même nombre de rayons, il en résulte que l'intensité de la lumière dans un espace donné, pris sur ce plan, est en raison inverse du carré de la distance. Donc, si l'on suppose que le plan dont il s'agit soit le cercle de la prunelle de l'œil, on en conclura que la lumière reçue par cet œil doit s'affaiblir dans le même rapport à mesure qu'il s'éloigne du corps lumineux.

Concevons que l'œil, placé d'abord à une certaine distance d'un flambeau, s'en écarte ensuite à une distance trois fois plus grande;

les rayons qui passaient par la prunelle, dans le premier cas, se répandront sur un espace neuf fois plus grand, d'où il suit que la prunelle en recevra neuf fois moins ; et, par conséquent, si l'on voulait que l'impression faite sur l'œil, fût toujours la même, il faudrait remplacer le premier flambeau par un autre, dont la lumière fût neuf fois plus forte, c'est-à-dire, neuf fois plus abondante sur un même espace.

De l'Ombre.

1002. Un corps opaque ne peut jamais être éclairé qu'en partie par un corps lumineux, et l'espace privé de lumière qui est situé du côté de la partie non éclairée, est ce qu'on appelle *ombre*. Ainsi l'*ombre*, proprement dite, représente un solide dont la forme dépend à la fois de celle du corps lumineux, de celle du corps opaque, et de la position de celui-ci à l'égard du corps lumineux.

1003. Supposons que les deux corps soient des globes r et z (*fig. 32*), et que le diamètre du corps lumineux r soit plus grand que celui du corps opaque z : l'ombre sera un cône que l'on déterminera en supposant une ligne droite oc qui joigne les centres des deux globes, puis en menant une tangente db commune aux deux globes, jusqu'à la rencontre en a de cette même ligne prolongée. Si l'on conçoit que la tangente, en restant fixe par le point a , où elle coupe la ligne qui joint les centres, tourne autour de cette ligne, de manière à faire toujours le même angle avec elle, elle décrira évidemment la surface d'un cône qui aura pour base le cercle du globe opaque, terminé par tous les points du contact ; d'où l'on voit que la partie éclairée du globe opaque sera plus grande que la partie obscure, le plan qui distingue l'une de l'autre étant un des petits cercles de ce globe, situé dans l'hémisphère opposé à celui qui regarde le corps lumineux.

1004. Si les deux globes sont égaux, l'ombre sera un cylindre d'une longueur indéfinie, et la partie éclairée du globe opaque sera un hémisphère, ainsi que la partie obscure.

1005. Si le globe opaque est plus gros que le globe éclairant, l'ombre deviendra un cône tronqué d'une longueur pareillement

indéfinie, dont les points de contact avec le globe opaque seront sur la circonférence d'un de ses petits cercles, en sorte que la partie éclairée de ce globe sera moindre que sa partie obscure.

1006. L'ombre, considérée sur un plan situé derrière le corps opaque qui la produit, n'est autre chose que la section de ce plan dans le solide qui représente l'ombre; d'où il suit que, dans le cas des deux globes que nous avons cités pour exemple, la figure de l'ombre sur un plan sera un cercle, une ellipse ou quelque autre section conique, suivant les positions du plan à l'égard du cône d'ombre formé par l'interposition du corps opaque entre ce plan et le corps lumineux.

1007. Lorsque l'ombre d'un corps est projetée sur un plan, elle ne succède point, par un passage nettement tranché, à la lumière qui éclaire les parties environnantes; mais celle-ci éprouve une sorte de dégradation, au moyen de laquelle son intensité va toujours en diminuant, depuis les points le plus fortement éclairés, jusqu'à l'espace occupé par l'ombre pure, ou proprement dite. Soit de nouveau r (*fig. 33*) le corps lumineux, z le corps opaque, et uy , un plan situé derrière celui-ci; px représentera la projection de l'ombre pure. Maintenant menons les lignes nl , qs , fh , etc., tangentes au globe opaque z , et qui aillent rencontrer le globe lumineux, et bornons-nous à considérer ce qui se passe à la gauche du point p en allant vers u . La ligne fh , tangente aux deux globes, étant à la plus grande distance possible de p , parmi toutes les lignes susceptibles d'atteindre le globe r , il est facile de voir que le point f , et à plus forte raison les points plus reculés vers u , reçoivent autant de rayons que si le globe z n'existait pas; savoir, tous ceux qui partent des points compris depuis h jusqu'en d ; mais que le point q ne reçoit aucun des rayons envoyés par les points situés entre h et s ; que le point m est privé de tous ceux qui ont pour origine les points compris entre h et l ; et qu'enfin, tous les rayons qu'envoie la partie du globe r , tournée vers le plan uy , sont perdus pour le point p ; d'où il suit que l'effet de la lumière décroît progressivement depuis f jusqu'en p , qui est la limite de l'espace px , occupé par l'ombre pure. On a donné le nom de *pénombre* à cette lumière graduellement décroissante,

qui s'étend, d'une part, depuis f jusqu'en p , et, d'une autre part, depuis g jusqu'en x . Les astronomes emploient la considération de la pénombre dans la théorie des éclipses, et nous en ferons usage lorsque nous parlerons de la lumière décomposée par l'intermède du prisme.

1008. L'ombre pure d'une verge perpendiculaire ou oblique sur un plan est un triangle que l'on déterminera en menant par le sommet de la verge une droite qui aille toucher le corps lumineux, en faisant le plus petit angle possible avec la verge. Les côtés du triangle seront : 1^o. la partie de cette droite comprise entre le sommet de la verge et le plan donné; 2^o. la verge elle-même; 3^o. la ligne menée par le pied de la verge jusqu'à la rencontre de la droite dont nous avons parlé : cette dernière ligne sera l'ombre considérée sur le plan donné : elle croîtra et décroîtra à mesure que l'angle, dont le sommet se confond avec celui de la verge, sera plus ou moins grand ; c'est-à-dire, à mesure que le corps lumineux s'abaissera ou s'élèvera par rapport au plan donné; et si ce même corps s'écarte à droite ou à gauche de la position qu'avait d'abord le triangle qui détermine l'ombre, celle-ci fera sur le plan des mouvemens en sens contraire. C'est sur ces principes qu'est fondée la *Gnomonique*, ou l'art de tracer des cadrans (1).

Vitesse de la Lumière.

1009. On a cru pendant long-temps que le mouvement de la lumière était instantané; mais cette opinion était uniquement fondée sur ce que la vitesse de ce mouvement paraissait échapper à tous les moyens qu'on aurait pu employer pour la déterminer.

(1) On peut, au moyen de l'ombre projetée sur un terrain horizontal, mesurer à peu près la hauteur d'une tour ou d'un autre objet semblable. On plantera verticalement un bâton, dont on mesurera la partie élevée au-dessus du sol; on mesurera aussi l'ombre de ce bâton et celle de la tour. Les longueurs des ombres étant proportionnelles aux hauteurs des deux objets qui les produisent, on aura la hauteur de la tour, en multipliant la longueur de son ombre par la hauteur du bâton, et en divisant le produit par la longueur de l'ombre du bâton.

Roëmer et Cassini découvrirent enfin une mesure de ce mouvement dans l'observation des éclipses du premier satellite de Jupiter : cette planète ayant un diamètre plus petit que celui du soleil, le cercle qui sépare sa partie éclairée de sa partie obscure est la base d'une ombre conique située vers cette dernière partie. Les satellites qui tournent autour de la planète principale entrent dans ce cône, et en sortent successivement, de manière que leur partie éclairée devient elle-même obscure, et disparaît à mesure qu'ils se plongent dans le cône d'ombre, pour reparaitre ensuite au moment où ils s'en dégagent. Supposons que la terre approche du terme où elle serait placée sur une même ligne droite entre Jupiter et le soleil; dans ce cas, il s'écoulera environ 42 heures $\frac{1}{2}$ entre la fin d'une éclipse du premier satellite de Jupiter et celle de l'éclipse suivante. Concevons maintenant que la terre, en parcourant la moitié de son orbite, ait été se placer vers le point opposé, de manière qu'alors elle se trouve derrière le soleil, par rapport à Jupiter. Si la lumière n'avait aucun mouvement progressif, un spectateur situé sur la terre verrait le premier satellite de Jupiter sortir de l'ombre, après un temps égal à autant de fois 42 heures $\frac{1}{2}$ qu'il y aurait eu d'éclipses depuis le moment où la terre était entre Jupiter et le soleil. Mais il n'en est pas ainsi, et le spectateur voit, dans ce cas, la fin de l'éclipse environ 16 minutes plus tard que ne la donne le calcul; de manière que, dans toutes les positions intermédiaires, la différence a toujours été en croissant jusqu'à cette limite. Or, le spectateur est alors à une distance de sa première position mesurée par le diamètre de l'orbite terrestre dont il a parcouru la moitié, et l'on sait que ce diamètre est d'environ soixante-dix millions de lieues. On en a conclu que la lumière emploie 16 minutes à parcourir cette distance, ce qui fait plus de quatre millions de lieues par minute. Ainsi la lumière qui nous vient immédiatement du soleil, ne parvient à nos yeux qu'au bout de huit minutes. C'est en combinant le mouvement progressif de la lumière avec celui de la terre dans son orbite, que l'on explique l'aberration des étoiles, c'est-à-dire, le mouvement apparent qui les écarte du point auquel nous devrions les rapporter dans le ciel. D'après la vitesse de la lumière, telle

que nous venons de l'indiquer, on trouve, pour l'aberration, une quantité égale à celle que donne l'observation, ce qui garantit à la fois et la justesse de l'explication et celle de la conséquence déduite du retard que subissent les éclipses de Jupiter. Nous reviendrons dans la suite avec plus de détail sur le phénomène de l'aberration.

De l'Aurore boréale.

1010. Nous placerons ici la description d'un météore que les modernes ont appelé *aurore boréale*, et que nous ne considérons que comme un simple phénomène de lumière, dont la cause n'est pas encore bien connue. On trouve dans les anciens auteurs un grand nombre de passages qui prouvent que ce phénomène avait été remarqué depuis très long-temps. Chacun le décrivait à sa manière; et, suivant les divers aspects sous lesquels il se présentait, on lui donnait différens noms, tels que ceux de *lames*, de *torches ardentes*, de *lances*, etc. Ce n'est que dans le siècle dernier que l'on a commencé à l'étudier, d'après les règles d'une saine physique; et personne ne s'est plus attaché que Mairan à en déterminer les diverses circonstances, dont voici les principales (1). Ce phénomène se montre presque toujours du côté du nord, en tirant un peu vers l'ouest. Il commence ordinairement trois ou quatre heures après le coucher du soleil. Il s'annonce par une espèce de brouillard, qui présente à peu près la figure d'un segment de cercle dont l'horizon forme la corde. La partie visible de sa circonférence paraît bientôt bordée d'une lumière blanchâtre, d'où résulte un arc lumineux, ou plusieurs arcs concentriques, dont la distinction est marquée par des bordures composées de la matière obscure du segment. Des jets et des rayons de lumière diversément colorés s'élancent ensuite de l'arc ou plutôt du segment nébuleux, où il se fait presque toujours quelque brèche éclairée, qui semble leur donner une issue. Quand le phénomène augmente et qu'il doit occuper une grande étendue, son progrès se mani-

(1) *Traité physique et historique de l'Aurore boréale*, p. 115 et suiv.

feste par un mouvement général et une espèce de trouble dans toute la masse. Des brèches nombreuses se forment et disparaissent à l'instant dans l'arc et dans le segment obscur; des vibrations de lumière et des éclairs viennent frapper, comme par secousses, toutes les parties de la matière du phénomène qui occupent l'hémisphère visible du ciel. Enfin, lorsque cette matière parvient à sa plus grande extension, il se forme au zénith une couronne enflammée qui est comme le point central dans lequel tous les mouvemens d'alentour paraissent concourir. C'est là le moment où le phénomène se développe dans sa plus grande magnificence, tant par la variété des figures lumineuses qui se jouent de mille manières au haut de l'atmosphère, que par la beauté des couleurs dont plusieurs d'elles sont ornées. Le phénomène diminue ensuite par degrés, de manière cependant que les jets lumineux et les vibrations se renouvellent de temps en temps; mais enfin le mouvement cesse; la lumière qui occupait les parties méridionales et celles de l'orient et de l'occident se resserre et se concentre dans la partie boréale; le segment obscur s'éclaircit et finit par s'éteindre, tantôt subitement, et tantôt avec lenteur, à moins qu'il ne se prolonge jusqu'à se fondre, en quelque sorte, dans le crépuscule du matin, comme cela a lieu dans la plupart des grandes aurores boréales.

1011. Ce phénomène a été d'abord attribué aux vapeurs et aux exhalaisons de la terre, qui, après s'être mêlées, entraînent en fermentation et finissent par s'enflammer. D'autres ont imaginé que les glaces et les neiges de la zone polaire réfléchissaient les rayons solaires vers la surface concave des couches supérieures de l'atmosphère, d'où ces rayons étaient ensuite renvoyés vers nous, et produisaient toutes les apparences que présente l'aurore boréale.

1012. Parmi les diverses causes dont on faisait dépendre ce phénomène, l'électricité ne pouvait être oubliée, et le développement d'une théorie fondée sur cette cause appartenait, comme de droit, à Franklin. Suivant ce célèbre physicien, le fluide électrique transporté de l'équateur vers les régions polaires, par les nuages qui en étaient chargés, descendait avec la neige sur la glace qui couvre ces régions, et, après s'y être accumulé, remontait à

travers l'atmosphère. Arrivé ensuite dans le vide qui était au-dessus, il se dirigeait du côté de l'équateur, en divergeant comme les méridiens. Là il formait ces jets de lumière et toutes ces variétés de figures qu'on observe dans le spectacle d'une aurore boréale (1). Au reste, Francklin ne propose cette idée qu'en doutant; et, dans le premier ouvrage où il l'a publiée, il finit par cette phrase qui renferme le jugement qu'il en portait lui-même; « cela pourrait passer pour une explication de l'aurore boréale (2) ».

1013. Mairan n'avait étudié avec tant de soin les circonstances de l'aurore boréale, que pour chercher à mieux étayer l'opinion particulière qu'il s'était formée sur l'origine de ce phénomène. Voici les principes sur lesquels était fondée cette opinion.

Diverses observations indiquent que le soleil est environné d'une atmosphère lumineuse par elle-même, ou seulement éclairée par les rayons de cet astre, et l'on a regardé cette atmosphère comme la cause d'un autre phénomène, qui porte le nom de *lumière zodiacale*. Cette lumière, qui est faible et blanchâtre, paraît surtout vers le printemps, quelque temps après le coucher du soleil, ou, avant le lever, vers la fin de l'automne (3). Mairan suppose que l'aurore boréale a lieu, lorsque la matière de l'atmosphère solaire s'approche assez de la terre pour être plus en prise à l'attraction de cette planète qu'à celle du soleil. Une fois entrée dans la sphère d'activité de la terre, elle tombe dans notre atmosphère, et bientôt le mouvement circulaire plus rapide des particules d'air situées vers l'équateur, la repousse vers les pôles où la vitesse de rotation est moindre. C'est pour cela que l'aurore boréale paraît le plus souvent du côté du nord. Mairan s'efforce ensuite d'expliquer, d'après les mêmes principes, toutes les circonstances du phénomène.

Comme la position de l'aurore boréale, qui, selon Mairan, a son siège dans l'atmosphère, est quelquefois élevée à plus de 260

(1) Journal de Physique; juin 1779, p. 409 et suiv.

(2) Expér. et Observ. sur l'Électricité; Paris, 1752, p. 118.

(3) Mairan, Traité de l'Aurore boréale, p. 12.

lieux au-dessus de la surface de la terre (1), ce physicien avait été obligé de supposer à cette atmosphère une hauteur incomparablement plus grande que celle qu'on lui attribuait communément. L'objection lui en fut faite par le célèbre Euler, qui en même temps proposa, sur la cause des aurores boréales, une nouvelle opinion (2) que Mairan, à son tour, s'efforça de combattre (3). Suivant cette opinion, les rayons solaires, exerçant leur impulsion sur les particules de l'atmosphère, les chassent à une grande distance, et les rendent lumineuses, en se réfléchissant sur leur surface. Euler étendait cette explication à l'apparition des queues des comètes et à celle de la lumière zodiacale, en vertu d'une impulsion semblable, qui agissait, d'une part, sur l'atmosphère des premières, et, de l'autre, sur celle du soleil lui-même.

1014. Enfin, quelques savans ont considéré le fluide magnétique comme l'agent du phénomène dont il s'agit; et la correspondance que l'on avait remarquée dans certains cas, entre ses apparitions et les affollemens de l'aiguille aimantée (930), semblait être favorable à cette opinion. Des observations plus récentes, dont on est redevable à MM. Dalton et Arago, annoncent du moins un lien caché entre les causes de l'aurore boréale et celles du magnétisme terrestre. Ces deux physiciens ont reconnu que le point du ciel où vont concourir les rayons de lumière diversement colorés, qui jaillissent du segment nébuleux dont nous avons parlé plus haut, est précisément celui vers lequel se dirige une aiguille aimantée suspendue par son centre de gravité; et que les cercles concentriques qui se montrent avant les jets lumineux, reposent chacun sur deux parties de l'horizon, également éloignées du méridien magnétique, de manière que ce dernier plan renferme les sommets de tous les arcs (4). M. Arago tire de là cette consé-

(1) Mairan, *Traité de l'Aurore boréale*, p. 62.

(2) *Recherches physiques sur la cause des queues des comètes, de la lumière boréale et de la lumière zodiacale; Mémoires de l'Académie de Berlin*, 1746, t. II.

(3) *Traité de l'Aurore boréale; septième éclaircissement*, p. 341 et suiv.

(4) Voyez les *Annales de Chimie et de Physique*, t. X, p. 120.

quence, que le météore dont il s'agit est, comme l'arc-en-ciel, un phénomène de position; c'est-à-dire que chaque observateur voit son aurore boréale à part, puisque le méridien magnétique est différent pour les divers points de la surface du globe.

D'après les détails dans lesquels nous venons d'entrer, il semble que toutes les hypothèses aient été épuisées pour expliquer l'aurore boréale; mais l'incertitude qui reste encore sur tout ce qui concerne ce phénomène, est une nouvelle preuve que ce qu'il y a de plus anciennement connu, n'est pas toujours ce qui l'est le mieux.

2. De la Réflexion et de la Réfraction de la Lumière.

Après avoir exposé la manière dont se propage le fluide lumineux lorsque ses molécules libres (au milieu de l'espace) suivent constamment la route qu'elles ont prises, en partant du corps qui les a lancées, nous avons maintenant à considérer les changemens que subit le même fluide, dans la direction de son mouvement, à la rencontre des corps qui se présentent sur son passage.

Loi de la Réflexion.

1015. Lorsqu'un rayon de lumière, au moment où il arrive à la surface d'un corps, se replie vers le milieu qu'il avait traversé, cette déviation se nomme *réflexion*. L'angle formé par la première direction du rayon avec un plan tangent au point de la surface où le rayon la rencontre, est ce qu'on appelle *l'angle d'incidence*; et l'angle formé par la nouvelle direction du rayon avec le même plan se nomme *l'angle de réflexion*. L'observation prouve que l'angle de réflexion est toujours égal à l'angle d'incidence.

Réflexion sur les Surfaces planes.

1016. Il suit, de ce qui vient d'être dit, que si des rayons parallèles entre eux rencontrent, sous un angle quelconque, une surface réfléchissante qui soit plane, ils resteront parallèles après leur réflexion.

1017. Si les rayons, au lieu d'être parallèles, sont convergens ou divergens, la surface réfléchissante étant toujours plane, ils conserveront, après leur réflexion, le même degré de convergence ou de divergence : par exemple, dans le cas où les rayons sont convergens, on peut considérer l'ensemble des rayons incidens comme un cône tronqué, et les rayons réfléchis comme formant la partie détachée du cône qui s'est placée au-dessus de la surface réfléchissante, de manière que sa base continue de se confondre avec la plus petite base du cône tronqué. Il est facile d'appliquer cette considération aux rayons divergens. On voit par là que, dans la réflexion sur les surfaces planes, les rayons ne font que changer de route, sans que leur position respective soit dérangée. Il n'en est pas de même de la réflexion sur les surfaces courbes : elle fait varier à la fois les directions et les positions respectives des rayons.

Réflexion sur les Surfaces concaves.

1018. Concevons que la surface réfléchissante (*fig. 34*) soit concave et fasse partie d'une surface sphérique : soient *hm*, *ac* deux rayons incidens parallèles ; ayant mené les tangentes *tms*, *ocy*, aux points d'incidence, et, par le point *c*, la sécante *nz* parallèle à *ts*, nous remarquerons que si l'incidence du rayon *ac* se faisait sur la sécante *nz*, *mg* étant le rayon réfléchi qui appartient au rayon incident *hm*, la ligne *ck* parallèle à *mg* serait le rayon réfléchi, relatif au rayon incident *ac*. Si l'on considère maintenant l'incidence du rayon *ac* sur la tangente *oy*, il est évident que l'on aura l'angle *kcy* plus petit que l'angle d'incidence *aco*. Donc, pour donner à *ck* la position qui convient à la ré-

flexion sur cy , il faut augmenter l'angle kcy , et par conséquent le rayon réfléchi, tel que cb , convergera avec mg , et ira le couper.

1019. Supposons que ac , en restant fixe par l'extrémité c , s'écarte du rayon mh par son extrémité a , auquel cas les rayons incidens convergeront entre eux : l'angle d'incidence aco étant augmenté, il faudra que l'angle de réflexion bcy augmente aussi; d'où il suit que les rayons réfléchis convergeront plus que les rayons incidens, puisque ceux-ci sont partis du parallélisme où la convergence était nulle, tandis que cb convergeait déjà avec mg .

Si, au contraire, ac se rapproche de hm par son extrémité a ; auquel cas les rayons incidens divergeront, alors l'angle d'incidence aco se trouvant diminué, l'angle de réflexion bcy diminuera aussi; d'où il suit que les rayons réfléchis mg , cb , convergeront toujours de moins en moins, à mesure que ac s'inclinera vers hm ; de manière qu'à un certain terme mg et cb deviendront parallèles, et qu'au-delà de ce terme, ils seront eux-mêmes divergens, quoique d'une moindre quantité que les rayons incidens qui sont partis du parallélisme.

Tout ce que nous venons de dire renferme le développement et la preuve des principes suivans : la réflexion sur les surfaces concaves sphériques rend convergens les rayons qui étaient parallèles avant leur incidence; elle augmente la convergence de ceux qui convergeaient déjà; et quant à ceux qui divergeaient, elle peut, suivant les circonstances, les rendre convergens, ou parallèles, ou même divergens, quoique toujours moins que les rayons incidens.

Foyer des Rayons parallèles.

1020. Considérons maintenant la réflexion de deux rayons incidens ns , rp (*fig. 35*) parallèles soit entre eux, soit au rayon ao de la sphère à laquelle appartient la surface réfléchissante, et situés à égales distances de ce dernier rayon; ayant mené un second rayon cs au point d'incidence du rayon ns , nous aurons l'angle csn

égal à l'angle esm , puisque ces angles sont les complémens des angles d'incidence et de réflexion nsy et mst ; de plus, à cause de ns parallèle à ca , l'angle csn est égal à scm ; donc le triangle cms est isocèle, d'où il suit que ms est égal à cm ; et puisque ms est plus grande que ma , on aura aussi cm plus grande que ma ; donc les rayons parallèles ns , rp se réfléchiront toujours dans un point situé en dessous de la moitié supérieure cf du rayon ca .

Or, si l'on suppose que les rayons ns , rp se rapprochent, par des degrés égaux, du rayon de la sphère, le point m , où se fait la réflexion, se rapprochera aussi du point f , en sorte que quand ils ne seront plus qu'à une distance infiniment petite de ca , le point où ils se réfléchiront se confondra sensiblement avec le point f .

1021. D'une autre part, si l'on conçoit différens rayons incidens ns , db , ki , etc. (*fig. 36*), tous parallèles à l'axe et également distans les uns des autres, les angles d'incidence de ceux qui sont sensiblement éloignés de l'axe, différeront beaucoup plus entre eux, à mesure qu'ils s'en écarteront, que ceux des rayons voisins du même axe, parce que les inclinaisons des petits arcs sur lesquels tombent les premiers rayons vont en croissant rapidement, au lieu que, dans le voisinage de l'axe, les arcs s'écartent peu de la direction perpendiculaire à l'égard des rayons qui leur correspondent. Il suit de là que, dans un faisceau de rayons qui tombent parallèlement au rayon de la sphère sur la courbure oag , tous ceux qui sont peu distans de l'axe concourent après leur réflexion sur un très petit espace situé à peu près au milieu f du rayon de la sphère. On considère ce petit espace comme un point que l'on appelle *le foyer des rayons parallèles*, et dont nous exposerons dans la suite les propriétés.

Foyer des Rayons divergens.

1022. Le raisonnement que nous venons de faire à l'égard d'un faisceau de rayons parallèles, qui n'aurait qu'une très petite épaisseur, peut s'appliquer, jusqu'à un certain point, à un cône

délié de rayons incidens tels que rs , rm (*fig. 37*), qui partiraient d'un point r de l'axe, pris au-dessus du centre, et dont les directions faisant entre elles de très petits angles, approcheraient elles-mêmes beaucoup du parallélisme. Dans ce cas, les rayons réfléchis sf , mf , et tous les autres qui font partie du cône concourent encore assez sensiblement en f , sur un petit espace, que l'on peut regarder aussi comme une espèce de foyer, et il est facile de juger que la position de ce foyer doit varier en même temps que celle du point r .

Réciproquement, si l'on suppose que le cône de lumière parte de l'un des foyers f , qui ont lieu dans l'hypothèse que nous venons de faire, le point r deviendra, à son tour, le foyer relatif à f considéré comme point de départ. Ces résultats, que nous reprendrons dans la suite avec plus de détail, nous seront utiles pour mieux concevoir les phénomènes que présentent les miroirs concaves (1).

Réflexion sur les Surfaces convexes.

1023. Tous les effets précédens ont lieu en sens contraire dans la réflexion sur les surfaces convexes qui font partie de celle d'une

(1) La position du foyer dont il s'agit ici peut être facilement déterminée à l'aide du calcul. Pour y parvenir, nous allons considérer la chose d'une manière plus générale, qui trouvera aussi son application dans l'exposé des effets produits par les mêmes miroirs. Soient rn , rm (*fig. 38*) deux rayons incidens qui rencontrent la surface concave tgq sous des directions quelconques, pourvu qu'elles fassent entre elles un angle presque infiniment petit. On propose de déterminer le point de concours f des rayons réfléchis ne , my .

Menons le rayon on , puis les sinus ch , ce des angles égaux cnr , cnu , et divisons en deux également les cosinus nh , ne , aux points l , i . Menons aussi nx perpendiculaire sur rm , et nz perpendiculaire sur ym prolongée.

Les petits triangles nxm , nzm ont chacun un angle droit, l'un en x , l'autre en z . De plus, $nmz = fmq = xmn$. Donc les deux triangles, ayant de plus un hypoténuse commune mn , sont semblables et égaux.

De plus, les triangles rns , rxn sont semblables, ainsi que les triangles fzn , fey . Enfin cs et cy pouvant être prises, sans erreur sensible, pour les

sphère; car, si l'on prolonge derrière la surface concave les rayons incidents et les rayons réfléchis qui ont rapport à cette dernière surface, on aura la répétition des mêmes angles d'incidence et de réflexion, relativement à la convexité de la même surface, sur des tangentes communes, avec cette différence, que les rayons qui étaient considérés comme convergens dans le premier cas, seront censés diverger dans le second, et réciproquement. Par exemple, si l'on prolonge derrière la surface ucz (fig. 39) les rayons hm , ac , gm , bc , les rayons incidents relatifs à la convexité de la surface seront $h'm$, $a'c$, parallèles entre eux comme les premiers, et les rayons réfléchis seront mg' , cb' , qui divergeront entre eux.

1024. D'après cela les principes relatifs à la réflexion sur les surfaces convexes sphériques se déduisent de ceux qui ont rapport à la réflexion sur les surfaces concaves, par une simple inversion de termes, en sorte qu'ils doivent être ainsi énoncés: la réflexion sur les surfaces convexes rend divergens les rayons qui

sinus des angles égaux cms , cmr , leurs différences avec les sinus égaux ch , ce sont égales; donc $sh = ey$.

Cela posé, nous aurons d'une part, $rn : rs$ ou $rh :: nx : hs$; et, d'une autre part, $nf : fe :: nz : ey$. Mais $nz = nx$, et $hs = ey$. Donc $rn \downarrow rh :: nf : fe$; ou bien, $rn + rh : rn :: nf + fe : nf$; ou $rn + rn - nh : rn :: ne : nf$.

Soit $rn = a$, nh ou $ne = b$; la proportion deviendra $2a - b : a :: b : nf$

$$= \frac{ab}{2a - b}$$

Si le miroir était convexe vers le point r , on aurait, $nf = \frac{ab}{2a + b}$.

Si l'on suppose que la ligne nr en restant fixe par le point n , s'approche du rayon cn jusqu'à coïncider avec lui, la ligne un tombera aussi sur cn , et les points r , f seront sur la direction de ce même rayon, comme on le voit fig. 37. Alors l'angle d'incidence cnr (fig. 38) devenant nul, son cosinus nh est égal au rayon cn . Soit $cn = d$; nous aurons (fig. 37),

$$nf = \frac{ad}{2a + d}$$

Dans le même cas, si l'on conçoit que le point r s'éloigne à l'infini, la quantité d s'évanouit devant $2a$, et l'on a $nf = \frac{d}{2}$, ce qui est le même résultat auquel nous sommes déjà parvenus (1020) relativement au point f considéré comme foyer des rayons parallèles.

étaient parallèles avant leur incidence; elle augmente la divergence de ceux qui divergeaient déjà, et à l'égard de ceux qui convergeaient, elle peut, suivant les circonstances, les rendre divergens, ou parallèles, ou même convergens, quoique dans un moindre degré que les rayons incidens.

1025. Dans le même cas, la réflexion des rayons parallèles entre eux et à l'axe avant leur incidence, se fera toujours de manière que si l'on prolonge les rayons réfléchis, en dessous de la convexité, il iront se réunir en un point situé entre le milieu du rayon de la sphère et le point où ce rayon coupe la surface réfléchissante; et en appliquant ici le raisonnement que nous avons fait par rapport à la réflexion sur une surface concave, on en conclura que dans un faisceau de rayons qui tombent sur une surface convexe, parallèlement entre eux et à l'axe, ceux qui seront voisins de cet axe tendront à se réunir en un foyer imaginaire, situé à peu près à la moitié du rayon de la sphère.

Loi de la Réfraction.

1026. Lorsque la lumière rencontre un corps diaphane qui lui donne accès dans son intérieur, elle subit une autre espèce de déviation, dont nous allons pareillement exposer les lois. Ces corps que la lumière pénètre, portent en général le nom de *milieu*. Le point par lequel un rayon de lumière entre dans un milieu, s'appelle *point d'immersion*, et celui par lequel il en sort, s'appelle *point d'émergence*. Si le rayon rencontre perpendiculairement la surface d'un milieu, il continue sa route dans ce milieu; mais si l'incidence est oblique à la surface du milieu, le rayon se détourne de sa route, en sorte qu'il paraît rompu au point d'immersion: ce détour s'appelle *réfraction*, et la partie du rayon qui le subit se nomme *rayon rompu* ou *rayon brisé*. L'*angle d'incidence* est celui que fait le rayon incident avec une perpendiculaire menée par le point d'immersion sur la surface du milieu, et l'*angle de réfraction* est celui que fait le rayon rompu avec la même perpendiculaire.

1027. Cela posé, il peut arriver que la lumière passe d'un milieu plus rare dans un milieu plus dense, ou d'un milieu plus dense dans un milieu plus rare. Dans le premier cas, le rayon rompu se rapproche de la perpendiculaire au point d'immersion, et, dans le second, il s'en écarte. De plus, l'observation prouve que le sinus de l'angle d'incidence et celui de l'angle de réfraction sont en rapport constant, lorsque le milieu que quitte la lumière et celui où elle entre restent les mêmes, quelle que soit l'obliquité du rayon incident. Si la lumière passe de l'air dans le verre, le sinus d'incidence sera à celui de réfraction comme 3 est à 2; si elle passe de l'air dans l'eau, le rapport sera celui de 4 à 3.

Le même rapport a lieu en sens contraire, lorsque la lumière se réfracte de nouveau au point d'émergence en rentrant dans le premier milieu, c'est-à-dire que si le retour se fait du verre dans l'air, le rapport des sinus sera celui de 2 à 3, et s'il se fait de l'eau dans l'air, le rapport sera celui de 3 à 4.

1028. Il suit de là que si les deux surfaces du milieu que la lumière traverse de part en part sont parallèles entre elles, la lumière, en repassant dans le milieu environnant, prendra une direction qui sera elle-même parallèle à celle du rayon incident. Plusieurs substances minérales ont la propriété singulière de solliciter le rayon qui les pénètre à se diviser en deux parties qui suivent deux routes différentes : c'est ce que l'on appelle *double réfraction*; nous reviendrons dans la suite sur cette propriété, et nous essayerons d'en donner la théorie relativement au minéral connu sous le nom de *spath d'Islande*, qui se prête plus facilement que les autres à l'observation du phénomène.

Réfraction dans les Milieux terminés par des Surfaces courbes.

1029. On peut considérer une surface courbe comme un assemblage d'une infinité de petits plans diversement inclinés entre eux. Lorsqu'un cône de lumière tombe sur une portion d'une de

ces surfaces, et que le corps auquel appartient celle-ci est diaphane, chaque rayon subit à l'égard du petit plan qui le reçoit une réfraction soumise à la loi que nous venons d'exposer. Mais à cause des inclinaisons respectives de tous les petits plans qui composent la surface réfringente, les rayons réfractés prennent, les uns à l'égard des autres, des positions qui dépendent de la figure du milieu, et, suivant les circonstances, ils tendent vers un même point, par des directions convergentes, ou divergent plus fortement que les rayons incidens. C'est en étudiant ces différentes marches de la lumière ainsi réfractée que les opticiens sont parvenus à construire ces instrumens si utiles, à l'aide desquels les rayons envoyés par un corps que l'œil abandonné à lui-même ne pourrait distinguer, arrivent à cet organe dans le même ordre que si l'objet était venu se mettre à sa portée, et le lui rendent visible, en le lui montrant où il n'est pas.

Cas où le Milieu est terminé par une seule Surface courbe.

1030. Soit mhn (fig. 40) une portion de surface sphérique, et soient sk , st deux rayons incidens partis d'un point s pris sur le prolongement de l'axe ch . Supposons que ces rayons soient très voisins du même axe, et fassent avec lui des angles égaux. Les perpendiculaires ug , zl , aux points d'immersion, sont nécessairement sur les prolongemens de deux rayons du cercle auquel appartient l'arc mhn , et dont le centre est en c ; donc ces perpendiculaires convergent vers l'axe ch , et si nous supposons que le milieu M dont la matière de la sphère est composée, soit plus dense que le milieu E parcouru par les rayons incidens, il est facile de voir que les rayons rompus kx , ty , en se rapprochant des perpendiculaires, se rapprocheront aussi de l'axe. De plus, si le point s est à une distance convenable de la surface mhn , les mêmes rayons convergeront vers un point f de l'axe où ils se réuniront. Tous les autres rayons partis du point s que l'on appelle le point *radieux*, et qui composent avec les précédens un cône

infiniment délié, dont la base a le point h pour centre et le petit arc lt pour diamètre, convergeront de même les uns vers les autres, en sorte qu'il se formera derrière la surface mhn un nouveau cône opposé au premier par sa base, et dont le sommet sera en f . A la rigueur, ce sommet est plutôt un espace, dont le point f fait partie, mais qui est censé, à cause de sa petitesse, se confondre avec ce point que l'on nomme le *foyer* des rayons partis du point radieux s .

1031. C'est principalement sur la considération des foyers qu'est fondée la construction des instrumens d'optique, parce que les images que nous observons, à l'aide de ces instrumens, ne sont autre chose que des assemblages de foyers, qui proviennent des points radieux situés à la surface des memes objets; d'où il résulte que les distances entre ces points et les verres auxquels ils envoient des rayons, varient continuellement, à mesure que le spectateur change de position, ou qu'il observe successivement divers objets plus ou moins éloignés.

1032. Concevons, par exemple, que le point s étant d'abord dans la position que représente la figure, se trouve transporté en s' (*fig. 41*), à une plus grande distance de la surface réfringente. Les rayons incidens $s'k'$, $s't'$, étant toujours censés former des angles presque infiniment petits avec l'axe $s'h'$, il en résulte que pendant les divers mouvemens que peut faire le point s' , en s'écartant plus ou moins sensiblement de la surface réfringente, le petit arc $k't'$ ne varie que d'une quantité extrêmement petite; et, par une suite nécessaire, les rayons incidens $s'k'$, $s't'$ divergent moins entre eux que les rayons sk , st (*fig. 40*). Donc les premiers faisant avec les perpendiculaires aux points k' , t' (*fig. 41*), de plus petits angles que quand le point radieux était en s (*fig. 40*), les rayons réfractés $k'f'$, $t'f'$ (*fig. 41*) qui leur correspondent, seront aussi plus voisins des mêmes perpendiculaires que les premiers. Ils convergeront donc davantage l'un vers l'autre, en sorte que le foyer f' qu'ils formeront, en se réunissant soit entre eux, soit avec les autres rayons, sera situé à une plus petite distance de la surface réfringente que le foyer f (*fig. 40*).

1033. A mesure que le point s' s'écartera de la surface mhn ,

le foyer f' (*fig. 41*) se rapprochera de plus en plus de la même surface. Ce mouvement atteindra sa limite, lorsque le point radieux s' étant à une distance de la surface réfringente que l'on puisse regarder comme infinie, les rayons incidents $s'k'$, $s't'$ seront censés être parallèles entre eux. Cette supposition a lieu à l'égard des objets très éloignés que l'on observe à l'aide d'un instrument d'optique.

1034. Reprenons le cas où le point radieux était situé en s (*fig. 40*), et supposons que ce point s'approche au contraire de la surface réfringente. Un raisonnement analogue à celui que nous avons fait par rapport au cas précédent prouvera que le nouveau foyer doit se former alors au-delà du foyer f . A mesure que la distance diminuera entre le point s et la lentille, les rayons réfractés convergeront toujours moins entre eux; il y aura un terme où ils deviendront parallèles, de manière que le foyer s'évanouira, et, passé ce terme, ils divergeront, comme on le voit (*fig. 42*), quoique d'une moindre quantité que les rayons incidents (1). Alors il faudra les prolonger en dessus de la surface réfringente pour avoir leur point de réunion, qui se trouvera en f , du même côté que le point radieux s , mais à une plus grande

(1) On parvient facilement, par le calcul, à des formules générales, qui représentent ces différens cas. Soit st (*fig. 43*) le même rayon incident que *fig. 40*. Il s'agit de déterminer la distance du point f à la surface réfringente, en supposant d'abord que le rayon réfracté tq converge vers l'axe. Si nous menons cd (*fig. 43*) perpendiculaire sur tq , et ce perpendiculaire sur le prolongement du rayon incident st , l'angle etc étant égal à l'angle d'incidence stz , et l'angle ctd étant l'angle de réfraction, ce et cd seront les sinus de ces angles. Soit $ce = 1$, $cd = m$, $sh = b$ et $hc = a$. Les triangles semblables shc , sec donnent $ht : ce :: sh : se = cs$, à cause de la petitesse de l'angle ese , ou bien, $ht : 1 :: b : b + a$. D'une autre part, les triangles semblables shc , fdc donnent $ht : cd :: ft = fh : cf$; ou bien $ht : m :: cf + a : cf$. Donc $\frac{b}{b+a} = m \left(\frac{cf+a}{cf} \right)$, ou $\frac{b}{m(b+a)} = \frac{cf+a}{cf}$. Donc $cf + a : cf :: b : m(b+a)$ et $cf + a : cf + a - cf :: b : b - mb - ma$; d'où l'on tire $cf + a$ ou $fl = \frac{ab}{(1-m)b - ma}$.

Le résultat précédent a lieu toutes les fois que $(1-m)b$ est plus grand

distance de la même surface. On donne, dans ce cas, au point f , le nom de *foyer virtuel* ou de *foyer imaginaire*, pour le distinguer du *foyer réel*, qui a une existence physique, déterminée par la réunion effective des rayons réfractés.

Le point s continuant de s'approcher de la surface réfringente, la divergence des rayons réfractés augmentera, d'où il est facile de conclure que pendant le mouvement du point s , le foyer imaginaire se placera aussi toujours plus près de la même surface.

1035. On voit, par ce qui précède, que quand le point radieux et le foyer sont situés de deux côtés opposés de la surface réfringente, la distance du foyer à cette surface décroît à mesure que celle du point radieux augmente, et réciproquement; mais si le foyer est placé du même côté que le point radieux, les deux distances croissent et décroissent en même temps. On peut généraliser davantage cet énoncé, en disant que les mouvemens du point radieux et du foyer ont toujours lieu suivant la même direction, quelles que soient les positions de ces points, par rapport à la surface réfringente.

1036. Nous ajouterons ici la démonstration d'un cas particulier, qui a lieu quelquefois dans la vision, à l'aide des instrumens d'optique. Supposons que les rayons incidens yk , st (*fig. 45*) étant parallèles, rencontrent la surface mn sous différens degrés d'obliquité, de manière que l'un soit en dedans et l'autre en de-

que ma . Mais si ces quantités sont égales, alors le dénominateur $(1-m)b - ma$ devenant zéro, la quantité $cf + a$ devient infinie. C'est le cas où les rayons rompus sont parallèles entre eux.

Si $(1-m)b$ est plus petit que ma , alors le rayon réfracté tq diverge à l'égard de l'axe, comme on le voit *fig. 44*. En même temps le point f se trouve transporté du côté opposé, c'est-à-dire, en dessus de l'arc ma , et la formule devient $fh = \frac{ab}{(m-1)b + am}$, où les signes se trouvent changés dans le dénominateur. On peut vérifier cette formule, en appliquant à la figure 44 le calcul relatif à la figure 43.

Dans le cas où les rayons incidens sont parallèles, sh ou b devenant infinie, am s'évanouit, et l'on a $cf + a = \frac{ab}{(1-m)b} = \frac{a}{m-1}$.

hors de l'intervalle entre les perpendiculaires ug , zl . Les rayons réfractés kx , tq convergeront encore l'un vers l'autre. Pour le prouver, imaginons que les rayons yk , st tombent d'abord sur deux petites surfaces planes de , ab (*fig.* 46), qui soient de niveau ; il est évident que les rayons rompus kx , tq seront parallèles. Concevons maintenant que la petite surface ab tourne autour du point d'immersion t , de manière à prendre la position $a'b'$, et qu'en même temps la perpendiculaire zl tourne d'une quantité égale, en passant à la position $z'l'$, tandis que les rayons st et tq resteront fixes; les deux petites surfaces de , $a'b'$ pourront être alors considérées comme faisant partie d'une surface courbe. Or l'angle d'incidence stz sera augmenté de la quantité ztz' , et l'angle de réfraction ltq le sera d'une quantité égale ll' , et il est clair que si les sinus variaient comme les angles, le sinus de réfraction serait trop augmenté pour que le rapport restât le même. Par exemple, si ce rapport était celui de 3 à 2, l'accroissement de l'angle de réfraction ne devrait être que les $\frac{2}{3}$ de celui de l'angle d'incidence, au lieu de lui être égal. Mais le sinus de réfraction se trouve encore plus augmenté à proportion de celui d'incidence, que dans l'hypothèse précédente, parce que si l'on augmente deux angles de la même quantité, le sinus du plus petit angle croîtra dans un plus grand rapport que celui du plus grand angle : donc, pour que le rapport entre les sinus reste le même, il faut que l'angle ltq diminue, et par conséquent le rayon rompu tq se rapprochera de la nouvelle perpendiculaire $l'l'$, c'est-à-dire qu'il convergera vers l'autre rayon rompu kx .

1037. Si le milieu M (*fig.* 47) est plus rare que le milieu E , il est facile de voir que les rayons rompus kx , tq , faisant avec les perpendiculaires ug , zl , des angles plus ouverts que ceux d'incidence, divergeront encore plus que les rayons incidens sk , st . Il y aura, dans ce cas, un foyer imaginaire situé en f' , c'est-à-dire plus près de la surface réfringente que le point radieux; et si l'on suppose que le point s fasse des mouvemens d'un côté ou de l'autre de sa position actuelle, on concevra, avec un peu d'attention, que ceux du foyer doivent avoir lieu encore ici dans la même direction. Par exemple, si le point radieux s s'écarte de la

surface réfringente, les angles sku , stz étant diminués, les angles de réfraction gkx , ltq le seront aussi, d'où il suit que les prolongemens des rayons xk , qt , iront couper l'axe au-dessus du point f' . Lorsque le point radieux est à une distance censée infinie par rapport à la surface réfringente, les rayons réfractés divergent encore, quoique d'une moindre quantité, que dans les cas précédens.

1038. Si le milieu réfringent M est concave, comme on le voit *fig. 48*, et en même temps plus rare que le milieu E , les rayons réfractés kx , tq , divergeront plus que les rayons incidens sk , st , et ainsi leur divergence continuera d'exister, quoique dans un degré moins sensible, au terme où les rayons incidens deviendront parallèles. Dans ce dernier cas, ainsi que dans chacun des cas précédens, le foyer sera imaginaire et situé du même côté que le point radieux; et les mouvemens de l'un et de l'autre point se correspondront aussi, quant à leur direction. Si le premier milieu est au contraire plus dense que le second, les rayons réfractés s'écartant plus des perpendiculaires que les rayons incidens, divergeront moins après leur réfraction, ou seront parallèles, ou deviendront même convergens. On conçoit que ce dernier cas doit avoir nécessairement lieu, lorsque le point radieux, étant censé à une distance infinie de la surface réfringente, les rayons incidens sont parvenus au parallélisme. Il sera facile d'appliquer encore aux différentes circonstances que nous venons d'énoncer, le principe relatif aux mouvemens du foyer comparés avec ceux du point radieux (1035).

Cas où le Milieu est terminé par deux Surfaces courbes opposées.

1039. Concevons une seconde surface courbe mln (*fig. 49*), qui ait le même axe que la première mhn , et soit située de manière que les deux concavités se regardent, auquel cas le milieu M prend le nom de *lentille*. Si ce milieu est plus dense que le milieu environnant E , et que le point radieux s soit à une telle distance de la lentille, que les rayons réfractés kx , tq , convergent l'un vers l'autre, il est aisé de voir que les rayons émergens conver-

gèrent encore davantage, en s'écartant des perpendiculaires aux points x , g , et ainsi le point f , dans lequel ils se réuniront sur l'axe de la lentille, sera plus voisin de la surface mn , que dans le cas où les rayons kx , tg auraient continué leur route, sans aucune déviation (1).

1040. Si le point s vient à s'écarter de la lentille, la convergence des rayons réfractés augmentera (1032), et cette circonstance déterminera le point f à s'approcher continuellement de la surface mn . Lorsque le point s est à une distance infinie de la lentille, le foyer f (fig 51) prend le nom de *foyer des rayons*

(1) Soit mn (fig. 50) une lentille d'une matière plus dense que le milieu environnant, et st un rayon très voisin de l'axe, qui après s'être réfracté suivant tt' dans la lentille en convergeant avec l'axe, repasse dans le milieu environnant suivant une direction $t'f$. Voici comment on peut déterminer la distance hf de ce point à la lentille, en supposant que celle-ci soit assez mince pour que son épaisseur puisse être négligée.

Prolongeons tt' jusqu'à ce qu'elle rencontre l'axe en f' . Soient c , c' les centres des deux courbes, que l'on peut supposer, si l'on veut, appartenir à deux sphères différentes. Soit toujours $sh = b$ et $hc = a$. Le point f' étant le point de concours des rayons partis de s , dans l'hypothèse où la convexité mha existerait seule, nous aurons, comme ci-dessus (1034), $fh = \frac{ab}{(1-m)b - ma}$.

Soit maintenant $c'h' = c$, et $fh' = z$. Pour avoir une seconde valeur de fh qui renferme z , considérons le rayon ft' comme allant du point f vers la surface convexe $mh'n$, pour se réfracter dans le milieu M , suivant une direction $t't$ qui diverge par rapport à l'axe. Ce cas sera semblable à celui de la figure 44, et ainsi f' (fig. 50) sera le point où le rayon réfracté rencontre l'axe, en se plaçant du même côté que le rayon incident. Or, nous avons eu (1034) dans ce dernier cas, $fh = \frac{ab}{(m-1)b + am}$. Mais ici fh (fig. 44) devient fh' (fig. 50), ou son égale $f'h$; a devient c , et b devient z . Donc la formule se change en celle-ci, $fh = \frac{cz}{(m-1)z + cm}$. Egalant les deux valeurs de fh , on a $\frac{cz}{(m-1)z + cm} = \frac{ab}{(1-m)b - ma}$, d'où l'on tire

$$z = \frac{mabc}{(1-m)(bc + ab) - mac}$$

Si les deux surfaces appartiennent à des sphéricités égales, on aura $c = a$, et la formule sera $z = \frac{mab}{(1-m)ab - ma}$.

parallèles, r li tif à la position respective des rayons incidens (1). On l'appelle aussi *foyer principal*, ou simplement *foyer*, parce qu'il répond à la limite où les rayons émergens approchent le plus de se réunir exactement dans un point unique.

1041. Remettons le point radieux s dans la situation indiquée par la figure 49, et supposons qu'il la quitte pour s'approcher de la lentille. Les rôles alors étant changés, le point f à son tour fuira la lentille de plus en plus. A un certain terme, les rayons xf , qf , arriveront au parallélisme, et si le point radieux continue de se mouvoir vers la lentille, les mêmes rayons commenceront à diverger, et leur foyer deviendra imaginaire. Si la lentille était au contraire d'une matière moins dense que le milieu environnant, on aurait des effets différens, qui ont été pareillement déterminés par les physiciens.

1042. Tout ce que nous avons dit (1035) de la correspondance les mouvemens du point radieux et du foyer, lorsqu'il n'y a qu'une seule surface réfringente, s'applique également au cas où le milieu est d'une forme lenticulaire. Ces mouvemens se font toujours dans le même sens, soit que les deux points interceptent la lentille, ou que le foyer se trouve du même côté que le point radieux.

1043. On peut aussi supposer que le corps diaphane soit *biconcave*, c'est-à-dire que ses deux surfaces se regardent par leurs convexités, ou qu'il soit concave d'un côté et convexe de l'autre, auquel cas il prend le nom de *ménisque*, ou enfin qu'il soit *plan convexe* ou *plan concave*. Ces diverses configurations combinées avec la différence de densité qui peut exister entre les deux milieux, ont conduit à une multitude de résultats divers, parmi lesquels nous nous réservons à exposer ceux dont nous aurons besoin dans la suite, à mesure qu'ils seront amenés par le sujet même, attendu qu'il sera facile de les déduire de ce qui précède.

1044. Nous observerons, en terminant cet article, que c'est la même chose de considérer une lentille comme restant dans une

(1) Dans ce cas, la quantité ma s'évanouit dans le dénominateur, et la formule devient $z = \frac{ma}{2(1-n)}$.

position fixe, et de faire varier celle du point radieux, ou de supposer que ce dernier point étant immobile, ce soit la lentille qui change de position par un mouvement égal. Car il est évident que, dans l'un et l'autre cas, les dimensions du cône de lumière dont le sommet coïncide avec le point radieux, et dont la base repose sur la lentille, subissent les mêmes changemens.

Analogie entre la Réfraction et la Réflexion.

1045. Jusqu'ici nous avons considéré la réflexion et la réfraction comme deux effets séparés, et qui avaient lieu indépendamment l'un de l'autre. Mais l'observation prouve que les rayons qui tombent sur la surface d'un milieu réfringent d'une densité différente de celle du milieu dans lequel ils étaient mus, ne pénétrèrent pas tous le second milieu, en sorte qu'une partie est réfléchie au contact des deux milieux. Supposons d'abord que le second milieu soit plus rare que le premier : à mesure que les rayons, en partant de l'incidence perpendiculaire, s'inclineront davantage sur la surface du second milieu, le nombre des rayons qui échappent à la réfraction deviendra plus considérable, et il y aura un terme où ils seront tous réfléchis. Ce dernier effet est donné immédiatement par la loi même de la réfraction, en sorte que l'on peut déterminer, d'après le rapport entre les sinus d'incidence et de réfraction, l'inclinaison sous laquelle il a lieu ; car puisque, dans le cas dont il s'agit, le sinus de réfraction est toujours plus grand que celui d'incidence, il est clair qu'il y a tel degré d'inclinaison où l'angle d'incidence étant encore aigu, l'angle de réfraction est droit, en sorte que la direction des rayons rompus coïncide avec la surface du contact des deux milieux ; et si l'on augmente encore l'angle d'incidence, celui de réfraction deviendra obtus, et les rayons se relèveront au-dessus de la surface du contact. Chacun de ces rayons ne se dirige point alors comme le côté de l'angle obtus qui résulte de la loi de réfraction, mais il fait son angle de réflexion égal à l'angle d'incidence. Nous en donnerons bientôt la raison.

1046. Il suit de ce qui vient d'être dit, que, pour un milieu

donné, le rapport entre le sinus de l'angle d'incidence sous lequel commence la réflexion totale, et le rayon, est le même que celui des sinus qui mesurent la réfraction dans le même milieu : par exemple, lorsque la lumière passe de l'eau dans l'air, les sinus étant en général comme 3 est à 4, la réflexion totale commencera sous l'angle d'incidence de $48^{\text{d}} 35'$, dont le sinus est les $\frac{3}{4}$ du rayon.

1047. Si le second milieu est au contraire plus dense que le premier, il y aura aussi une partie des rayons qui seront réfléchis au contact des deux milieux : mais cette partie est en général moins considérable que dans le cas précédent, et quelque oblique que soit l'incidence, il y a toujours des rayons réfléchis et d'autres qui sont réfractés ; de manière cependant que le nombre des premiers va en augmentant et celui des seconds en diminuant, à mesure que l'obliquité des rayons incidens devient plus grande. On conçoit qu'alors cette obliquité ne peut jamais être telle que le sinus de réfraction devienne égal au rayon, parce qu'il est toujours plus petit que celui d'incidence.

C'est en conséquence de cette portion de rayons qui se réfléchissent en échappant à la réfraction, que la surface d'une eau tranquille et celle des autres corps transparens font, jusqu'à un certain point, l'office de miroirs.

1048. Nous venons de voir que le terme où tous les rayons qui tendent à passer d'un milieu dans un autre plus rare sont réfléchis, dépend du rapport entre le sinus d'incidence et celui de réfraction ; en sorte que quand ces sinus diffèrent davantage l'un de l'autre, l'angle d'incidence qui répond à la réflexion totale est plus petit, ou, ce qui revient au même, si l'on suppose que les rayons, en partant de l'incidence perpendiculaire s'inclinent par degrés sur la surface de contact des deux milieux, ils parviennent plus tôt à la réflexion totale. Et parce que le rapport entre les sinus dépend à son tour de la différence entre les densités des deux milieux, il en résulte que quand cette différence est plus grande, la réflexion totale se fait sous une moindre obliquité.

Mais de plus, dans toutes les incidences qui précèdent celle où la totalité des rayons est réfléchie, le nombre de ceux qui su-

bissent la réflexion partielle dont nous avons parlé (1045) est plus considérable, sous une inclinaison donnée, lorsque l'incidence requise pour la réflexion totale est plus petite, en sorte qu'il existe à cet égard, une sorte de corrélation entre les deux réflexions. De là il suit que la portion de rayons qui se réfléchissent, au lieu de se réfracter, est plus grande sous une incidence donnée, lorsque les densités des deux milieux diffèrent davantage entre elles, et plus petite, lorsqu'elles diffèrent moins; de manière que si elles étaient égales, tous les rayons passeraient du premier milieu dans le second. Newton compare l'ensemble des deux milieux, dans ce cas, à une masse d'eau limpide, divisée en deux portions par une surface imaginaire qui transmet tous les rayons, sans en réfléchir aucun (1).

La même chose a lieu, proportion gardée, lorsque la lumière passe d'un milieu dans un autre plus dense, quoique, dans ce cas, il ne puisse y avoir de réflexion totale. Le nombre des rayons réfléchis à la surface de contact, sous une incidence donnée, s'accroît aussi à mesure que la différence elle-même est plus grande entre les deux milieux. Seulement ce nombre paraît être plus petit, toutes choses égales d'ailleurs, que dans le premier cas où un milieu plus rare succède à un milieu plus dense.

*Raisons de croire que la Réfraction et la
Réflexion ne sont pas produites par une
cause mécanique.*

Reprenons maintenant tous les faits qui viennent d'être exposés; et voyons jusqu'où la théorie est parvenue dans la recherche des causes d'où dépendent la réflexion et la réfraction.

1049. On a d'abord essayé d'expliquer ces effets, comme beaucoup d'autres, d'après les lois ordinaires de la Mécanique. On a raisonné par rapport à la réflexion, comme si les molécules de la lumière ayant un ressort parfait, les surfaces qui la réfléchissent

(1) *Optice Lucis*, lib. II, pars III, propos. I.

régulièrement étaient elles-mêmes parfaitement polies. Dans cette hypothèse, rien n'était si simple à concevoir que l'égalité des angles de réflexion et d'incidence, si en même temps on considérait les molécules de la lumière comme étant d'une forme globuleuse. La force de chaque globule étant oblique sur le plan de réflexion, se décomposait en deux autres forces, dont l'une, perpendiculaire au plan, était d'abord détruite par la résistance de ce plan, puis restituée tout entière en sens contraire par l'effet du ressort; l'autre, parallèle au plan, subsistait sans altération, et, se combinant avec la précédente, produisait un nouveau mouvement en diagonale, incliné sur le plan précisément de la même quantité que le mouvement primitif.

1050. Mais ces explications, et d'autres du même genre, qui réduisaient tout aux lois ordinaires du choc des corps, pouvaient paraître satisfaisantes, lorsque l'on considérait la réflexion sous un point de vue isolé, et que l'on attribuait aux actions des forces qui la produisent une précision mathématique. Newton, accoutumé à porter ses regards sur l'ensemble des faits, trouva dans leur rapprochement de fortes raisons à alléguer contre la théorie adoptée jusqu'alors; et examinant ensuite la réflexion en elle-même, il jugea que le mécanisme dont on l'avait fait dépendre ne pouvait être celui de la nature.

1051. Voici les principales considérations sur lesquelles il fonde son sentiment (1). Lorsque la lumière passe du verre dans l'air, le nombre des rayons qui échappent à la réfraction et se réfléchissent au contact des deux milieux, est aussi grand ou même plus grand que quand le passage se fait de l'air dans le verre. Il faudrait donc dire que l'air est plus propre à la réflexion que le verre, ce qui n'est nullement vraisemblable; mais quand cela serait, on n'y gagnerait rien, car si le verre est placé sous un récipient purgé d'air, la réflexion au passage du verre dans le vide, sera aussi forte ou même plus forte que quand l'air existait.

1052. De plus, lorsque la lumière passe du verre dans l'air sous

(1) *Optice Lucis*, lib. II, pars III, propos. VIII.

un angle d'incidence moindre que 40 ou 41^d , une partie des rayons pénètre l'air en s'y réfractant, et lorsque l'angle d'incidence surpasse 41^d , tous les rayons sont réfléchis. Croira-t-on qu'un petit changement d'obliquité suffise pour que la lumière, qui trouvait jusqu'alors dans l'air un certain nombre de routes ouvertes, n'y rencontre plus que des parties solides qui la réfléchissent, surtout si l'on considère qu'au passage de l'air dans le verre, quelque grande que soit l'obliquité, il y a toujours un certain nombre de rayons qui pénètrent le verre? On se figurera peut-être que, dans le premier cas, ce n'est point l'air, mais la dernière surface du verre qui produit la réflexion. Mais si l'on met le verre en contact avec de l'eau, une grande partie des rayons se transmettront à travers l'eau, sous la même incidence qui déterminait une réflexion totale lorsque l'air existait à la place de l'eau. Il paraît donc que la réflexion et la transmission des rayons ne dépendent point de la manière dont ils rencontrent les parties propres du verre, mais d'une certaine disposition de l'air ou de l'eau qui avoisine le verre.

1053. Newton, après avoir développé plusieurs autres raisons, qui supposent la connaissance de certains effets dont nous parlerons dans la suite, remarque que, dans l'hypothèse où la réflexion se ferait en vertu du choc des rayons contre les molécules solides des corps, les surfaces des miroirs ne pourraient renvoyer la lumière avec cette exactitude et cette régularité qui ont lieu dans la nature. On ne peut présumer que le travail de l'art, en employant le sable, et d'autres matières analogues, réussisse tellement à polir le verre, que les dernières molécules de cette substance deviennent parfaitement lisses, que leurs surfaces soient exactement planes ou sphériques, qu'elles se trouvent toutes tournées dans le même sens, et composent une surface unique qui soit partout semblable à elle-même. Ce qu'on appelle polir le verre, n'est autre chose que rendre imperceptibles pour nos yeux les aspérités qu'ils y apercevaient et les remplacer par d'autres aspérités plus petites. Il en résulte que si la lumière était réfléchie par les parties propres du verre, elle se disperserait de tous côtés sur les surfaces polies avec le plus de soin, comme sur les

plus raboteuses. Comment donc arrive-t-il que la réflexion se fasse si régulièrement sur les premières ? Il ne paraît pas que l'on puisse sortir autrement de cette difficulté, qu'en faisant dépendre la réflexion d'une certaine force répandue uniformément sur toute la surface du verre, et dont l'action s'exerce à une très petite distance. Nous parlerons dans la suite de quelques observations qui prouvent que les corps agissent sur les rayons de la lumière.

1054. Tout ce qui vient d'être dit acquerra un nouveau degré de vraisemblance, par les détails dans lesquels nous allons entrer sur la théorie de la réfraction. On a tenté de ramener aussi cette inflexion de la lumière aux lois de la Mécanique, en la faisant dépendre de la résistance plus ou moins grande des milieux qu'elle pénétrait. Mais ici la théorie paraissait être en opposition avec ces mêmes lois ; car on démontre qu'un corps qui passe, par exemple, de l'air dans l'eau sous une direction oblique à la surface de ce liquide, s'y réfracte en s'écartant de la perpendiculaire, et cela en conséquence de ce que le second milieu est plus résistant que le premier. La lumière, au contraire, en passant de l'air dans l'eau, se rapproche de la perpendiculaire, d'où il paraît s'ensuivre que les milieux plus denses résistent moins au mouvement de la lumière que ceux qui sont plus rares. Comme on ne pouvait attribuer cette moindre résistance à la nature même du milieu, on a imaginé que la réfraction se faisait par l'intermède d'un fluide subtil qui occupait les pores du milieu, et qui étant d'autant plus pur et plus dégagé de tout mélange avec les fluides plus grossiers, que les pores étaient plus petits, devenait par là même moins résistant dans les milieux plus denses.

Explication physique de la Réfraction.

Newton a proposé une manière beaucoup plus heureuse d'expliquer la réfraction, à l'aide de l'attraction dans les petites distances. Voici en quoi consiste cette explication.

1055. Soit sy (*fig. 52*) un rayon de lumière qui pénètre l'air suivant une direction oblique à la surface du milieu ABCD, que nous supposons plus dense que l'air. Ayant prolongé CB jusqu'à

ce que Bz soit égale au rayon de la sphère d'activité sensible du milieu $ABCD$, puis ayant pris sur BC la partie Bz égale à Bz , menons rp et zu parallèles à AB . Dès que le rayon aura touché la ligne rp , il commencera à être plus attiré par le milieu AC que par l'air; et cette attraction, s'exerçant suivant yn perpendiculaire sur AB , se combinera avec la vitesse suivant xy , en sorte que le rayon se détournera de sa route, en décrivant la diagonale d'un petit parallélogramme formé sous les directions des deux forces qui le sollicitent. A mesure qu'il s'approchera de AB , il sera attiré plus fortement par le milieu AC , en sorte que sa vitesse, pour s'approcher de ce milieu, s'accélérera par des degrés dont les différences iront en augmentant, sans que la vitesse horizontale soit changée, et qu'en même temps son mouvement continuera de s'infléchir à chaque instant; d'où l'on voit qu'il décrira une ligne courbe yt , dont la concavité sera tournée vers AB ; lorsque le rayon sera arrivé au-dessous de la ligne AB , il se trouvera attiré à la fois de haut en bas par les parties du milieu qui lui seront inférieures, et de bas en haut par les parties supérieures; et comme l'attraction de ces dernières parties s'étend d'abord à une distance moindre que le rayon Bz de la sphère d'activité du milieu, tandis que celle des parties inférieures agit dans toute l'étendue du même rayon, il s'ensuit que le mouvement du rayon de lumière yt continuera de s'accélérer, mais par des degrés dont les différences iront en décroissant, et ainsi la nouvelle portion de courbe tf qu'il décrira sera tournée dans le même sens que la première; mais aussitôt que le rayon touchera la ligne uz , il se trouvera entièrement prolongé dans la sphère d'activité du milieu, et alors, étant attiré également de tous côtés, il prendra un mouvement rectiligne dirigé selon la tangente fk à l'extrémité de la courbe ytf .

Il est clair que le rayon, en décrivant cette courbe, se rapproche de la perpendiculaire ctm , au point d'immersion; et comme la courbe est extrêmement petite, la route du rayon paraît n'être composée que de deux lignes droites, situées comme sy et fk , et qui se coupent au point d'immersion.

Les mêmes effets se répètent dans un ordre inverse, depuis le

point k , dont la distance à la ligne DC est égale au rayon Bz de la sphère d'activité sensible du milieu, en sorte que le rayon de lumière décrit ici une seconde courbe kie semblable à la première, mais dont la concavité est tournée en sens opposé: d'où il suit que quand le rayon n'est plus attiré que par l'air environnant, il se meut en ligne droite suivant el , en s'écartant de la perpendiculaire gio , au point d'émergence, en sorte que l'angle formé par el avec oi est égal à celui que forment entre elles les lignes sy , ct , c'est-à-dire, que el est parallèle à sy .

1056. L'attraction de l'air se combine avec celle du milieu AC jusqu'à une certaine limite située à une distance de AB ou de CD moindre que Br; et comme elle agit toujours plus faiblement que celle du milieu AC, à laquelle sa direction est contraire, son effet se borne à modifier un peu la figure de la courbe ytf ou kie , dont la concavité restera tournée dans le même sens. D'ailleurs, il est facile de voir que les petites altérations que subit la force du milieu AC, de la part de celle de l'air, étant les mêmes de part et d'autre à des distances respectivement égales de AB et de CD, les deux courbes ytf , kie ne laisseront pas de se ressembler; en sorte que tout compensé, le mouvement du rayon peut être considéré comme produit par une seule force accélératrice variable entre certaines limites voisines des lignes AB, CD, et qui éprouve, de part et d'autre, les mêmes changemens en sens opposé (1).

La théorie précédente suppose que la lumière se propage par émission; et ainsi, dans cette hypothèse, la réfraction s'explique plus heureusement que dans celle de pression.

1057. Comme la lumière est transmise par un milieu quelconque dans toutes les directions possibles, il faut concevoir qu'il en est

(1) Nous avons dit (1027) que, relativement à un même milieu, le sinus d'incidence est en rapport constant avec celui de réfraction: c'est ce que nous allons démontrer à l'aide d'un principe qui tient à la théorie des forces accélératrices. Soit toujours AB (fig. 53) la surface du milieu réfringent que nous supposons plus dense que l'air, st le rayon incident, ti le rayon réfracté, bm la perpendiculaire au point d'immersion, et sb , im deux perpendiculaires

des molécules des corps diaphanes comme de celles de la lumière elle-même, c'est-à-dire, que les distances entre ces molécules sont incomparablement plus grandes que leurs épaisseurs. Les physiciens qui admettent la propagation de la lumière par pression sont conduits à la même conséquence. Bouguer a cru pouvoir éluder la difficulté en supposant que les parties solides des corps diaphanes qui se trouvaient sur la direction des rayons de lumière transmettaient l'action de ces rayons en suppléant à la matière subtile dans les petits espaces où celle-ci se trouvait interrompue; mais il n'est nullement probable que ces parties aient la figure, la disposition et le degré d'élasticité nécessaires pour pro-

sur cette même ligne. Si st représente en même temps la vitesse du rayon dans l'air, on pourra décomposer cette vitesse suivant deux directions sb et bt , dont la première représentera la vitesse horizontale du rayon incident, et l'autre sa vitesse verticale. Supposons que l'on ait pris ti , de manière que im soit égale à bs ; la vitesse horizontale étant toujours la même pendant que le rayon se meut suivant ti , puisque l'action de la force accélératrice ne peut apporter aucun changement à cette vitesse, elle sera encore représentée par im égale à bs ; d'où il suit que la vitesse verticale relative au mouvement suivant ti sera représentée par tm . Or, le principe dont nous avons parlé consiste en ce que la quantité dont le carré de la vitesse verticale se trouve augmenté par l'effet de la force attractive du milieu est une constante, quelle que soit la direction du rayon incident; c'est-à-dire, que si l'on désigne par u^2 le carré de la vitesse bt , et par V^2 celui de la vitesse tm , la différence $V^2 - u^2$ sera une constante. Soit d^2 cette différence, et soit h la vitesse horizontale bs . Prenons sur ti la partie tz égale à st , puis, par le point z , menons zy parallèle à im ; bs , on son égale im , représentera le sinus d'incidence, et zy celui de réfraction. Or, $zy : im :: tz : ti$. Mais tz ou $ts = \sqrt{(bt)^2 + (bs)^2} = \sqrt{u^2 + h^2}$; $ti = \sqrt{(tm)^2 + (im)^2} = \sqrt{u^2 + d^2 + h^2}$.

Donc le rapport entre tz et ti , ou entre les sinus zy et im est $\sqrt{\frac{u^2 + h^2}{u^2 + d^2 + h^2}}$.

Mais parce que le rayon incident a la même vitesse, quelle que soit son inclination, le numérateur $\sqrt{u^2 + h^2}$, ou l'expression de tz , est une quantité constante. Donc le dénominateur $\sqrt{u^2 + d^2 + h^2}$ étant composé du carré constant $u^2 + h^2$ et de la constante d^2 , sera lui-même constant. Donc, tel sera aussi le rapport entre les sinus.

Newton a donné une belle démonstration du même résultat, par la Synthèse. *Philos. natur. Princ. mathem.* t. I, sec. XIV, propos. 94^a theor. 48.

pager aussi exactement les vibrations de la lumière, que si les rayons de ce fluide formaient des lignes continues.

Cas où la Réfraction se change en Réflexion totale.

1058. Nous avons vu (1045) que les rayons qui se présentent sous un certain degré d'obliquité, pour pénétrer un milieu plus rare que celui qu'ils traversent, sont réfléchis tous à la fois au contact des deux milieux. Or, l'explication que nous avons donnée de la réfraction peut servir à faire concevoir la raison de cet effet; car le rayon de lumière parvenu à une distance du contact des deux milieux, moindre que le rayon de la sphère d'activité du milieu qu'il pénètre, et se trouvant plus attiré par les molécules situées au-dessus de lui que par celles qui sont en dessous, commencera à infléchir son mouvement et à décrire une courbe qui tournera sa convexité vers la surface de contact. Si telle est l'inflexion de la courbe, que celle-ci coupe la surface de contact, il n'y aura qu'une partie des rayons qui soit réfléchi au contact, et le reste sera transmis. Mais si l'obliquité du rayon incident est assez grande pour qu'il y ait un arc de la courbe, dont la tangente soit parallèle à la surface de contact, le rayon, après avoir décrit cet arc, se relèvera en décrivant une seconde branche de courbe semblable à la première, après quoi il prendra un mouvement uniforme, suivant la tangente au dernier arc de la courbe; et il est évident que cette tangente se trouvera inclinée sur la surface de contact de la même quantité que le rayon incident: d'où il suit que l'angle de réflexion sera égal à l'angle d'incidence (1).

Vues de Newton sur la Réfraction et la Réflexion considérées comme ayant une même cause.

1059. La réflexion dont nous venons de parler est produite immédiatement en vertu de la cause d'où dépend la réfraction,

(1) *Newtonis Philos. natur. Princip. mathem.*, sect. XIV, propos. 96, theor. 5a.

en quoi elle paraît distinguée des réflexions qui ont lieu sous les incidences précédentes, et que l'on serait porté à considérer, au contraire, comme des espèces d'exceptions à la loi de la réfraction : cependant il est très probable, et c'est l'opinion de Newton, que la réflexion et la réfraction proviennent, en général, d'une même puissance qui agit diversement, suivant la diversité des circonstances (1); car, dans toutes les incidences qui précèdent celle où la réfraction se change en réflexion totale, le nombre des rayons réfléchis est aussi plus grand en général lorsque l'obliquité requise pour la réfraction totale est plus petite. Or, elle l'est d'autant plus que les deux milieux diffèrent davantage en densité, ou, ce qui revient au même, que la force de la réfraction, qui dépend de la grandeur de l'angle de réfraction, est plus considérable; et comme, d'une autre part, la force de la réflexion dépend du nombre des rayons réfléchis, il sera vrai de dire qu'en général les milieux qui réfractent le plus fortement la lumière, sont aussi ceux qui la réfléchissent le plus fortement.

1060. Newton, pour désigner la puissance dont il s'agit, emploie tantôt le nom d'attraction, tantôt celui de répulsion : par exemple, lorsque la lumière rencontre, sous un certain degré d'obliquité, la dernière surface d'une masse de verre placée dans le vide, et qu'elle se réfléchit en entier, il est visible que cet effet ne peut être attribué qu'à l'attraction du verre, puisque le vide est incapable d'exercer aucune action; mais si l'on enduit la surface du verre de quelque liquide, comme l'eau ou l'huile, un certain nombre de rayons qui étaient réfléchis dans le cas précédent, pénétreront le liquide, parce que l'attraction du verre est balancée en partie par l'attraction contraire de l'eau ou de l'huile (2).

D'une autre part, lorsque la lumière se réfléchit à la rencontre d'un corps, les molécules propres de ce corps paraissent exercer sur elle une action répulsive, et parce que ce corps, lors-

(1) *Optice Lucis*, lib. II, pars 3, propos. 9.

(2) *Optice Lucis*, lib. III, quæst. 29.

qu'il est diaphane, agit en même temps par attraction sur la portion de lumière qui se réfracte, on peut concevoir que cette attraction s'étend jusqu'à un plan situé à une très petite distance de la surface du corps, parallèlement à cette surface, et qu'au-delà de ce plan la répulsion a lieu jusqu'à une autre distance presque infiniment petite; et comme en Algèbre les quantités négatives s'évanouissent lorsque les quantités positives commencent à avoir lieu, de même, dans les effets physiques dont il s'agit ici, la force répulsive succédera immédiatement à la force attractive (1).

Parmi les rayons qui se meuvent vers la surface du milieu réfringent, il arrivera le plus souvent que les uns seront repoussés, et les autres attirés, pour être ensuite transmis par le milieu, et cette différence paraît tenir à certaines circonstances que Newton a de même déterminées, et dont nous parlerons à l'article des couleurs.

1061. Newton ne s'en est pas toujours tenu aux actions à distance pour y ramener les effets dus à la réflexion et à la réfraction. Il a présumé que ces effets pourraient bien dépendre de l'action d'une matière très subtile, répandue partout et jusque dans l'intérieur des corps diaphanes; et, en concevant que cette matière avait plus de densité dans les corps plus rares, et que sa densité augmentait peu à peu, en allant d'un milieu plus dense vers un milieu plus rare, il pensait qu'on pourrait expliquer, d'après cette hypothèse, comment la lumière se réfractait dans certaines circonstances, en infléchissant son mouvement par degrés, et comment elle se réfléchissait dans d'autres circonstances, en cherchant à s'écarter des espaces où la matière subtile était plus dense, pour se porter vers ceux où elle était plus rare (2).

1062. Au reste, il n'est pas surprenant de voir ici Newton se donner cette espèce de liberté de conjecturer. Il ne propose ses opinions que comme de simples doutes, dans ses Questions d'Optique, où il semble faire l'histoire des pensées qui se sont présen-

(1) *Optice. Lucis*, lib. III, quæst. 31.

(2) *Ibid*, lib. III, quæst. 18.

tées successivement à son esprit dans ses profondes méditations sur la nature, comme pour inviter les philosophes qui le liront à les discuter et à les éclaircir.

Il résulte du moins de leur ensemble, que la réflexion et la réfraction de la lumière sont produites très vraisemblablement par des forces particulières, du genre de celles qui s'exercent de molécule à molécule, et qu'en se bornant aux effets, tels qu'ils se présentent à nous, on peut employer les mots d'*attraction* et de *répulsion* pour désigner ces mêmes forces, comme, en Chimie, on se sert du mot *affinité* pour exprimer la tendance qui sollicite les unes vers les autres les molécules constituantes des corps. C'est une nouvelle classe de phénomènes infiniment variés qui rentre dans le domaine des forces dont il s'agit, et ce domaine est déjà si étendu, d'après tout ce que nous avons dit dans les articles précédens, que tout ce qui tend à en reculer les limites contribue par cela seul à la perfection de la Physique, en simplifiant le tableau de la nature. L'espèce de refus que les physiciens ont fait pendant long-temps, et que quelques-uns font encore, d'admettre de pareilles forces, ne vient que de la pente qu'ils ont à chercher, dans les effets naturels, des actions analogues à celles qu'exercent continuellement sous nos yeux les corps qui se choquent, et les différens mobiles qu'emploie notre Mécanique. Comme ces actions ont lieu au contact, et qu'elles nous sont familières, elles paraissent offrir à l'esprit des conceptions plus nettes, quoiqu'au fond l'impulsion, considérée attentivement, ait ses mystères comme l'attraction. On a accusé en conséquence les partisans des forces qui agissent à distance, de reproduire les qualités occultes des anciens philosophes. Cependant la différence est immense entre ces sympathies et ces antipathies, qu'il suffisait de nommer pour que tout fût dit, et ces principes qui expriment des faits généraux dont le développement conduit au rapprochement de tous les autres faits qui en dépendent. Là tout restait inconnu pour le physicien : ici, en partant d'un fait général qu'il prend pour cause, il en déduit, par rapport à tout le reste, des connaissances claires et précises. Les qualités occultes plongeaient tous les phénomènes de la nature dans une obscurité profonde et

impénétrable; les forces admises par Newton les placent au milieu d'un espace bien éclairé, excepté dans un point où se trouve un nuage qu'il n'a point été donné à l'œil du génie de pouvoir percer.

Détermination approximative de la hauteur de l'Atmosphère, à l'aide de la Réflexion occasionnée par le Crépuscule.

1063. Si l'atmosphère n'existait pas, nous ne pourrions être éclairés que par les rayons qui nous viendraient en ligne directe du soleil. Le jour et la nuit se succéderaient comme par un saut brusque; cette alternative subite semblerait même se répéter à chaque instant, lorsque nous passerions d'un lieu exposé aux rayons solaires dans un autre où ils ne pourraient pénétrer immédiatement, et le tableau de la nature serait défiguré par un assemblage désagréable de clarté et de ténèbres. Mais la même Providence qui nous a préparé, dans cette grande masse de fluide répandue autour du globe, l'aliment de la vie et le véhicule de la parole, l'a destinée encore à nous faire jouir plus complètement du bienfait de la lumière. Lorsque le soleil n'est pas encore arrivé sur l'horizon, ou lorsque déjà il s'est abaissé en dessous de ce cercle, ses rayons, après s'être réfractés en pénétrant l'atmosphère, vont se réfléchir sur ses différentes couches, d'où ils se dirigent vers tous les objets qui nous environnent, et les rendent visibles pour nous. Ils nous donnent ainsi le crépuscule du matin ou l'aurore, en amenant le jour par une gradation imperceptible, et produisent le crépuscule du soir, en retardant, par une nouvelle gradation en sens contraire, l'instant où le jour achève de s'éteindre. Et tandis que le soleil parcourt la partie de son cercle diurne élevée au-dessus de l'horizon, c'est encore l'atmosphère qui, par des réflexions multipliées, distribue les rayons lumineux dans une multitude d'endroits où la direction primitive ne les aurait pas conduits.

1064. D'après ce que nous venons de dire, on peut se faire une

Idée du moyen que l'on a imaginé pour déterminer la hauteur de l'atmosphère, et que nous avons promis d'indiquer (430). Lorsque le soleil s'avance vers l'horizon d'un lieu, aux approches du jour, parmi ceux de ses rayons qui se répandent dans l'atmosphère, il y en a un qui est tangent à la surface de la terre, et l'aurore naît pour un spectateur auquel appartient l'horizon dont il s'agit, au moment où ce même rayon est tellement situé, qu'après avoir été se réfléchir sur la concavité de l'atmosphère, il se dirige vers le spectateur. On a observé que le point du jour avait lieu lorsque le soleil était encore abaissé de 18^d au-dessous de l'horizon.

Or, il est facile de concevoir qu'il y a une certaine hauteur que doit avoir l'atmosphère pour que la réflexion qui produit le crépuscule commence, lorsque le soleil est à 18^d au-dessous de l'horizon. Car si l'atmosphère était, par exemple, plus élevée que dans l'hypothèse actuelle, le rayon dont nous venons de parler ayant une plus grande étendue à parcourir, avant de rencontrer la dernière couche d'air, se réfléchirait suivant une direction différente de celle sur laquelle se trouve notre spectateur, d'où il résulte que le point du jour répondrait pour lui à un autre abaissement au-dessous de l'horizon. Or, en calculant la hauteur de l'atmosphère qui répond à un abaissement de 18^d , on a trouvé qu'elle était à peu près de 60,000 mètres, ou 30,784 toises. Mais ce résultat prouve seulement qu'à la distance de 60,000 mètres, la densité des molécules de l'air est encore assez grande pour nous renvoyer une lumière sensible, en sorte que nous sommes certains que l'atmosphère s'étend au moins jusque-là, sans pouvoir assigner d'une manière précise sa dernière limite (1).

(1) Voyez, pour la démonstration du résultat que nous venons d'indiquer, le *Traité élémentaire d'Astronomie physique*, p. 276. Nous renvoyons de même à cet excellent ouvrage, p. 36 et suiv. pour tout ce qui concerne la réfraction astronomique et la réfraction terrestre.

De la Puissance réfractive.

1065. La force que les corps diaphanes exercent sur les rayons de la lumière pour les détourner de leur direction primitive, et leur faire subir la loi de la réfraction, est une force accélératrice qui agit perpendiculairement à la surface de ces corps (1055), et à laquelle Newton a donné le nom de *puissance réfractive*. Il a de plus entrepris d'en mesurer l'effet par rapport à chaque corps; et en la comparant dans les différens corps, il est parvenu à des résultats qui offrent une nouvelle preuve de cette prérogative qui semblait lui avoir été accordée, de ne pouvoir rien toucher sans y laisser l'empreinte de son génie.

Voici de quelle manière il détermine la puissance réfractive. Il suppose qu'un rayon de lumière *cr* (*fig. 54*) rencontre la surface *ab* de chaque corps sous un angle infiniment petit *cra*, ou, ce qui revient au même, il suppose que l'angle d'incidence *crm* soit sensiblement droit. Il décompose ensuite le mouvement *rg* du rayon rompu suivant deux directions, dont l'une *rn* est située sur la surface réfringente, et l'autre *gn* lui est perpendiculaire. Comme le rayon incident *cr* avait une vitesse censée nulle dans le sens de cette perpendiculaire, tout l'effet qui a lieu dans ce même sens provient de la force accélératrice, ou de la puissance réfractive du milieu; et l'on prouve, d'après la théorie des forces accélératrices, que si l'on suppose la ligne *rn* constante, la puissance réfractive sera comme le carré de la perpendiculaire *gn* (1).

(1) Nous avons dit (note du n° 1056) que l'accroissement du carré de la vitesse verticale, lorsque la lumière passe d'un milieu dans un autre plus dense, est une quantité constante pour toutes les incidences du rayon. Or, si l'on suppose, comme dans le cas dont nous venons de parler, que l'incidence se fasse sous un angle infiniment petit, l'accroissement du carré de la vitesse ne sera plus distingué du carré de cette vitesse elle-même, c'est-à-dire, qu'il sera représenté par $(gn)^2$. Ainsi le résultat dont il s'agit ici est lié avec celui qui nous a servi à démontrer la loi de la réfraction.

*Aperçus de Newton sur la nature du diamant
et sur celle de l'eau.*

1066. C'est à l'aide du principe qui vient d'être exposé, que le génie de Newton avait lu en quelque sorte dans les résultats de la réfraction, ce qui depuis a été confirmé par des expériences directes, que le diamant était un corps combustible. Voici les observations dont cet illustre géomètre était parti, pour faire prendre ici à la physique de la lumière l'initiative qui semblait être réservée à la Chimie.

Ayant comparé les puissances réfractives de différentes substances avec leurs densités, estimées d'après leurs pesanteurs spécifiques, il trouva que les corps, considérés sous ce point de vue, formaient comme deux classes distinctes, l'une de ceux qu'il regarde comme fixes, tels que les pierres; l'autre, de ceux qu'il appelle gras, sulfureux et onctueux, tels que les huiles, le succin, etc. Dans chaque classe, la puissance réfractive était à peu près proportionnelle à la densité; mais les corps de la seconde classe, à densité égale, avaient une puissance réfractive beaucoup plus considérable que ceux de la première.

1067. Or, la grande puissance réfractive du diamant plaçait cette substance parmi les corps onctueux et sulfureux, et, dans la table où Newton avait présenté la série des rapports entre les puissances réfractives et les densités, le diamant se trouve à côté de l'huile de térébenthine et du succin, deux substances éminemment combustibles.

Newton avait conclu de ce rapprochement que le diamant était très probablement une *substance onctueuse coagulée*, expression qui, dans le sens que lui-même y attachait, en se conformant aux principes chimiques admis de son temps, doit être regardée comme un synonyme d'inflammable.

1068. On peut, d'après un simple coup-d'œil, juger par analogie de la grande force réfractive du diamant. Si l'on incline doucement vers la lumière un morceau taillé de ce minéral, en fixant une des facettes, la quantité de rayons réfléchis qui ira tou-

jours en croissant, atteindra un terme où elle deviendra si abondante, que la facette prendra un éclat analogue à celui d'une lame d'acier poli (1). Or, suivant Newton (1659), les milieux qui réfractent le plus fortement la lumière sont en même temps ceux qui la réfléchissent le plus fortement; et ainsi, la grande puissance réfractive du diamant se montre, pour ainsi dire, à travers l'effet qui résulte de la grande énergie avec laquelle agit la réflexion dans l'observation que nous venons de citer.

1669. Newton va plus loin que nous ne l'avons dit dans ce qui précède. Il remarque que l'eau a une puissance réfractive moyenne entre celles des corps des deux classes, et que vraisemblablement elle participe de la nature des uns et des autres. Car elle fournit à l'accroissement des plantes et des animaux, qui sont composés en même temps de parties sulfureuses, grasses et inflammables, et de parties terreuses, sèches et alkalisées. C'était dire, en mots couverts, que l'eau qui avait à la fois de l'analogie avec les corps inflammables et ceux qui ne l'étaient pas, devait renfermer elle-même un principe inflammable, comme si Newton eût pressenti dès-lors le résultat de l'analyse qui long-temps après a démontré la présence de l'hydrogène dans ce liquide.

1670. Newton, en énonçant les aperçus dont nous venons de parler, s'exprime dans le langage de la Chimie de son temps, et c'est une raison de plus pour admirer comment son génie, placé dans un si grand éloignement, a été aborder de si près, et par une route en apparence si détournée, des vérités importantes que l'état des connaissances humaines, à cette époque, semblait devoir rendre inaccessibles.

1671. L'expérience de la combustion du diamant a été faite d'abord à Florence, vers la fin du dix-septième siècle, à l'aide de la lentille de Tschirnausen, et depuis à Vienne, au moyen d'un feu très violent et long-temps soutenu. Là, on vit les diamans diminuer peu à peu de volume, et finir par disparaître. Darcet est le premier des chimistes français qui ait répété ces expé-

(1) Nous désignons ce genre d'éclat par le nom d'éclat adamantin.

riences, et il n'eut besoin, pour réussir, que d'employer un simple fourneau de coupelle ordinaire. Macquer observa depuis que le diamant répandait, en brûlant, une flamme légère qui formait autour de lui une espèce d'auréole très sensible.

Il résultait de ces expériences et des autres faites dans la même vue, que le diamant exposé à un feu d'une certaine activité, brûlait sans laisser de résidu, et que ce minéral, qui passait déjà pour une sorte de phénomène lorsqu'on le croyait indestructible, n'avait rien d'aussi merveilleux que sa destruction elle-même.

Expériences qui ont servi à déterminer la composition du Diamant.

1072. Le diamant une fois reconnu pour une substance combustible, il restait à déterminer sa composition. Lavoisier ayant fait brûler un de ces corps, à l'aide du gaz oxygène, dans un vaisseau fermé, aperçut des taches sur sa surface ; il remarqua de plus que le gaz qui s'était dégagé pendant la combustion, précipitait la chaux à la manière de l'acide carbonique. Mais il ne tira de ce fait aucune induction positive sur la nature de ce corps.

1073. Dans la suite, M. Smithson Tenant, célèbre chimiste anglais, fit brûler un diamant dans un étui d'or, par l'intermède du nitre, et obtint une quantité d'acide carbonique, qu'il jugea égale à celle que produisait la combustion du charbon ; il en conclut que le diamant était lui-même uniquement composé de charbon (1). Quelques années après, M. Guyton de Morveau ayant soumis le diamant à l'analyse, n'en retira que du charbon avec une légère quantité d'oxygène que l'on pouvait négliger, ainsi que nous le verrons bientôt. Les résultats obtenus plus récemment par MM. Allen et Pepys ont confirmé celui de M. Guyton (2).

1074. Quelqu'extraordinaires que dussent paraître ces résultats, il était difficile de croire qu'un second principe, combiné

(1) *Transact. philosoph.*, 1797.

(2) *Bibliothèque britannique*, décembre, 1807.

dans le diamant avec le charbon, et égal en poids à près de la moitié de ce combustible, eût échappé à l'attention de quatre chimistes d'un mérite aussi distingué. Telle fut cependant la conséquence à laquelle deux géomètres célèbres se trouvèrent conduits par l'observation et par la théorie, et dont l'énoncé était que le diamant renfermait plus du tiers de son poids d'hydrogène, et que c'était à la présence de ce principe que devait être attribuée sa grande puissance réfractive.

1075. Mais cette conséquence, amenée par un travail qui, considéré en lui-même, était d'un grand intérêt, n'a pu tenir contre de nouvelles analyses d'autant plus concluantes, qu'elles ont été entreprises dans la vue de la vérifier, et que ce motif était, pour les auteurs, une invitation à chercher l'hydrogène dans le diamant, et à déployer toute la puissance des moyens chimiques, pour le saisir et le mettre en évidence, supposé qu'il existât.

1076. M. Guyton, qui était intéressé personnellement dans la vérification dont nous venons de parler, a repris son travail sur le diamant; il n'a rien négligé pour s'assurer de la fidélité des instrumens dont il s'est servi, et de la justesse du résultat auquel il devait arriver, et il a fini par considérer de nouveau le diamant comme du carbone pur, uni peut-être à quelques atomes d'eau de cristallisation (1).

1077. M. Davy, à qui il était réservé de répandre un dernier trait de lumière sur le sujet de la question présente, a étendu ses recherches aux différentes substances carbonées susceptibles d'offrir des termes de comparaison avec le diamant. Il a déterminé les petites différences qui les en distinguaient, et dont la principale consistait dans une légère quantité d'hydrogène que renfermait exclusivement la plombagine et le charbon ordinaire. La conséquence qui découle de l'ensemble de ce beau travail, est que le diamant, en brûlant, ne donne absolument que du gaz acide carbonique pur (2), expression qui ne fait que répéter en

(1) *Annales de Chimie et de Physique*, nov. 1812.

(2) *Annales de Chimie et de Physique*, t. I, p. 16 et suiv.

d'autres termes ce qu'avaient déjà dit toutes les analyses précédentes.

1078. Ainsi fut décidée sans retour une question dont la solution ajoute une nouvelle surprise à celle qu'avait fait naître la combustion du diamant. Les extrêmes parurent se toucher, lorsqu'on vit le plus dur et le plus brillant de tous les minéraux, et l'un des plus limpides, s'identifier par sa composition avec ce corps noir, opaque et si tendre, que nous obtenons par la combustion des matières végétales.

1079. Nous placerons ici une observation qui ne nous paraît pas indifférente : c'est que, sans faire intervenir la considération d'aucun principe composant, d'une nature particulière, on conçoit comment les puissances réfractives se trouvent augmentées dans les corps combustibles en restant proportionnelles aux densités. On sait qu'en général une forte action d'un corps sur la lumière est accompagnée d'une forte action de ce corps sur la chaleur, ou, si l'on veut, de la chaleur sur ce corps, puisque toute action est réciproque. Il en résulte que la disposition d'un corps à subir la combustion dans laquelle la chaleur joue un si grand rôle, semble être liée à la propriété de réfracter fortement la lumière. La disposition de certains corps à la combustion devient ainsi comme un facteur commun qui multiplie les puissances réfractives de ces corps, en sorte que l'échelle de ces dernières continue de suivre la même loi que les densités, avec cette seule différence, que les degrés de cette échelle se trouvent plus élevés que dans les cas où les corps ne seraient pas combustibles.

1080. Nous citerons à l'appui de ce qui vient d'être dit, une expérience très intéressante faite par M. Davy en 1814, dans laquelle la chaleur la plus active à laquelle le diamant puisse être exposé, a été accompagnée d'une émanation proportionnelle de lumière. Pendant que ce savant chimiste s'occupait des recherches dont nous avons parlé plus haut, il avait à sa disposition la lentille de Tschirnausen, que l'usage qui en avait été fait à Florence pour opérer la combustion du diamant avait rendue célèbre ; M. Davy remarqua que ce corps, après avoir été fortement chauffé,

au moyen de cette même lentille, dans une capsule mince de platine que l'on avait percée de plusieurs trous, pour laisser à l'air une libre circulation, continuait de brûler, à l'aide du gaz oxygène dans lequel il était plongé, lorsqu'on l'avait retiré du foyer de la lentille. La lumière qu'il produisait était à la fois tranquille et d'un rouge si éclatant, que la plus vive clarté du soleil ne l'éclipsait pas; et la chaleur était si intense, que, dans une expérience où trois fragmens de diamant, du poids de 0^{sr}, 119^{sr} furent brûlés, un fil délié de platine, qui avait servi à les fixer dans la capsule, fut fondu, et cela, quelque temps après que les diamans eurent été soustraits à l'action du foyer (1).

3. De la Lumière décomposée, ou des Couleurs.

1081. Les rayons que les corps lumineux envoient immédiatement vers nos yeux, nous apportent les images de ces corps accompagnés de cette vive clarté que nous désignons souvent par l'expression même de *lumière*. Ceux de ces rayons qui sont réfléchis par les corps susceptibles de les repousser, viennent de même nous avertir de la présence de ces derniers corps, en nous offrant leurs images, mais sous une apparence particulière que nous exprimons par le mot de *couleur*. Les physiciens en ont conclu que la réflexion ne se bornait pas à renvoyer vers nous les rayons dans le même état où ils sont reçus par la surface réfléchissante, et qu'il faut que cette surface ait une certaine disposition propre à modifier l'action des rayons, et en vertu de laquelle ils nous font apercevoir les images des corps comme parées et habillées de leurs couleurs. Mais en quoi consiste cette espèce de modification, soit qu'on la considère dans les rayons eux-mêmes, ou dans les objets qui la déterminent? De quelle nature est cette puissance, dont l'inépuisable fécondité donne naissance à ces teintes si diversifiées qui distinguent les surfaces des différens corps, et qui admettent entre elles des gradations de nuances si délicates,

(1) Annales de Chimie et de Physique, t. I, p. 17.

souvent réunies et comme fondues ensemble dans la coloration d'un même corps? Telles sont les questions importantes dont nous devons la solution aux découvertes de Newton.

Des Couleurs considérées dans la Lumière.

Tant que l'on a regardé la lumière comme homogène, et ses rayons comme indifférens par eux-mêmes par rapport à telle ou telle couleur, on a attribué la diversité des couleurs à celle des mouvemens que les molécules des corps imprimaient aux rayons réfléchis sur leur surface, ou réfractés dans leur intérieur. Quelques physiciens, assimilant les couleurs aux sons, les faisaient consister dans la fréquence plus ou moins grande des vibrations de la matière subtile qui leur servait comme de véhicule.

1082. Cependant Grimaldi avait remarqué qu'un rayon solaire se dilatait en passant à travers le prisme; mais il regardait cette dilatation comme l'effet d'une cause accidentelle, qui agissait de la même manière sur tous les rayons: ainsi, après avoir fait une observation importante, il passa à côté du but, et céda le prisme à Newton.

Cet instrument, manié par une main si habile, et suivi dans tous ses résultats par l'œil du génie, a servi à dévoiler enfin la vraie théorie des couleurs. Newton a développé lui-même cette théorie dans son *Traité d'Optique*, où le physicien paraît avec tant de dignité à côté du géomètre, déjà immortel par la théorie de l'attraction, et où l'on admire partout ce choix heureux d'expériences décisives, cet art de les placer dans l'ordre où elles s'éclairent mutuellement, et cette justesse de raisonnement qui ne présente, dans les conséquences, que la traduction fidèle du langage des faits.

Notions sur le Prisme qui sert à décomposer la Lumière.

1083. Avant d'exposer les résultats des expériences dont il s'agit, il ne sera pas inutile de donner quelques notions générales sur la forme et sur les effets du prisme qu'on emploie pour les faire. Ce prisme est droit et triangulaire; on le fait ordinairement de verre blanc, que l'on choisit le plus exempt qu'il est possible de bulles, de veines, et autres défauts semblables; ses faces latérales doivent être exactement planes et d'un beau poli; l'angle formé par les deux faces, dont l'une reçoit le rayon de lumière qui se réfracte dans le prisme, et l'autre lui offre une issue à son retour dans l'air, se nomme *l'angle réfringent* du prisme.

1084. Nous avons vu (1027) qu'un rayon de lumière qui pénètre un milieu terminé par deux faces parallèles, prend, en repassant dans l'air, une direction qui est elle-même parallèle à celle qu'il avait avant d'entrer dans le milieu. Il n'en est plus de même lorsque le milieu est un prisme dont les faces sont inclinées entre elles. Le rayon émergent fait nécessairement un angle avec le rayon incident. Il faut en excepter le cas où le rayon incident et la perpendiculaire au point d'incidence sont dans un plan dont la section, avec la face sur laquelle tombe le rayon, est parallèle à l'arête qui passe par le sommet de l'angle réfringent. Car, si l'on prolonge ce plan jusqu'à la rencontre de la face par laquelle sort le rayon, sa section avec cette face sera parallèle à la première section; et comme le rayon reste sur ce plan, il s'en suit qu'il est ici dans le même cas que si les deux faces dont il s'agit étaient parallèles entre elles, et ainsi il sortira du prisme parallèlement à sa première direction.

1085. Supposons maintenant que abc (*fig. 55*) représente une tranche infiniment mince du prisme, située dans un plan perpendiculaire à l'axe; que b soit le point qui appartient à l'angle réfringent, et hg le rayon incident. Si l'on fait tourner le prisme autour de son axe, tandis que le rayon hg reste fixe, et si tel est le mouvement de ce prisme, qu'il détermine le rayon émergent nm

à s'abaisser de plus en plus au-dessous de sa première position on arrivera à un terme, passé lequel l'extrémité m , qui jusqu'alors était descendue, commencera au contraire à monter. Ce terme aura lieu lorsque le rayon émergent nm fera, avec la perpendiculaire or , un angle mnr égal à l'angle hgs , formé par le rayon incident hg avec la perpendiculaire ps ; d'où il suit que les angles anm , cgh , que feront les deux rayons avec les faces correspondantes du prisme, seront pareillement égaux. Si le point b était tourné vers le haut, les mouvemens du rayon nm se feraient en sens contraire de ceux dont nous avons parlé (1).

La position qui donne l'égalité entre les angles anm , cgh , doit être regardée comme la limite de toutes les autres positions. Or, on sait que quand une quantité varie en allant vers sa limite, ses variations diminuent de plus en plus, à mesure qu'elle-même

(1) Il paraît singulier que, pendant un même mouvement du prisme, l'image fasse deux mouvemens successifs en sens contraire. Pour éclaircir cette espèce de paradoxe, supposons que acb (fig. 56) représente un prisme tellement situé, que yr étant le rayon incident, le rayon réfracté st fasse des angles inégaux avec les côtés bc , ba . Dans le cas que nous prenons ici pour exemple, bsr est le plus petit de ces deux angles, et le rayon rs , après son émergence, se relève suivant une direction st , qui fait avec ab un angle plus aigu que l'angle yre .

Ayant mené bg perpendiculaire sur la base ac du triangle isocèle abc , concevons que le rayon réfracté rs tourne peu à peu autour de son point d'intersection o avec bg , de manière que son extrémité r s'élève, tandis que son extrémité s s'abaissera, et qu'en même temps le rayon incident yr et le rayon émergent st varient dans leurs positions, par des degrés analogues à la réfraction du prisme. Pendant ce mouvement il y aura un terme où le rayon rs parviendra à une position $r's'$ également inclinée de part et d'autre sur bc et ba . Or il est évident qu'à ce terme, le rayon incident $y'r'$ et le rayon émergent $s't'$ feront aussi des angles égaux avec les mêmes côtés bc et ba . Concevons enfin que le rayon $r's'$ continue son mouvement, toujours dans le même sens. Il arrivera à un nouveau terme où il prendra la même position $r''s''$ en sens contraire, que quand il était dirigé suivant rs , d'où il suit que l'on aura $bs''r'' = brs$, et $br''s'' = bsr$. Alors l'angle que forment entre eux le rayon incident $y''r''$ et le rayon émergent $t''s''$, prolongés jusqu'à ce qu'ils se rencontrent, est égal à l'angle qu'ils formaient, lorsqu'ils avaient les directions yr et ts .

Cet angle, en allant d'un terme vers l'autre, varie continuellement, de

s'approche de la limite, de manière qu'il y a un petit espace *en* deçà et au-delà où elle peut être regardée comme sensiblement constante. Il en est de ces sortes de quantités à peu près comme de la longueur du jour, qui augmente par des degrés presque insensibles, lorsque le soleil n'est plus qu'à une distance des Tropiques, qui sont les limites de son mouvement dans l'Ecliptique.

Il résulte de là que, dans les positions du prisme qui avoisinent celle où les réfractions des rayons *mn*, *gh* sont égales de part et d'autre, le rayon *mn* reste presque parallèle à lui-même, de manière que son extrémité *m* est à peu près stationnaire pendant un instant. Ces différentes notions nous seront utiles pour la suite.

Expériences sur la Lumière réfléchi par les Corps opaques.

1086. Newton, avant de présenter le prisme à l'action de la lumière qui vient immédiatement du soleil, pour analyser phy-

manière que d'abord il augmente, jusqu'à ce que le rayon réfracté ait pris la position *r's'*, qui répond au *maximum* du même angle, après quoi il diminue par des degrés inverses de ceux qui ont déterminé son accroissement.

Imaginons maintenant que le rayon incident *yr* restant fixe, ce soit le prisme qui tourne autour du point *o*, en s'abaissant par son extrémité *c*, de manière à prendre la position *a'd'b'* (*fig. 57*), et successivement toutes les autres qui résultent de ce même mouvement. Cette rotation du prisme produira la répétition des mêmes angles entre *bc* et *yr*, que ceux qui ont lieu dans l'hypothèse précédente, en vertu du déplacement du rayon réfracté *rs*. Donc l'angle formé par *yr* et *st* ira de même d'abord en augmentant, jusqu'à la limite dont nous avons parlé, et commencera ensuite à décroître, pour retourner vers sa valeur primitive; et ainsi cet angle subira tour à tour des variations en sens contraire, pendant que le côté *bc* du prisme continuera de s'incliner de plus en plus dans le même sens. Donc si l'on considère le point *z* comme le lieu de l'image, on conclura de ce qui vient d'être dit, que cette image a dû commencer par descendre, tandis que l'angle formé par le rayon mobile *zs* avec le rayon fixe *yr* augmentait, et qu'ensuite elle a dû remonter pendant la diminution du même angle. Voyez pour la démonstration du *maximum*, *Newtonis Opusc.*, t. II, p. 157, propos. 25; et le *Traité d'Optique* de Lacaille, nouv. édit., Paris 1802, augmentée par plusieurs Élèves de l'École Polytechnique, p. 46 et suiv.

siquement ce fluide, commença par tâter en quelque sorte son sujet, en faisant des expériences préliminaires sur les rayons que réfléchissent les corps opaques colorés. Dans cette vue, il prit un papier épais, taillé en forme de rectangle, et d'un noir foncé. Ayant divisé le rectangle en deux moitiés, par une ligne parallèle à ses petits côtés, il teignit une moitié en rouge et l'autre en bleu; ces deux couleurs étaient elles-mêmes très chargées et avaient une forte intensité. Le papier était placé devant une fenêtre (1), de manière que les deux grands côtés du rectangle fussent parallèles à l'horizon, et que la ligne qui le divisait fût perpendiculaire au plan de la fenêtre : de plus, l'angle formé par la lumière, qui allait de la fenêtre au plan de papier, était égal à celui que faisait le même plan avec les rayons réfléchis vers l'œil. Les choses étant ainsi disposées, Newton regarda le papier à travers un prisme dont l'axe était aussi parallèle à l'horizon; et voici ce qu'il observa. Lorsque l'angle réfringent du prisme était tourné en haut, auquel cas la réfraction relevait l'image du papier au-dessus de sa première position, la moitié teinte en bleu paraissait elle-même plus élevée que celle qui était colorée en rouge : c'est le contraire lorsque l'angle réfringent regardait la terre; la position du bleu, dans ce cas, était plus basse que celle du rouge. Newton conclut, de cette première expérience, que les rayons qui venaient de la moitié teinte en bleu étaient plus réfringibles que ceux qui partaient de la moitié teinte en rouge; car il était bien évident que les grands côtés du papier étant parallèles aux arêtes du prisme, les rayons des deux couleurs qui provenaient des sous-divisions de ces mêmes côtés et de celles de toutes les lignes intermédiaires, se trouvaient précisément dans les mêmes circonstances à l'égard du prisme; en sorte que s'ils eussent subi des réfractions

(1) Pour que cette expérience réussisse, il faut que le papier soit à une médiocre distance de la fenêtre, comme de 25 centimètres, et qu'il se trouve vis-à-vis le mur d'appui qui est en dessous de la fenêtre, pour tempérer l'effet de la lumière, qui ferait paraître sur le papier toutes les différentes espèces de couleurs dont nous parlerons bientôt, ce qui offusquerait les couleurs dont ce papier est peint.

égales, tous les points de l'image qui répondaient à chacun des grands côtés du papier et à chacune des lignes intermédiaires, auraient dû paraître à la même hauteur (1).

1087. Newton entourra ensuite, à plusieurs reprises, le même papier d'un fil de soie très noir, en sorte que les différentes parties de ce fil paraissaient être autant de lignes noires tracées sur le papier. Il plaça le papier près d'un mur, dans une position verticale, l'une des couleurs étant à droite et l'autre à gauche. Ayant choisi la nuit pour le temps de ses expériences, il mit en devant du papier, et à une très petite distance, une bougie allumée, dont la flamme répondait à la jonction des deux couleurs, et dépassait tant soit peu, par sa pointe, le bord inférieur du papier : enfin, il dressa sur le plancher, à l'opposé du papier et à une distance d'environ six pieds, un verre lenticulaire qui rassemblait les rayons partis des différens points du papier, de manière que leurs points de concours, derrière la lentille, se faisaient à la même distance d'environ six pieds, d'où il arrivait que l'image du papier coloré se peignait sur un autre papier placé à l'endroit de ces points de concours, comme les images des objets extérieurs se peignent au fond de la chambre obscure.

Newton, en faisant mouvoir le second papier, tantôt vers la lentille, tantôt du côté opposé, cherchait la distance où l'image de chaque partie colorée du papier fixe avait le plus de netteté; et il jugeait qu'il était parvenu à cette distance, lorsque les images des fils tendus sur le papier étaient elles-mêmes nettement terminées : or, à l'endroit où le rouge était devenu très distinct, le bleu ne se voyait que confusément, de sorte que l'on apercevait à peine les lignes qui le traversaient; et réciproquement le terme où le bleu ressortait dans toute sa force n'offrait qu'une image faiblement exprimée du rouge et des lignes noires auxquelles il servait de fond. Ce second terme avait lieu à une distance de la lentille moindre d'environ un pouce et demi que celle qui répondait à la vision distincte du rouge; et puisque l'incidence

(1) *Optice Lucis*, lib. I, pars 1, propos. 1, theor. 1, lib. 1.

des rayons sur la lentille était la même dans les deux cas, il s'ensuivait que les rayons bleus se réfractaient plus que les rouges.

1088. Il n'est pas nécessaire, pour le succès des expériences, que l'appareil soit disposé précisément comme il a été indiqué : par exemple, dans la première, on réussira de même en inclinant le prisme et le papier à l'horizon. Mais les positions adoptées par Newton sont celles où le phénomène marque davantage; et, en général, il a ramené toutes ses expériences à ces espèces de termes fixes, qui, par une manière d'opérer plus soignée et plus précise, conduisent à des résultats mieux prononcés. Newton ne prétend pas non plus que toute la lumière qui vient de la partie du papier en bleu soit plus réfrangible que celle qui vient de la partie rouge. On verra dans la suite que chacune de ces deux couleurs est mêlée de rayons, qui sont eux-mêmes différemment réfrangibles; mais ce mélange, qui n'est que léger, n'empêche pas que l'effet principal ne domine dans le phénomène.

Décomposition de la Lumière solaire.

1089. De ces expériences qui ont servi à Newton comme d'entrée, il passe à celles dont l'objet est la lumière envoyée immédiatement par le soleil. Voici en quoi consiste la première : Newton introduisit un rayon solaire par une ouverture d'environ 4 lignes, ou 9 millimètres de diamètre, pratiquée au volet d'une chambre obscure; il plaça auprès de cette ouverture un prisme de verre, en sorte que le rayon solaire, après sa réfraction à travers le prisme, allait projeter, sur le mur opposé à la fenêtre, l'image colorée qui est connue sous le nom de *spectre solaire*. L'axe du prisme était perpendiculaire à la direction du rayon, et Newton, en faisant tourner lentement le prisme autour de cet axe, voyait le spectre descendre et monter alternativement sur le mur. Dans le passage d'un mouvement à l'autre, il y avait un instant où le spectre paraissait stationnaire; et l'on jugera, d'après ce que nous avons dit plus haut, que telle était alors la position du prisme, que les réfractions des rayons incidens et celles des

rayons émergens étaient égales de part et d'autre. Newton fixa le prisme dans cette même position, qu'il adopta en général pour toutes ses expériences (1).

1090. L'image du soleil, peinte sur le mur opposé à la fenêtre, avait une figure oblongue, dont les bords latéraux étaient deux lignes droites assez distinctes, et les deux extrémités supérieure et inférieure deux demi-cercles mal terminés, dont les couleurs se dégradèrent et s'effaçaient insensiblement. La largeur de l'image se trouvait en rapport avec la grandeur apparente du diamètre du soleil; car elle était de 2 pouces $\frac{1}{8}$, y compris la pénombre; d'ailleurs elle se trouvait éloignée du prisme de 18 pieds $\frac{1}{2}$. Or, en retranchant de cette largeur le diamètre de l'ouverture faite au volet, qui était d'un quart de pouce, et en mesurant l'angle qui, ayant son sommet tourné vers le prisme, était sous-tendu par la largeur ainsi réduite, on trouvait cet angle d'environ $\frac{1}{2}$ degré, ce qui est la mesure du diamètre apparent du soleil.

1091. Pour concevoir ceci, supposons que la *fig.* 58 représente, en projection horizontale, tout ce qui concerne le phénomène; que *st* soit le diamètre du soleil; *on* celui de l'ouverture faite au volet; *snz*, *tor*, deux rayons qui, en partant des extrémités du diamètre du soleil, aillent, après s'être croisés en *y*, passer par les extrémités de l'ouverture; *soe*, *tuh*, deux autres rayons qui aillent directement vers les mêmes extrémités; enfin, soit *rz* la ligne à laquelle ces différens rayons aboutissent sur le mur; la pénombre sera mesurée par les lignes *er*, *lz*.

Soit maintenant *abcd* la projection du prisme; cette projection sera un rectangle, à cause de la position horizontale de ce prisme. D'une autre part, il est clair que les rayons rompus et les rayons émergens resteront dans ce même plan, et que, de plus, ils sortiront du prisme parallèlement à leurs premières directions; et comme les rayons incidens rencontrent le prisme presque perpendiculairement, à cause de la petitesse de l'angle qu'ils font entre eux, on pourra supposer, sans erreur sensible, que les rayons émergens restent sur les directions prolongées des rayons incidens.

(1) *Optice Lucis*, lib. I, propos. 2, theor. 2.

Or, Newton ayant retranché de la largeur rz de l'image la partie gr égale à on , trouva que l'angle gnz , qui est sensiblement égal à l'angle ryz (1) ou à l'angle syz , était d'environ un demi-degré. Il en était tout autrement de l'image considérée relativement à sa longueur; elle avait dans ce sens environ 10 pouces $\frac{1}{4}$, et l'angle réfringent du prisme qui avait servi à l'expérience était d'environ 64^d . Avec un prisme dont l'angle réfringent était moindre, la longueur de l'image se trouvait diminuée; mais la largeur restait la même.

En faisant tourner le prisme sur son axe, de manière que les rayons émergens devinssent plus obliques à la face du prisme par laquelle ils sortaient, on voyait l'image s'accroître d'environ 2 pouces ou davantage dans le sens de sa longueur.

Si l'on faisait faire au prisme un mouvement contraire, qui augmentât l'obliquité des rayons incidens sur la surface du prisme par laquelle ils entraient, on voyait l'image se contracter d'un ou deux pouces, et toujours dans le sens de la hauteur.

1092. Or, suivant les lois d'Optique reçues jusqu'alors, la longueur de l'image, devenue stationnaire, aurait dû être égale à sa largeur, c'est-à-dire, que l'image aurait dû se présenter sous une figure circulaire; car soit acb (fig. 59) une coupe verticale du prisme, rf , zm deux rayons incidens partis des extrémités du diamètre du soleil pris aussi dans le sens vertical, et qui se croisent avant de passer par l'ouverture faite au volet; de plus, soient mh , fi les rayons rompus, hp , iu les rayons émergens, et pu la longueur de l'image peinte sur le mur.

1093. Nous avons dit (1085) que quand l'image est devenue stationnaire, les réfractions sont égales de part et d'autre. Cette limite se rapporte à un point t (fig. 60) situé à peu près au milieu de l'image, et qui répond au rayon $yrst$, dont la réfraction est moyenne entre celles de tous les autres rayons situés en dessus et en dessous, de manière que c'est le rayon émergent st qui est incliné sur ac , de la même quantité que le rayon incident yr sur

(1) C'est une suite de ce que gn est parallèle à ro .

bc, et que l'on regarde l'image comme stationnaire, quand le point *t* cesse de monter ou de descendre pendant les deux mouvemens contraires que l'on fait faire au prisme.

Or, dans l'hypothèse où tous les rayons seraient également réfrangibles, la réfraction en *m* serait égale à celle en *i*, et la réfraction en *f* serait égale à celle en *k*; d'où il suit que l'inclinaison des rayons émergens *hp*, *iu*, l'un sur l'autre, serait la même que celle des rayons incidens *ym*, *yf*, c'est-à-dire, d'environ $\frac{1}{2}$ degré; et comme le petit écart que les rayons *mh*, *fi* auraient subi dans l'intérieur du prisme pourrait être négligé, parce que les rayons incidens sont presque parallèles, il en résulte que, dans la même hypothèse, la longueur de l'image devrait être égale à sa largeur, c'est-à-dire, que l'image devrait paraître circulaire. Donc, puisqu'elle est cinq fois plus longue que large, il est nécessaire que les rayons *ym*, *yf*, et leurs intermédiaires, soient différemment réfrangibles, et que ceux qui forment la partie supérieure *p* de l'image (*fig 59*), le soient plus que ceux qui forment la partie inférieure (1).

1094. Or, telle était la distribution des couleurs de l'image, que son extrémité *p*, la plus réfrangible, présentait le violet, et que le rouge paraissait à l'extrémité opposée *u*, dont la réfraction était plus petite; les parties intermédiaires, en partant du rouge, offraient successivement l'orangé, le jaune, le vert, le bleu et l'indigo.

Si l'on écartait le prisme à une certaine distance de l'ouverture

(1) Soit *rs* (*fig. 61*) un rayon réfracté, situé dans la même position que *fig. 60*, en sorte qu'il y ait égalité entre les angles *cry* et *ast*. Soient *htu*, *if* (*fig. 61*) deux autres rayons réfractés qui se croisent entre eux et avec le rayon *rs*, en faisant des angles égaux *bhm*, *lfi* avec les côtés du prisme, d'où il résulte que les angles *bmh*, *bif* seront aussi égaux. Par une suite nécessaire, il y aura de même égalité entre les angles *cfy'*, *ahp*, que le rayon incident qui appartient à *if* et le rayon émergent qui appartient à *hm* feront avec les côtés correspondans du prisme, ainsi qu'entre les angles *cmv'* et *aiu*, et il est évident que *fy''* et *my'* d'une part, et *hp* et *iu* d'une autre part, seront inclinés entre eux d'une même quantité. Supposons que cette inclinaison soit d'un demi-degré, et concevons que le rayon *yr* restant fixe, le rayon *y''f* et le rayon *y'm* se meuvent parallèlement à eux-mêmes, l'un de haut en bas, l'autre de

faite au violet, et qu'on regardât cette ouverture à travers le prisme disposé comme dans l'expérience précédente, on voyait de même une image oblongue et colorée, dans laquelle la couleur la plus réfrangible était le violet, et la moins réfrangible le rouge; les couleurs intermédiaires, en partant du violet, étaient de même l'indigo, le bleu, le vert, le jaune et l'orangé.

1095. Il résultait de ces expériences que, toutes choses égales d'ailleurs, les rayons de la lumière diffèrent notablement entre eux par leurs degrés de réfrangibilité. Mais d'où provenait cette différence? Était-elle l'effet d'une loi constante et uniforme qui modifiait diversement la réfraction des divers rayons? Fallait-il la regarder comme accidentelle? Enfin, devait-on adopter l'opinion de Grimaldi, suivant laquelle chaque rayon se dilatait et s'épanouissait en forme d'éventail? Ces questions restaient encore indécises, et il fallait en chercher la solution dans de nouvelles expériences.

Or, Newton jugea que si l'allongement de l'image avait pour cause la dilatation de chaque rayon, ou quelque autre déviation du même genre, l'image réfractée de nouveau dans le sens latéral s'étendrait sur une largeur égale à sa longueur. Pour éprouver l'effet de cette seconde réfraction, ayant laissé l'appareil disposé comme dans l'expérience précédente, il plaça un second prisme derrière le premier, mais de manière que les deux axes se croisaient à angle droit, et que la lumière réfractée de bas en haut par le premier l'était ensuite dans le sens latéral par le second, et il

bas en haut, jusqu'à ce qu'ils aient pris les positions indiquées par la *fig. 60*, où leurs extrémités supérieures coïncident en un même point avec le rayon fixe *yr*. Il est facile de juger que chacun des angles formé par *my* avec *fy*, et par *ph* avec *ui* sera encore d'un demi-degré, et qu'en même temps les angles *cfy*, *ahp* d'une part et les angles *emy*, *aiu* de l'autre, seront encore égaux chacun à chacun. Or, telles seraient les routes que suivraient dans l'air et dans le prisme les trois rayons principaux, savoir, le rayon moyen *yrst*, et les deux extrêmes *ymhp* et *yfiu*, si la lumière était composée de rayons également réfrangibles; d'où l'on voit que, dans cette hypothèse, la longueur de l'image sous-tendrait, ainsi que sa largeur, un angle d'un demi-degré, en sorte que les deux dimensions se trouveraient sensiblement égales.

remarqua que l'image conservait la même largeur ; seulement elle avait pris une position un peu oblique à l'égard de la première.

Conséquences déduites des Expériences précédentes.

1096. Les résultats que nous venons d'exposer avaient amené les choses au point où il ne restait plus qu'à en tirer les conséquences dont le développement se présentait comme de lui-même au génie de Newton. Essayons de tracer ici la marche de ses idées. Le faisceau de lumière qui passe par l'ouverture faite au volet de la fenêtre est composé de rayons qui, par leur nature, ont différens degrés de réfrangibilité. Ce faisceau, reçu immédiatement sur le mur sans aucun prisme intermédiaire, y forme un cercle lumineux où les extrémités de tous ces rayons, différemment réfrangibles, sont partout réunies et mêlées les unes avec les autres. Placez à la rencontre de la lumière un prisme dont l'axe soit parallèle à l'horizon, l'effet de la réfraction horizontale étant de faire sortir les rayons parallèlement à leurs premières directions, quel que soit leur degré de réfrangibilité, il n'en résultera aucune séparation sensible des rayons dans ce même sens. Mais les rayons situés dans un même plan vertical rencontrant, sous différentes inclinaisons, les deux faces du prisme qui forment l'angle réfringent, se démèleront les uns des autres par l'effet de la réfraction. Les plus réfrangibles de tous, s'ils existaient seuls, iraient former, à une certaine hauteur, sur le mur opposé, une image circulaire ou à peu près. Les moins réfrangibles, si de même ils existaient seuls, s'offriraient sous l'aspect d'un cercle dont la position serait sensiblement plus basse que celle du premier. Imaginez entre ces deux cercles une infinité d'autres cercles projetés par des rayons, dont les réfrangibilités forment une série de degrés intermédiaires entre ceux qui appartiennent aux deux cercles extrêmes, et concevez de plus que tous ces différens cercles tombent à la fois sur le mur; leurs centres se trouveront sur une même ligne verticale, à de petites distances les uns des autres, et les cercles eux-mêmes

se recouvriront mutuellement en grande partie, de sorte que leur assemblage formera une image oblongue dont les extrémités seulement paraîtront circulaires.

1097. Maintenant recevez les rayons sortis du prisme, sur une des faces d'un second prisme, dont l'axe soit vertical, et dont la position soit telle, qu'il y ait égalité entre la réfraction des rayons incidens et celle des rayons émergens. Les rayons qui appartiennent à chaque cercle, étant tous également réfrangibles, sortiront du second prisme dans le même ordre où ils étaient entrés; seulement la réfraction les rejettera de côté, de manière que le cercle qu'ils projetteront sur le mur aura sa nouvelle position un peu à droite ou à gauche de la précédente, et cela d'autant plus que le même cercle sera produit par des rayons qui auront un plus grand degré de réfrangibilité. Supposons qu'en conséquence de la position du second prisme, la déviation de chaque cercle se fasse de droite à gauche, et concevons une ligne verticale tracée sur le mur et qui passe par les centres des différens cercles dont était composée l'image provenue du seul prisme horizontal: le centre du cercle produit par les rayons les plus réfrangibles sera le plus écarté de cette verticale, en vertu de la réfraction dans le second prisme; le cercle qui subira le plus petit écart sera celui qui appartient aux rayons les moins réfrangibles, et tous les centres des cercles intermédiaires s'éloigneront plus ou moins de la verticale vers la gauche, suivant que les rayons qui produisent ces cercles seront plus ou moins réfrangibles; d'où il suit que les différens centres se trouveront sur une ligne oblique. On concevra de même que la longueur de l'image doit être un peu augmentée, puisqu'elle se trouve renfermée entre les mêmes lignes horizontales qu'auparavant, et que d'ailleurs elle est inclinée par rapport à ces lignes.

Newton ayant placé un troisième prisme, et même un quatrième derrière le second, pour multiplier les réfractions latérales, a toujours obtenu le même résultat, sans aucun accroissement sensible de l'image dans le sens de la largeur.

De nouvelles expériences, dont le détail nous mènerait trop loin, viennent à l'appui des précédentes; et quelle force la vérité n'emprunte-t-elle pas de leur ensemble, lorsqu'il n'en est aucune

qui, considérée en elle-même, ne parût pouvoir se passer des autres !

Décomposition de la Lumière réfléchie par la dernière surface des Corps transparents.

1098. Il nous reste à parler des expériences qui ont eu pour objet la lumière réfléchie au contact de la dernière surface des corps diaphanes et de l'air ; et ce n'est encore ici qu'une surabondance de preuves. Newton ayant choisi un prisme triangulaire, dont l'angle réfringent était de 90^d , et chacun des deux autres de 45^d , reçut un rayon solaire sur une des faces qui formaient l'angle réfringent, et telle était la position du prisme, que les rayons émergens sortaient par sa base, qui regardait l'horizon. Or, suivant ce que nous avons dit précédemment (1045), une partie des rayons qui rencontraient cette base se réfléchissait sur sa surface intérieure, et sortait par l'autre face de l'angle réfringent, tandis que la partie qui avait échappé à la réflexion se réfractait en repassant dans l'air. Les rayons réfléchis tombaient sur un second prisme, et, après s'être réfractés en le traversant, allaient former une image colorée sur un carton placé à la distance convenable (1).

A mesure que Newton faisait tourner le premier prisme sur son axe, les différentes couleurs de l'image augmentaient successivement d'intensité, en commençant par le violet et en finissant par le rouge ; et voici les conséquences qui résultaient de cette gradation.

1099. Les rayons qui renforçaient chaque couleur ne produisaient cet effet qu'en se dérochant à la réfraction qui avait lieu à la sortie du premier prisme ; et en se mêlant aux rayons réfléchis, qui allaient se rendre au second prisme, et le moment où le ton de couleur parvenait à son plus haut degré, était celui où la réfraction des rayons qui appartenaient à cette même couleur se

(1) *Optice Lucis*, lib. L, pars 1, exper. 9.

changeait en réflexion totale (1045) (1). On voit par là que la lumière réfléchie sur la base intérieure du prisme s'associait l'un après l'autre des rayons additionnels relatifs aux différentes couleurs, en allant du violet au rouge, c'est-à-dire, en commençant par les rayons les plus réfrangibles, et en finissant par ceux qui l'étaient le moins. Ainsi, dans cette expérience, la lumière réfléchie se composait graduellement de rayons diversement réfrangibles. Or, cette lumière ne différait en aucune manière de celle des rayons incidents qui venaient directement du soleil, puisque la réflexion n'est qu'une simple déviation de la lumière, qui n'altère point sa nature. L'expérience dont il s'agit servait donc à confirmer, en quelque sorte, par la voie de synthèse, ce que les précédentes avaient établi par une opération contraire que l'on pourrait comparer à l'analyse.

La même expérience faisait voir que les rayons les plus réfrangibles étaient aussi les plus disposés à se réfléchir, et que les moins réfrangibles étaient ceux qui avaient le moins de tendance à la réflexion.

Gradation de Nuances qui existe dans la Lumière.

1100. Lorsque l'on parle en Physique de rayons *rouges*, *bleus*, *violets*, etc., on est bien éloigné de supposer que les rayons soient réellement colorés, et ce langage n'exprime autre chose qu'une certaine disposition de ces rayons pour produire en nous les différentes sensations que nous désignons par ces mêmes noms de *rouge*, de *bleu*, de *violet*, etc. Les expériences que nous avons rapportées ne prouvent autre chose, sinon qu'il existe dans un faisceau de lumière, qui nous vient directement du soleil, une certaine quantité de rayons homogènes propres à produire en nous l'impression du *violet*, et que nous appelons *rayons violets*, pour

(1) Il est évident que l'inclinaison du prisme requise par la réflexion totale des rayons de chaque couleur, variait suivant la diversité des couleurs, en sorte qu'à chaque degré d'inclinaison répondait un *maximum* d'intensité relatif à une couleur particulière.

abrégés; une autre quantité de rayons pareillement homogènes, qui seront les *rayons bleus*, et ainsi de suite; et de plus, ces expériences nous apprennent que les rayons *violet*, *bleus*, *verts*, etc., ont différens degrés de réfrangibilité, depuis les violets, qui sont les plus réfrangibles jusqu'aux rouges, qui le sont moins que les autres.

Mais ici, comme dans un grand nombre d'autres phénomènes naturels, la loi de continuité a lieu, c'est-à-dire, que la réfraction va en diminuant, par des différences imperceptibles, depuis le violet jusqu'au rouge; et ainsi, le cône de la lumière qui traverse le prisme s'y résout en une infinité de cônes, dont les axes font entre eux de très petits angles; d'où il arrive que les bases se recouvrent, en grande partie, dans l'image colorée qui se forme de leur ensemble. La couleur des rayons varie de même par nuances d'un cône à l'autre, de manière que ces nuances peuvent être rapportées à sept espèces principales de couleurs, qui sont le violet, l'indigo, le bleu, le vert, le jaune, l'orangé et le rouge. Newton s'exprime à cet égard dans les termes les plus clairs (1), quoiqu'à en juger par l'exposé que la plupart des physiciens ont fait de sa théorie, il semble n'avoir admis dans la lumière que sept couleurs bien tranchées, qui se succèdent entre elles par un passage subit.

Couleurs du Spectre solaire ramenées à leur plus grande simplicité.

1101. Le mélange de toutes ces nuances, qui anticipent les unes sur les autres dans l'image colorée produite par la réfraction, rend cette image nécessairement très composée. S'il est possible, par quelque moyen, de diminuer considérablement le diamètre des cercles, le mélange, par une suite nécessaire, deviendra beaucoup moins sensible; car on conçoit aisément que si plusieurs cercles s'entrecoupaient mutuellement, et que, sans changer les

(1) *Optice Lucis*, lib. I, pars 1, propos. 2, exper. 6. Ibid., 2, propos 2, théor. 2.

positions des centres, on rétrécisse les circonférences, les parties communes diminueront à proportion, puisque les cercles approcheront davantage du terme où leurs circonférences ne feraient plus que se toucher.

Pour remplir cet objet, du moins en grande partie, on pratique une petite ouverture au volet d'une fenêtre, et, à quatre mètres, ou environ douze pieds du volet, on place un verre lenticulaire, puis au-delà de ce verre un carton blanc, éloigné convenablement pour que la lumière réfractée par la lentille, puisse peindre nettement sur ce carton l'image de l'ouverture pratiquée au volet de la fenêtre; or, l'effet de cette lentille est de contracter d'une quantité considérable l'image dont il s'agit. Enfin, on dispose derrière la lentille, à une petite distance, un prisme qui projette de côté, ou de bas en haut, l'image colorée du soleil. Alors les différens cercles qui composent cette image étant eux-mêmes considérablement diminués de grandeur, se dégagent les uns des autres, et cela d'autant plus que la largeur de l'image est plus petite par rapport à sa longueur. Newton est parvenu à rendre l'image soixante et douze fois plus longue que large, en sorte que l'on pouvait regarder chacune des couleurs de cette image comme approchant beaucoup de la simplicité et de l'homogénéité (1).

Effectivement les couleurs, dans cet état, ne peuvent plus être sensiblement changées par aucune réfraction. Par exemple, si l'on reçoit l'image colorée sur un carton noir, percé d'une petite ouverture circulaire d'environ quatre millimètres ou deux lignes de diamètre, et qu'ayant fait passer à travers un second prisme la portion de l'image transmise par cette ouverture, on la fasse tomber perpendiculairement sur un autre carton de couleur blanche, on ne remarque aucune différence entre sa longueur et sa largeur, et elle paraît être d'une figure exactement circulaire; ce qui prouve que tous les rayons qui la composent se sont réfractés régulièrement et de la même quantité.

1102. Les couleurs dont la lumière est l'assemblage ne sont pas plus susceptibles d'être changées par la réflexion que par la

(1) *Optice Lucis*, lib. I, pars 1, propos. 4, probl. 1, exper. 2.

réfraction. Car si l'on expose, par exemple, à la lumière rouge du spectre, des corps de différentes couleurs blanche, rouge, jaune, verte, bleue ou violette, tels que le papier, le vermillon, l'orpiment, l'émeraude, la fleur du bleuet, celle de la violette, ils paraîtront tous entièrement rouges. Les mêmes corps paraîtront bleus dans une lumière bleue, et verts dans une lumière verte (1). Toute la différence consiste en ce que chaque corps brille avec plus de vivacité lorsque la couleur dans laquelle il est plongé coïncide avec celle qu'il réfléchit par lui-même, tandis que la réflexion qui a lieu par l'intermède du spectre perd plus ou moins de sa force, lorsque les deux couleurs sont distinguées l'une de l'autre. Ainsi l'éclat du cinabre est très vif dans la lumière rouge; il l'est moins dans la lumière verte, et moins encore dans la lumière bleue.

Quant à la raison pour laquelle un corps change sa couleur naturelle en une autre qu'on lui donne à réfléchir, elle provient de ce que chaque corps est propre à la réflexion de toutes les couleurs, mais de manière qu'il y en a une qui étant réfléchie beaucoup plus abondamment que les autres, devient prédominante.

Ainsi, toutes les observations concourent à nous faire regarder chacune des couleurs que présente le spectre solaire comme étant homogène; et puisque la réfraction et la réflexion sont les seuls moyens non équivoques de consulter ici l'expérience, nous devons nous en tenir à un résultat qu'elle nous offre avec tous les caractères des vérités qui sont démontrées pour nous.

Différentes réfrangibilités des Rayons diversement colorés.

1103. Ici se présentait un nouveau sujet de recherches pour comparer les lois des réfractions particulières que subissent les différentes couleurs de l'image, soit entre elles, soit avec la loi générale de réfraction. Lorsque les physiciens avaient assuré, d'après l'expérience, que le sinus d'incidence était en rapport constant

(1) *Optice Lucis*, lib. I, pars 2, exper. 5. *Newtonis Opusc.*, t. II, p. 227 et 297.

avec celui de réfraction, ils pensaient que tous les rayons de la lumière se réfractaient de la même quantité sous la même incidence ; mais la vérité est que les rayons sont inégalement réfringibles ; et il faut regarder les résultats obtenus par les physiciens dont il s'agit, comme des espèces de moyens termes entre toutes les réfractions des divers rayons ; de manière qu'on ne peut conclure autre chose de ces résultats, sinon que les rayons verts, qui répondent au milieu de l'image colorée du soleil, étant séparés des autres, doivent avoir leur angle de réfraction en rapport constant avec leur angle d'incidence. Newton a fait des expériences directes qui prouvent que le rapport est de même constant pour les rayons de toutes les couleurs, et c'est ce que l'on peut démontrer rigoureusement par la Géométrie, d'après la supposition infiniment probable que l'action des corps sur la lumière s'exerce perpendiculairement à la surface de ces corps ; car, dans cette hypothèse, on pourra appliquer à une espèce quelconque de rayons la démonstration générale que nous avons donnée, en parlant de la réfraction. (Note du n° 1056.)

1104. Restait à déterminer le rapport particulier qui a lieu pour chaque espèce de lumière homogène, ou du moins la limite de ce rapport ; et voici comme Newton y parvint. Il disposa un prisme à l'ordinaire, de manière à produire sur le mur opposé à la fenêtre une image colorée du soleil ; mais comme il était nécessaire, pour le succès de l'expérience, que les côtés rectilignes de cette image fusse terminés le plus nettement possible, Newton avait obtenu cet effet en plaçant à l'ouverture par laquelle entrait la lumière, l'objectif d'un télescope.

Ensuite, par des observations répétées, dans lesquelles il fut aidé par un ami qui avait l'œil exercé à bien distinguer les couleurs, il marqua sur l'image colorée les limites des sept couleurs principales, en menant les diamètres des deux cercles extrêmes, dont l'un donnait le violet et l'autre le rouge, puis en divisant l'espace intermédiaire en sept parties, par des lignes parallèles à ces diamètres : enfin, ayant prolongé l'un des côtés rectilignes de l'image au-delà du rouge, jusqu'à ce que le prolongement fût égal à la distance entre les diamètres des deux cercles extrêmes, il

mesura la distance entre chaque ligne transversale et l'extrémité du prolongement, en commençant par le diamètre du cercle violet, et en allant successivement du violet au rouge, ce qui faisait en tout huit distances. Or, il trouva que ces distances étaient entre elles dans le rapport des nombres $1, \frac{8}{9}, \frac{5}{6}, \frac{3}{4}, \frac{2}{3}, \frac{3}{5}, \frac{9}{16}, \frac{1}{2}$, et la série de ces nombres avait cette propriété singulière, qu'elle était semblable à celle qui représente les intervalles des sons *ut, re, mi bémol, fa, sol, la, si, ut*, dont est formée notre échelle musicale, prise dans le mode mineur (1).

Il résulte de ce qui vient d'être dit, que la division de la ligne sur laquelle Newton avait marqué les limites des sept couleurs principales, était la même que dans un monocorde dont les différentes longueurs rendraient les sept sons de la gamme qui appartient au mode mineur. Cette conformité de rapports a fait penser à quelques physiciens qu'il y avait une analogie réelle entre les sons et les couleurs; mais c'est plutôt ici une analogie de rencontre, et il y a d'ailleurs de fortes raisons qui s'opposent à la prétention de faire chanter les couleurs.

1105. Newton avait déterminé précédemment, à l'aide d'une autre expérience, le rapport entre le sinus de réfraction des rayons les moins réfrangibles du spectre solaire, et celui des rayons les plus réfrangibles, sous une même incidence. Si l'on désigne par 50 le sinus d'incidence, on aura 77 pour le sinus de réfraction des rayons rouges, et 78 pour celui des rayons violets.

Or, dans la division de l'image colorée qui donnait les limites des couleurs voisines, les positions des lignes transversales, qui répondaient à ces limites étaient déterminées par les points du mur sur lesquels tombaient les extrémités des rayons rompus relatifs aux mêmes limites; et à cause de la petitesse des angles que formaient entre eux ces rayons rompus, on pouvait prendre, sans erreur sensible, les distances entre les points du mur où ils

(1) *Optice Lucis*, lib. I, pars 2, propos 3, probl. 1, exper. 7. Le sixième rapport $\frac{2}{3}$ est un peu différent du rapport $\frac{2}{3}$, qui lui correspond dans notre gamme (526); il donne pour le *si* un son un peu plus bas que celui de cette gamme.

aboutissaient; ou, ce qui revient au même, les distances entre les limites tracées sur l'image, pour les différences successives entre les sinus des angles de réfraction au passage du verre dans l'air; ainsi, en divisant la différence entre les nombres 77 et 78, en parties proportionnelles aux intervalles entre les limites des couleurs de l'image, on avait $77, 77\frac{1}{8}, 77\frac{1}{5}, 77\frac{1}{3}, 77\frac{1}{2}, 77\frac{2}{5}, 77\frac{3}{5}, 77\frac{4}{5}, 78$, pour les expressions des sinus de réfraction des divers rayons relatifs à un même sinus d'incidence exprimé par 50. Il résultait de là que les sinus de réfraction des rayons rouges relatifs à toutes les nuances de cette couleur s'étendaient depuis 77 jusqu'à $77\frac{1}{4}$; ceux des rayons orangés depuis $77\frac{1}{8}$ jusqu'à $77\frac{1}{5}$; ceux des rayons jaunes depuis $77\frac{1}{5}$ jusqu'à $77\frac{1}{3}$, et ainsi de suite pour les rayons verts, bleus, indigos et violets.

Nouvelle preuve que la Lumière n'est qu'un simple mélange de Rayons hétérogènes.

1106. Nous venons de voir qu'il y a dans la lumière des rayons d'une infinité de nuances différentes de couleurs, dont chacune est soumise dans sa réfraction à un rapport entre les sinus, qui lui est comme inhérent, et qui ne souffre aucune altération. Ces rayons, qui diffèrent et par leurs teintes et par les quantités de leurs réfractions, doivent être considérés comme hétérogènes, puisque quand ils rencontrent tous à la fois, sous une même incidence, la surface du même milieu réfringent, ils éprouvent de la part de ce milieu différentes attractions qui supposent des diversités dans leur manière d'être. Le mélange de toutes les couleurs forme la lumière que nous appelons *blanche*, en sorte qu'il suffit de supprimer dans cette lumière quelque une des couleurs qui la composent pour produire une couleur particulière qui variera suivant le nombre et les espèces de celles qu'on laissera subsister: ainsi, lorsque l'on reçoit sur une lentille les rayons diversement colorés qui divergent au sortir du prisme, et que l'on place un carton blanc au-delà de cette lentille, à l'endroit où les rayons qu'elle a rendus convergens se réunissent en un foyer commun,

le cercle lumineux qu'ils forment sur le carton est d'une couleur blanche; les choses étant dans cet état, si l'on place entre la lentille et le prisme un corps opaque qui intercepte une ou plusieurs des couleurs réfractées par le prisme, à l'instant la lumière blanche reçue par le carton fera place à une couleur ou simple, ou mélangée: par exemple, si l'on intercepte le violet, le bleu et le vert, les autres couleurs; savoir, le jaune, l'orangé et le rouge, formeront une couleur composée qui sera d'un beau jaune: supprimez au contraire les trois dernières couleurs, et vous aurez un mélange de violet, de vert et de bleu qui tirera sur la couleur verte. Dans toutes ces variations de couleurs, les rayons ne changent point de qualité; ils n'agissent point les uns sur les autres, ils ne font que se mêler en diverses proportions.

1107. Ces conséquences se trouvent confirmées par une nouvelle expérience de Newton, dont il a puisé l'idée dans une observation très connue. Voici en quoi elle consiste. L'impression de la lumière sur la rétine n'est pas un effet instantané, et de là vient que si l'on fait tourner rapidement dans l'air un charbon ardent, l'œil verra un cercle de feu qui paraîtra fixe pendant tout le temps du mouvement; car alors l'impression faite, dès le premier instant, sur un point déterminé de l'organe, par la lumière que lance le charbon, persiste jusqu'à ce que le rayon revienne à l'endroit où il était quand cette impression a eu lieu; et ainsi la sensation se renouvelle sans cesse avant d'avoir été détruite. D'après cette observation, Newton se proposa d'essayer si les différentes couleurs du spectre solaire ne pourraient pas agir sur l'œil, en se succédant avec tant de rapidité, qu'au moment de chaque impression les traces des impressions précédentes n'étant pas encore effacées, le résultat fût le même que celui d'une sensation unique produite par une couleur blanche permanente (1).

Pour vérifier cette idée, Newton s'était pourvu d'un instrument qui avait la forme d'un peigne composé de seize dents, larges d'environ 40 millimètres, ou un pouce et demi, et écartées

(1) *Optice Lucis*, lib. I, pars 2, propos. 5, expert. 10.

l'une de l'autre à peu près de 54 millimètres, ou deux pouces. Ayant fait tomber sur une lentille les rayons qui avaient traversé un prisme, il disposa au-delà de cette lentille un papier à une telle distance, que l'image du soleil y paraissait blanche, lorsque les rayons allaient librement du prisme à la lentille. Il plaça ensuite successivement les dents du peigne immédiatement avant la lentille, de manière à intercepter une partie des rayons colorés qui étaient sur le point d'y entrer, tandis que les autres rayons, que rien n'empêchait de la traverser, allaient peindre sur le papier l'image circulaire du soleil. Cette image alors perdait sa blancheur, et prenait toujours une couleur composée de toutes celles des rayons qui n'avaient pas été interceptés, et cette couleur variait continuellement avec la position du peigne. Mais lorsque Newton imprimait au peigne un mouvement assez rapide pour que la précipitation avec laquelle les impressions des diverses couleurs se succédaient, ne laissât plus à l'œil le temps de les distinguer, on ne voyait plus ni rouge, ni jaune, ni vert, ni bleu, ni violet; mais le mélange confus de toutes les couleurs donnait naissance à une blancheur uniforme, dont cependant aucune partie n'était blanche; chaque couleur y conservait encore son existence à part. Or, lorsqu'ensuite on retirait le peigne, rien n'était changé dans la manière d'être de la lumière blanche que l'œil apercevait encore sur le papier; seulement toutes les couleurs, dans ce cas, agissaient à la fois sur l'organe, au lieu que quand on employait le peigne, elles agissaient successivement, mais à des intervalles de temps si petits, que le résultat équivalait à un concours d'actions simultanées.

Réfutation de l'opinion qui ne suppose la Lumière composée que de trois Couleurs.

1108. Dans l'image colorée produite par la réfraction du prisme, l'orangé se trouve placé entre le jaune et le rouge, et le vert entre le bleu et le jaune. Or, on sait qu'en mêlant artificiellement du jaune avec du rouge, on obtient une couleur orangée, et si l'on mêle du jaune avec du bleu, on aura une couleur verte.

Cette observation a fait penser à quelques physiciens que l'orangé et le vert produits par la réfraction de la lumière à travers le prisme, provenaient du mélange de deux couleurs voisines, et devaient être supprimés dans l'ordre des couleurs homogènes. Mais cette idée est visiblement démentie par l'expérience; car si vous isolez les rayons verts de l'image, en interceptant les autres couleurs, et que vous fassiez passer ces rayons à travers un second, un troisième, un quatrième prisme, ils conserveront constamment leur couleur verte. Au contraire, si vous interceptez les rayons verts, rouges et violets, pour ne laisser subsister que le jaune et le bleu mêlés ensemble, au foyer d'une lentille, à l'aide du procédé que nous avons décrit précédemment (101), vous aurez d'abord une couleur verte; mais faites passer cette couleur à travers un nouveau prisme, et à l'instant elle va se résoudre en ses couleurs composantes, de manière que le bleu et le vert se peindront séparément sur un carton placé au-delà du second prisme. Il est fâcheux pour l'opinion dont il s'agit, que le rouge soit si éloigné du violet, qui se trouve placé à côté du bleu; car le violet se forme artificiellement par un mélange de rouge et de bleu; et ainsi on peut composer en peinture une espèce d'imitation de l'image colorée donnée par l'expérience, en employant seulement trois couleurs, savoir, le rouge, le jaune et le bleu; et effectivement, l'histoire nous apprend que les anciens peintres ont opéré pendant long-temps avec ces seules couleurs (1). Il est possible que cette faculté de faire beaucoup avec peu soit pour l'art une véritable richesse; mais c'est appauvrir la nature que de vouloir la resserrer dans les limites de nos moyens artificiels.

Explication des apparences que présentent les Objets vus à travers un Prisme.

1109. Supposons que l'on regarde par l'intermède d'un prisme *abc* (*fig. 55*) un objet voisin, tel qu'un carton blanc d'une certaine étendue, situé verticalement, et d'une figure rectangulaire,

(1) Encyclopédie méthod. , première partie; Beaux-Arts, t. I, p. 60.

qui ait deux de ses bords parallèles à l'axe du prisme; le choix de cette position et de cette figure n'a pour but que de ramener l'expérience à un cas simple; et ce que nous en dirons peut s'appliquer, proportion gardée, à tous les autres cas.

D'après ce que nous ayons dit (1089) de la réfraction des rayons à travers un prisme qui tourne sur son axe, on conçoit que, suivant les divers mouvemens que l'on fera faire au prisme, l'image du carton pourra être vue dans la position où elle devient stationnaire, ou se relever vers cette position, ou enfin s'abaisser en dessous. Or, dans chaque position, le bord supérieur présentera successivement, et en descendant, quatre bandes de diverses couleurs, dont la plus élevée sera le rouge pur, et les trois autres seront mélangées de rouge et d'orangé, d'orangé et de jaune, et de ces trois couleurs unies au vert. Le bord inférieur offrira quatre autres bandes qui, étant prises en remontant, donneront le violet pur, le violet mêlé d'indigo, puis ces deux couleurs unies au bleu, et enfin ces trois dernières couleurs unies au vert, et l'espace intermédiaire restera blanc.

1110. Pour expliquer cet effet, nous observerons qu'il part de tous les différens points du carton des rayons de toutes les couleurs qui, après s'être réfractés en traversant le prisme, se dirigent vers l'œil sous la forme d'une espèce de pyramide, dont le sommet est dans la prunelle. Supposons qu'il n'existe que des rayons rouges, la surface entière du carton paraîtra teinte de cette même couleur; chacune des autres espèces de rayons, si elle existait seule, ferait voir de même la surface du carton sous la couleur particulière à cette espèce. Réunissons maintenant toutes les couleurs; on pourra considérer les images qu'elles tendent à produire chacune séparément, comme autant de rectangles de sept couleurs différentes, qui anticipent les uns sur les autres d'une certaine quantité, par leurs bords supérieurs ou inférieurs, à cause de la différence des réfractions. Dans cette espèce d'enjambement d'une couleur sur l'autre, le rouge sera un peu relevé au-dessus de l'orangé, celui-ci au-dessus du jaune, et ainsi de suite, de manière que, vers le bord opposé, le violet descendra au-dessous de l'indigo, celui-ci au-dessous du bleu, etc.

Il résulte de là que la partie supérieure du carton se terminera par une bande de rouge pur ; qu'en dessous de cette bande il y en aura une seconde mêlée de rouge et d'orangé, puis une troisième mêlée de rouge, d'orangé et de jaune, et une quatrième mêlée de rouge, d'orangé, de jaune et de vert. Si l'on reprend ensuite les couleurs de bas en haut, on conçoit que la partie inférieure doit être bordée d'une bande de violet pur, au-dessus de laquelle il s'en trouvera une seconde mêlée de violet et d'indigo, puis une troisième mêlée de violet, d'indigo et de bleu, et enfin une quatrième mêlée de violet, d'indigo, de bleu et de vert. Dans l'espace compris entre cette quatrième bande et celle qui tient le même rang parmi les bandes supérieures, toutes les couleurs se trouvant mélangées produiront le blanc.

Tout ceci suppose que le carton ait une certaine étendue, ainsi que nous l'avons dit; moins sa hauteur sera considérable, et plus les couleurs se dégageront les unes des autres vers son milieu, et approcheront de l'arrangement qui a lieu dans l'image colorée produite par la réfraction du prisme, au moyen de l'expérience ordinaire; en sorte que la hauteur peut être assez petite pour que les différentes couleurs se succèdent, sans laisser aucun espace blanc intermédiaire.

De l'Arc-en-ciel.

1111. La lumière qui embellit avec tant de magnificence un ciel pur et serein, par le spectacle des astres qui la répandent, devient aussi quelquefois, pour un ciel sombre et nébuleux, un ornement qui, par la pompe et la variété de ses riches couleurs, semble appeler les regards et l'attention de tous ceux qui sont à portée de le voir. Dans ce peu de mots, on reconnaît déjà l'arc-en-ciel. Nous savons que ce phénomène n'a jamais lieu que quand un nuage opposé au soleil luisant se résout en pluie, d'où il suit que le spectateur a toujours le dos tourné au soleil. Assez ordinairement on aperçoit deux arcs; l'un intérieur, dont les couleurs sont plus vives; l'autre extérieur et plus pâle : tous deux présentent la même suite de couleurs que l'image produite par le

prisme, c'est-à-dire, le rouge, l'orangé, le jaune, le vert, le bleu, l'indigo et le violet ; mais dans l'arc intérieur le rouge est le plus élevé, et dans l'arc extérieur c'est le violet. Ces deux arcs dépendent de la réfraction de la lumière combinée avec sa réflexion, et on ne les aperçoit que quand les rayons incidens font, avec les rayons émergens, un certain angle que nous indiquerons bientôt.

1112. Antoine de Dominis paraît être le premier qui ait tenté, avec quelque succès, d'expliquer physiquement l'arc-en-ciel. Il l'imita à l'aide d'une expérience que nous ferons connaître, et détermina les différentes inflexions de la lumière dans les gouttes de pluie ; mais cette détermination n'est point exacte, relativement à l'arc extérieur. Descartes la réforma, et mit en général plus de précision dans la manière de tracer la marche des rayons. Enfin, Newton ayant repris cette explication, y ajouta le degré essentiel de perfection dont elle manquait, en analysant la distribution du coloris, qui est comme l'âme du phénomène : c'est d'après ses principes que nous allons la développer.

Rayons efficaces dans le cas de deux Réfractions et d'une seule Réflexion.

1113. Soit $fzpq$ (fig. 62) la circonférence d'un grand cercle provenant d'une section faite dans un globe transparent d'une densité plus grande que celle de l'air. Ayant mené un diamètre quelconque fp , supposons qu'un faisceau yf de rayons incidens homogènes, d'abord situé sur la direction de fp , monte parallèlement à lui-même le long du quart de cercle fz : ce faisceau étant parvenu, par exemple, en ab , se réfractera au point d'incidence suivant une direction telle que bd , puis se sous-divisera en deux parties, dont l'une repassera dans l'air en s'y réfractant de nouveau, et l'autre échappera à la réfraction en se réfléchissant sur la concavité intérieure du cercle, suivant une direction dt , de manière que l'arc dqt sera égal à l'arc dzb . Cette même partie, en repassant à son tour dans l'air, s'y réfractera suivant

une direction lm , qui fera, avec la perpendiculaire au point t , un angle égal à l'angle d'incidence du faisceau ab .

Prolongeons les lignes ab , mt jusqu'à ce qu'elles se rencontrent en x . L'angle axm sera celui que fait le rayon incident avec le rayon émergent. Or, le calcul fait voir que pendant le mouvement du rayon incident le long du quart de cercle fhz , l'angle axm augmente jusqu'à une certaine limite, passé laquelle il décroît.

Pour concevoir que cela doit être, il faut observer que la valeur de l'angle axm est double de l'arc dp (1). Or, à mesure que ab monte le long de fhz , dp lui-même va en augmentant jusqu'à un certain terme, passé lequel il diminue. C'est ce qu'on apercevra en faisant attention que l'angle d'incidence croissant toujours à mesure que yf s'élève, si l'on prend deux rayons incidents, tels que eh , ab , le rayon rompu hr , qui appartient au premier, s'inclinera nécessairement vers bd , qui est le rayon rompu relatif au second. Or, tant que la partie du quart de cercle fhz que rencontrent les rayons incidents, est peu inclinée sur le diamètre fp , le rayon hr est tout entier au-dessus du rayon bd , même en supposant l'arc bh extrêmement petit; mais à mesure que l'arc devient plus oblique, le rayon hr s'incline davantage vers bd , en sorte qu'il y a un terme où les extrémités des rayons rompus se confondent en un point commun d (fig. 63); et, au-delà de ce terme, l'obliquité de l'arc augmentant toujours, les deux rayons rompus, tels que hd , su , qui appartiennent aux rayons incidents eh , ns , se croisent; d'où l'on voit que dp (fig. 62) va en augmentant jusqu'au terme où les points r , d deviennent contigus, et diminue ensuite depuis ce même terme, auquel répond le maximum de l'angle axm (2).

(1) Ayant mené xl qui passe par le centre, et qui par conséquent coupera en deux également l'arc bt , on aura pour la mesure de axm , $\frac{1}{2}(bt - go) = bf + fl - dg = gp + dp - dg = dg + dp + dp - dg = 2dp$.

(2) Plus la partie de l'arc que rencontrent les rayons incidents est oblique, plus la différence augmente entre les incidences aux deux extrémités d'un même arc bh , hs , etc. (fig. 63), ces arcs étant supposés égaux. De plus,

1114. Rappelons-nous maintenant l'observation déjà faite précédemment (1085), que les variations d'une quantité qui approche de sa limite, ou qui commence seulement à s'en écarter, sont presque insensibles. Nous en concluons que dans le voisinage du point d , où les quantités dont les rayons rompus s'inclinent les uns sur les autres augmentent presque infiniment peu, la densité de la lumière réfractée et celle de la lumière réfléchie sur la concavité du cercle sont beaucoup plus grandes que partout ailleurs; d'où il suit que les rayons émergens provenus de cette même lumière, tels que tm , ik , etc. (fig. 63), seront eux-mêmes beaucoup plus abondans sur un petit espace donné.

D'une autre part, tous ces rayons émergens seront sensiblement parallèles entre eux, à cause du concours des rayons rompus dans un même point. Donc si l'on suppose qu'il tombe en même temps des rayons sur tous les points du quart de cercle $fiqz$, et qu'il y ait un spectateur dont l'œil soit situé au point o , pris sur une ligne qui passe entre mt et ki , cet œil recevra beaucoup plus de rayons que s'il était placé partout ailleurs, tant parce que ceux sur la direction desquels il se trouve sont beaucoup plus ramassés, que parce qu'étant parallèles, ils entreront en plus grand nombre dans la prunelle, que si l'œil n'était à portée que de ceux qui sortent en divergeant par les autres points compris entre f et q .

1115. On a donné à ces rayons qui s'accroissent, en quelque sorte, dans le voisinage de la limite, le nom de *rayons efficaces*, parce qu'ils sont les seuls dont l'impression soit bien sensible. On peut les assimiler à ceux qu'un miroir concave ou une lentille rassemblent dans un foyer commun où leur activité se concentre.

il est visible que les rayons eh , ns sont plus rapprochés que les rayons ab , eh . Or ces deux causes tendent à augmenter l'inclinaison respective des deux rayons réfractés, et cette augmentation devient telle à la fin, que les rayons se croisent.

*Rayons efficaces dans le cas de deux Réfractions
et de deux Réflexions.*

1116. Les rayons qui se réfléchissent du point d au point t , ne repassent pas tous dans l'air; mais une partie se réfléchit de nouveau sur la concavité du cercle, en sorte que la lumière subit successivement deux, trois, quatre, etc. réflexions, à chacune desquelles il y a un certain nombre de rayons qui rentrent dans l'air environnant. Nous nous bornerons ici à considérer l'effet produit par deux réflexions.

1117. Concevons donc de nouveau qu'un faisceau qi (fig. 64) de lumière homogène, dont la direction coïncide avec le diamètre ie , monte parallèlement à lui-même le long du quart de cercle inv , et que dans chacune de ses positions, telle que ab , une partie des rayons rompus qui ont parcouru bd , après s'être réfléchis de d en g , puis de g en t , rentrent dans l'air, suivant la direction tr , qui croise au point z le rayon incident ab . On démontre que, dans cette hypothèse, l'angle azr décroît jusqu'à un certain terme, passé lequel il augmente.

Pour donner une idée de cette variation, qui est l'inverse de celle que nous avons vu avoir lieu, dans le cas d'une seule réflexion, menons les prolongemens bu , ty , des rayons ab , rt , puis la ligne zl qui passe par le centre c , et coupe en deux moitiés l'angle bzt égal à azr . On prouve, d'une manière très simple, que la mesure de cet angle est double de l'arc is (1). Or, pendant le mouvement du rayon incident, le long de inv , l'arc is lui-même diminue d'abord et ensuite commence à augmenter. Car l'angle d'incidence devenant toujours plus grand, à mesure que le rayon s'élève, si l'on prend deux de ces rayons, tels que ab , mn , on concevra, en appliquant ici le raisonnement que nous avons fait plus haut (1112), que le rayon rompu no , qui appartient au rayon

(1) Cette mesure est $\frac{1}{2}(\gamma x - bt) = cx + el - bs = bs + is + is - bs = 2is$.

incident mn , doit s'incliner de plus en plus vers bd , qui est le rayon rompu relatif à ab , de manière qu'à un certain terme, le point o se confond avec le point d , et qu'ensuite les deux rayons se croisent. Or, en premier lieu, dans toutes les positions antérieures à ce croisement, l'arc is diminue. Pour le prouver, remarquons que les trois rayons bd , dg , gt étant égaux, la ligne zl qui coupe en deux l'angle bzt , passe par le milieu k du rayon dg qui provient de la première réflexion. Maintenant si nous considérons l'autre rayon incident mn , il est aisé de voir que le rayon rompu no qui lui appartient sera plus petit que bd , et ainsi le rayon réfléchi of sera aussi plus court que son analogue dg . Or, par une suite de cette différence et de la position respective des deux rayons, le milieu k' du rayon of est plus élevé que le milieu k du rayon dg , d'où il résulte que le diamètre $k'cs'$, qui étant prolongé, diviserait en deux l'angle formé par le rayon incident mn avec son rayon émergent, a son extrémité s' située entre les points s , i . Donc l'arc is a subi une diminution.

Si l'on suppose que le rayon incident étant encore plus élevé, le rayon no parvienne à couper le rayon bd , on concevra avec un peu d'attention, que le rayon of se trouvant alors tout entier au-delà du rayon dg , approchera du parallélisme avec celui-ci; en même temps l'angle analogue à azr continuera de décroître, mais toujours plus lentement, et lorsque of sera devenu parallèle à dg , comme on le voit (*fig. 65*), les points k et k' se trouveront sur un même diamètre, et l'angle azr aura atteint son *minimum*. Effectivement, si l'on imagine que le rayon incident continue de monter, le rayon no s'abaissant toujours davantage en dessous du rayon bd , par sa partie située vers o , le rayon of convergera avec dg , et le point k' commencera à descendre en dessous du point k , d'où il suit que le diamètre $k'cs'$ (*fig. 64*) aura son extrémité s' située en dessus du point s , et ainsi l'arc is se trouvera augmenté.

1118. Dans le cas du *minimum*, où le rayon of (*fig. 65*) est devenu parallèle à dg , le rayon émergent tr est aussi parallèle au rayon émergent ph . Maintenant, pour ramener la marche des rayons à celle qui a lieu par rapport à l'arc-en-ciel, il faut sup-

poser (ce qui revient au même), que rt et hp fassent la fonction de rayons incidens, et que ba et nm soient les rayons émergens correspondans; et en appliquant ici ce que nous avons dit (1113) des rayons qui ne subissent qu'une seule réflexion, on en conclura qu'un œil placé sur la direction d'une ligne menée entre nm et ba , doit recevoir beaucoup plus de rayons que dans toute autre position, c'est-à-dire, qu'il sera à portée des rayons efficaces.

Valeurs des Angles qui déterminent les effets des Rayons efficaces.

1119. Si l'on suppose que le passage de la lumière incidente se fasse de l'air dans l'eau, le *maximum* de l'angle axm (fig. 62) aura lieu pour les rayons rouges, lorsque cet angle sera de $42^{\text{d}} 2'$; et pour les rayons violets, lorsqu'il sera de $40^{\text{d}} 17'$. Dans le même cas, l'arc bf qui mesure l'angle d'incidence du rayon ab , à cause du parallélisme entre ab et le diamètre fp , est de $59^{\text{d}} 24'$, pour les rayons rouges, et de $58^{\text{d}} 41'$ pour les violets.

D'une autre part, le *minimum* de l'angle mzh (fig. 65), relativement aux rayons rouges, est de $50^{\text{d}} 57'$, et relativement aux rayons violets, de $54^{\text{d}} 7'$; l'angle d'incidence du rayon hp est alors de $71^{\text{d}} 50'$, pour les rayons rouges, et de $71^{\text{d}} 26'$ pour les violets.

Application des Principes précédens aux Phénomènes de l'Arc-en-ciel.

1120. Concevons un spectateur dont l'œil soit placé en O (fig. 66), et quatre globules d'eau df , ac , kr , gl , tellement situés que les rayons solaires Sd , Sa , Sr , Sl , après deux réfractions et une réflexion dans les globules inférieurs, ou après deux réfractions et deux réflexions dans les globules supérieurs, fassent avec les rayons émergens des angles égaux à ceux que nous venons de citer, savoir, OxS de $40^{\text{d}} 17'$, OzS de $42^{\text{d}} 2'$, OyS de $50^{\text{d}} 57'$, et OuS de $54^{\text{d}} 7'$: on suppose ici que les rayons partent du centre

du soleil ; et comme la distance qu'ils parcourent est presque infinie relativement à celle qui sépare les globules d'eau, ils sont condensés parallèles entre eux.

Or, il est clair, d'après ce que nous avons dit précédemment (1118), que l'angle OzS de $42^{\text{d}} 2'$ étant celui que font entre eux les rayons rouges incidens et émergens, dans le cas où ces rayons sont le plus condensés, l'œil apercevra le rouge le plus vif dans le globule ac , ainsi que dans tous les autres situés semblablement sur la direction Oc . D'une autre part, l'angle OxS étant celui qui se rapporte aux rayons violets efficaces, l'observateur verra le violet le plus intense dans le globule df , et dans tous ceux qui seront sur la direction Of ; de plus, il ne verra que le rouge dans les premiers globules, et que le violet dans les seconds; car les rayons orangés, par exemple, dont la réfraction est plus grande que celle des rayons rouges, doivent, pour être efficaces, se réfracter, de manière que l'angle formé par les incidens avec les émergens soit moindre que $42^{\text{d}} 2'$, et plus grand que $40^{\text{d}} 17'$; et puisque l'angle dont il s'agit est le plus grand parmi tous ceux que peuvent faire les mêmes rayons, cet angle ne peut avoir lieu à l'égard du globule ac ou du globule df , mais il existera dans quelqu'un des globules intermédiaires. Il suit de là que les couleurs comprises entre le rouge et le violet, ainsi que les nuances de ces couleurs, seront vues successivement dans les globules situés entre ac et df , suivant l'ordre prescrit par leurs divers degrés de réfrangibilité; en sorte que la succession de toutes les couleurs, prise en descendant, sera celle-ci : rouge, orangé, jaune, vert, bleu, indigo, violet; mais le violet étant mêlé avec la couleur blanchâtre des nuages adjacens, se trouvera affaibli par ce mélange, et tirera sur la couleur pourprée.

1121. Soit maintenant OP une droite parallèle aux rayons solaires, et que l'on appelle l'axe de la vision. Concevons que les rayons Ox , Oz , et tous les autres qui appartiennent aux globules intermédiaires, restant fixes par leur point commun O , tournent autour de OP en continuant de faire le même angle avec cette ligne : ces rayons décriront une bande curviligne $CDfEGa$ qui se terminera à l'horizon, et tous les globules situés dans les li-

mités de cette bande, ainsi que ceux qui se trouvent sur les surfaces coniques décrites par le mouvement des rayons xO , Oz , etc., feront voir à l'œil des couleurs qui s'étendront circulairement sur toute la surface $CDfEGa$, dans le même ordre que celui des couleurs comprises depuis a jusqu'en f : telle est la manière dont se forme l'arc intérieur.

1122. En appliquant le même raisonnement à l'arc extérieur, on concevra que l'angle OuS de $54^{\text{d}} 7'$ étant celui que font entre eux les rayons violets incidens et émergens, qui agissent le plus efficacement, l'observateur verra le violet foncé dans le globule gl . De plus, l'angle OyS de $50^{\text{d}} 57'$ faisant la même fonction à l'égard des rayons rouges, l'observateur apercevra le rouge le plus vif dans le globule kr : les autres couleurs s'offriront successivement avec toutes leurs nuances dans les globules intermédiaires, et s'étendront, ainsi que le violet et le rouge, sur la surface d'une bande curviligne $ABmHNg$, qui formera l'arc extérieur. Mais toutes ces couleurs se présenteront dans un ordre renversé, par rapport à celles de l'arc intérieur; en sorte qu'en allant de haut en bas, leur succession sera celle-ci: violet, indigo, bleu, vert, jaune, orangé, rouge. D'ailleurs elles seront beaucoup plus faibles, parce que les rayons qui les produisent subissent deux réflexions, à chacune desquelles il y en a toujours une partie qui repassent dans l'air.

Largeurs des deux Arcs.

1123. La largeur apparente de l'arc intérieur, d'après les principes qui viennent d'être exposés, est de $1^{\text{d}} 45'$, différence entre les angles OxS , OzS ; celle de l'arc extérieur est de $3^{\text{d}} 10'$, différence entre les angles OyS , OuS ; et la distance entre les deux arcs est de $8^{\text{d}} 55'$, différence entre les angles OyS , OzS .

1124. Telles seraient effectivement les dimensions des deux arcs, si le soleil n'était qu'un point, ou s'il n'envoyait vers les gouttes de pluie que des rayons partis de son centre; mais il en vient également de tous les points de son disque, ce qui augmente un peu la largeur de l'un et l'autre arc.

Pour concevoir la manière dont cette augmentation a lieu, observons que le diamètre du soleil, vu à la distance immense où nous sommes de cet astre, sous-tend un angle d'environ 30 minutes (1090). Or, si nous nous bornons à considérer les deux rayons qui partent des extrémités du diamètre pris dans le sens vertical, il est facile de juger que l'effet du rayon supérieur est le même à l'égard de celui du rayon central, que si le soleil, après avoir produit les deux arcs en vertu de ce seul rayon, se trouvait tout d'un coup relevé d'un quart de degré au-dessus de l'horizon, et que pour avoir pareillement l'effet du rayon inférieur, il suffit de supposer que le soleil s'abaisse d'un quart de degré vers l'horizon.

1125. Cela posé, soit $s's''$ (fig. 67) le diamètre vertical du soleil, et sz le rayon qui donne le rouge de l'arc intérieur, par l'intermédiaire du globule ac , comme nous l'avons expliqué précédemment; soit toujours o la position de l'œil, et oz le rayon émergent. Concevons que le point s soit transporté en s' , et qu'un rayon parti de s' prenne une direction telle que $s'gz'$, qui croise dans quelque point g celle du rayon sz . Ayant mené og , décrivons une circonférence de cercle qui passe par les points z, o, g , et du point o menons la ligne oz' qui rencontre sz' à l'endroit où celle-ci coupe la circonférence. L'angle $gz'o$ sera évidemment égal à l'angle gzo , c'est-à-dire qu'il sera de $42^d 2'$, et en même temps l'angle zgz' sera d'un quart de degré, comme l'angle $s'gs$ qui mesure le demi-diamètre du soleil. Donc la position du rayon $s'z'$ est celle qui satisfait à la condition requise, pour que l'œil voie de nouveau le rouge dans le globule $a'c'$ placé au-dessus du globule ac .

Les rayons qui appartiennent aux autres couleurs, et qui sont censés partir aussi du point s' feront voir ces mêmes couleurs dans d'autres globules inférieurs au globule az , en sorte qu'il se formera un second arc dont tous les points se releveront de $15'$ au-dessus de ceux qui leur correspondent dans l'arc produit par les rayons émanés du point s , ce qui fera croître de $15'$ la largeur de ce dernier arc, vers son bord supérieur.

En faisant le même raisonnement par rapport au point s'' , ou

en conclura qu'un rayon $s''z''$ qui croise le rayon sz au point g fera aussi un angle de $42^{\text{d}} 2'$ avec le rayon oz'' mené de l'œil au point où $s''z''$ rencontre la circonférence, d'où il résulte que l'œil verra encore le rouge dans un globule $a''c''$ situé au-dessous du globule az ; et comme toutes les autres couleurs reparaitront de même dans des globules inférieurs, l'ensemble des rayons partis de s'' donnera naissance à un troisième arc, dont tous les points s'abaisseront de $15'$ en dessous des points analogues de l'arc formé par les rayons émanés de s , ce qui fera croître de $15'$ la largeur de cet arc vers son bord inférieur. Ainsi la largeur totale surpassera de $30'$ celle qui avait lieu en vertu de la seule réfraction du rayon sz , de manière qu'elle sera $2^{\text{d}} 15'$.

Par une suite nécessaire, la largeur de l'arc extérieur recevra les mêmes accroissemens, et sera en totalité de $3^{\text{d}} 40'$, et la distance entre les deux arcs se trouvant diminuée de $30'$, ne sera plus que de $8^{\text{d}} 25'$. Newton a vérifié ces dimensions par des observations directes, (1).

Circonstances qui font varier la partie visible de l'Arc-en-ciel.

1126. On voit une partie plus ou moins grande de l'arc-en-ciel, suivant que le soleil est plus ou moins élevé au-dessus de l'horizon. Lorsque cet astre est près du plan même de l'horizon, l'axe OP (fig. 66) de la vision, qui est en même temps celui du cône formé par tous les rayons efficaces, coïncide aussi avec l'horizon, ou à peu près, et dans ce cas l'arc-en-ciel paraît sous la figure d'un demi-cercle. A mesure que le soleil s'élève, l'axe OP s'abaisse de la même quantité en dessous de sa première position, et l'arc va en diminuant $Enfn$, lorsque le soleil est à 42^{d} au-dessus de l'horizon, l'axe se trouvant abaissé en dessous de ce cercle du même nombre de degrés, le sommet de l'arc-en-ciel touche l'horizon; d'où il suit que si le soleil s'élève davantage,

(1) *Optice Lucis*, lib. II, pars 3, propos. 12.

l'arc intérieur disparaîtra; il ne restera plus qu'une portion de l'arc extérieur, qui ne cessera d'être visible que quand la hauteur du soleil sera de 54^d .

1127. Si l'on se trouve sur une éminence, lorsque le soleil est à l'horizon, ou même au-dessous, l'axe OP se relèvera en dessus du même horizon, et ainsi l'arc surpassera un demi-cercle; et si le lieu étant très élevé, le nuage est à une petite distance de l'observateur, il pourra arriver que celui-ci voie le cercle entier (1).

Cas où l'on voit plus de deux Arcs-en-ciel.

1128. Nous avons dit (1116) que les rayons qui sont entrés dans chaque goutte de pluie subissent des réflexions continues, en vertu desquelles ils décrivent une espèce de polygone qui se replie sur lui-même; mais à chaque contact des rayons avec la concavité du globule, une partie échappe à la réflexion pour repasser dans l'air, en sorte que le nombre de ceux qui continuent de se réfléchir d'un point à l'autre de la même concavité, va toujours en diminuant. On peut donc supposer des rayons incidents, dont telle soit la position relativement à l'arc qu'ils rencontrent, qu'a-

(1) Smith, Traité d'Optique, 1767, p. 587.

Soit NH (*fig.* 68) l'horizon, S le soleil un peu élevé au-dessus de ce cercle, O l'œil du spectateur, C un globule de pluie dans lequel cet œil aperçoit le rouge: les lignes OC, OP étant presque infiniment petites par rapport à la distance du soleil à la terre, on conçoit comment l'angle COP peut être de $42^d 2'$, malgré la petite élévation du soleil, et comment par une suite nécessaire, l'axe OP de la vision doit coïncider à peu près avec l'horizon; et ainsi l'arc-en-ciel sera un demi-cercle.

Si le soleil S (*fig.* 69) est élevé de $42^d 2'$ au-dessus de l'horizon, alors l'angle SCO d'une part, et l'angle COP de l'autre, étant aussi chacun de $62^d 2'$, OC coïncidera avec l'horizon, et par conséquent l'arc-en-ciel intérieur touchera seulement l'horizon, et sera tout entier en dessous. Enfin, si le soleil étant à l'horizon ou au-dessous, le spectateur est sur une haute montagne, et que le nuage soit peu éloigné, l'axe OP (*fig.* 68) pourra se relever tellement que la ligne CP, prolongée inférieurement d'une quantité égale à elle-même, aboutisse à l'horizon; et dans ce cas le cercle entier sera visible pour le spectateur.

près trois réflexions ceux d'une couleur déterminée qui rentreront dans l'air, étant dans le cas des rayons efficaces (1114), se dirigent vers l'œil; et ainsi il se formera un troisième arc-en-ciel plus élevé que le second; mais les couleurs, dans ce cas, sont tellement affaiblies par les pertes qu'elles ont faites à chacune des trois réflexions, qu'il est rare que l'on puisse distinguer ce troisième arc; à moins que le ciel ne soit très sombre dans la partie située en face du spectateur, et que le soleil n'éclaire fortement la partie opposée (1). On conçoit de même la possibilité qu'il se forme un quatrième arc-en-ciel, par des rayons qui subiront quatre réflexions et deux réfractions, et ainsi de suite; mais tous ces arcs ne peuvent être aperçus qu'à travers la théorie.

1129. On remarque aussi quelquefois au-dessous du premier arc-en-ciel, d'autres arcs qui présentent rarement l'ensemble des couleurs propres à ce phénomène: le plus communément, il n'y en a qu'une ou deux qui soient visibles. Pemberton attribue ces arcs secondaires à des rayons qui se dispersent, en s'écartant néanmoins assez peu de ceux qui produisent l'arc-en-ciel ordinaire, pour que l'œil se trouve sur leur direction. Parmi les couleurs qui proviennent de ces rayons, les unes se perdent dans la partie violette du premier arc, et les autres sont vues distinctement dans l'espace situé au-dessous (2).

1130. L'expérience par laquelle Antoine de Dominis avait représenté le phénomène de l'arc-en-ciel, consistait à suspendre une boule de verre remplie d'eau dans un endroit exposé au soleil, et à la faire monter et descendre de manière que les angles formés par les rayons incidens et émergens variassent depuis 42^{d} jusqu'à 51^{d} environ. On voyait successivement les couleurs des deux arcs se peindre dans la boule, suivant l'ordre où elles se présentent dans les globules de la pluie.

1131. D'après l'explication que nous venons de donner de l'arc-en-ciel, il est facile d'y ramener plusieurs effets qui sont comme

(1) Musschenbroek, Essai de Physique, t. II, p. 793.

(2) Pemberton, Elémens de Philos. Newtonn., traduct. franç.; Amsterdam, 1795, p. 488 et suiv.

autant de copies de ce magnifique tableau : on parvient à l'imiter artificiellement, en jetant de l'eau en l'air de manière qu'elle se parpille, et en tournant le dos au soleil. On aperçoit souvent ses couleurs dans la cime d'un jet d'eau; quelquefois il se peint sur l'herbe d'une prairie humectée par la rosée, et mêle ses diverses teintes à celles des fleurs qui embellissent la verdure.

Des Couleurs considérées dans les Corps.

1132. Nous avons fait voir, d'après la théorie de Newton, en quoi consistent les couleurs considérées dans la lumière, et nous avons reconnu la cause des impressions variées que produisent sur nos yeux ce que nous appelons le *rouge*, le *jaune*, le *vert*, etc., dans les différentes qualités inhérentes aux rayons, et indiquées par les divers degrés de réfrangibilité dont ils sont susceptibles. Nous avons maintenant à considérer les couleurs dans les corps dont elles accompagnent les images. La diversité de ces couleurs provient en général de la disposition particulière de chaque corps pour réfléchir la lumière. Lorsque cette disposition est telle que le corps réfléchit les rayons de toute espèce, dans l'état de mélange où ils arrivent à lui, ce corps nous paraît blanc, et ainsi, à proprement parler, la blancheur n'est point une couleur particulière; elle est l'assemblage de toutes les couleurs.

Si le corps est disposé de manière à réfléchir telle espèce particulière de rayons plus abondamment que les autres, en absorbant tout le reste, il paraîtra de la couleur relative à ces mêmes rayons. Ainsi, les corps rouges, bleus, verts, etc., sont ceux qui réfléchissent une grande quantité de rayons rouges, ou bleus, ou verts, etc., et qui éteignent les autres espèces de rayons.

1133. Un grand nombre de corps sont propres en même temps à la réflexion de plusieurs espèces de rayons, et, par une suite nécessaire, présentent des couleurs mixtes. Il peut même arriver que de deux corps qui auraient, par exemple, la couleur verte, l'un réfléchisse le vert pur de la lumière, et l'autre le mélange du jaune et du bleu, d'où résultera la même couleur. Ce triage, qui varie à l'infini, donne lieu aux différentes espèces de rayons

de se réunir de toutes les manières et dans toutes les proportions ; et de là cette diversité inépuisable de nuances que la nature a répandues, comme en se jouant, sur la surface des différens corps.

1134. Lorsqu'un corps absorbe presque toute la lumière qui arrive à lui, ce corps paraît noir ; il envoie à l'œil si peu de rayons réfléchis, qu'il n'est presque pas visible par lui-même, et sa présence, ainsi que sa figure, ne font impression sur nous qu'en ce qu'il interrompt, en quelque sorte, l'éclat de l'espace environnant.

Mais pour qu'un corps réfléchisse plutôt telle espèce de rayons que telle autre, il faut qu'il y ait en lui quelque chose qui détermine cette préférence : en quoi donc le corps rouge diffère-t-il, à cet égard, du corps jaune, ou vert, ou violet ? On a essayé de répondre à ces questions d'après différentes hypothèses. Newton qui, de son côté, s'est beaucoup occupé de ce sujet intéressant, a continué d'interroger ici la nature avec le même succès, à l'aide d'une très belle suite d'expériences dont nous allons faire connaître les résultats (1).

Phénomène des Anneaux colorés.

1135. Ayant pris deux objectifs de télescope, l'un plan convexe, l'autre légèrement convexe des deux côtés, Newton posa l'une des faces de celui-ci sur la surface plane du premier, et pressa d'abord légèrement les deux verres, et ensuite de plus en plus, l'un contre l'autre. L'effet de cette pression graduée fut de faire paraître, dans la lame d'air comprise entre les deux verres, différens cercles colorés, qui avaient le point de contact pour centre commun, et dont le nombre augmentait en même temps que la pression des verres, de manière que celui qui avait paru le dernier environnait toujours le point de contact ; et que ce même cercle, sous un nouveau degré de pression, étendait sa circonférence en même temps que sa surface s'évidait, pour former une espèce d'anneau autour d'un nouveau cercle qui naissait vers son milieu.

(1) *Optice Lucis*, lib. II, pars 1 obser. 4, 5, 6, etc.

La pression ayant été poussée jusqu'à un certain terme, Newton s'arrêta, et voici ce que l'observation lui offrit. Il y avait au point de contact une tache noire, qui était environnée de plusieurs séries de couleurs. Voici l'ordre que gardaient ces couleurs, en allant du centre vers les bords des deux verres : dans la première série, bleu, blanc, jaune et rouge ; dans la seconde, violet, bleu, vert, jaune et rouge ; dans la troisième, pourpre, bleu, vert, jaune et rouge ; dans la quatrième, vert et rouge ; dans la cinquième, bleu-verdâtre, rouge ; dans la sixième, bleu-verdâtre, rouge pâle ; dans la septième, bleu-verdâtre, blanc-rougeâtre. Au-delà de ces séries, dont les teintes allaient toujours en s'affaiblissant, la couleur retombait dans le blanc.

1136. Newton mesura les diamètres des bandes annulaires, formées de ces différentes séries, en prenant les endroits où elles avaient le plus d'éclat, et il trouva que les carrés de ces diamètres étaient entre eux comme les termes de la progression 1, 3, 5, 7, 9, 11, etc., d'où il résulte que les intervalles entre les deux verres, aux endroits correspondans, suivaient la même progression (1).

D'après ces rapports, il suffisait de connaître la longueur absolue d'un seul diamètre, pour avoir les longueurs de tous les autres, ainsi que les épaisseurs de la lame d'air aux endroits où l'on voyait les différentes couleurs. Newton dressa une table de ces épaisseurs, par laquelle on voit que le bleu le plus intense, par exemple celui de la première série, est donné par une épaisseur de 0^{punc} , 000024, en supposant le rayon visuel à peu près perpendiculaire sur les deux objectifs.

(1) Soit *nam* (fig 70) un diamètre pris sur la surface du verre plan, et *agf* une coupe de la sphère à laquelle appartient la partie de l'objectif biconvexe tournée vers *an*. Soient de plus *ab*, *ad*, les demi-diamètres de deux anneaux aux endroits où les couleurs sont les plus vives. Ayant mené *be*, *dg* parallèles au diamètre *af*, et *eh*, *gi* parallèles à *an*, on aura, par la propriété du cercle, $(eh)^2 : (gi)^2 :: ah \times h : ai \times if :: ah \times af : ai \times af :: ah : ai :: be : dg$, les lignes *hf*, *if* étant censées égales au diamètre *af*, à cause que *ah*, *ai* qui mesurent les intervalles *be*, *dg* entre les verres, sont censées être presque infiniment petites à l'égard du diamètre.

1137. Newton ayant aussi mesuré les diamètres des anneaux aux endroits intermédiaires où les couleurs s'obscurcissaient, trouva que leurs carrés étaient entre eux comme les nombres pairs 2, 4, 6, 8, 10, 12, etc., et ainsi les intervalles entre les verres, aux endroits correspondans, suivaient une semblable progression.

1138. Les diamètres des anneaux augmentaient ou diminuaient, suivant que le rayon visuel était plus ou moins incliné à la surface des deux verres, de sorte que la plus grande contraction avait lieu lorsque l'œil était situé perpendiculairement au-dessus des verres. Du reste, les diamètres conservaient entre eux les mêmes rapports.

1139. Tels étaient les phénomènes que présentaient les verres vus par réflexion; mais lorsqu'on regardait au travers, pour observer l'effet de la lumière réfractée, de nouvelles séries de couleurs remplaçaient les précédentes. La tache centrale devenait blanche, et l'ordre des couleurs, relativement aux différentes séries, était celui-ci : dans la première, rouge-jaunâtre, noir, violet, bleu; dans la seconde, blanc, jaune, rouge, violet, bleu; dans la troisième, vert, jaune, rouge, vert-bleuâtre; dans la quatrième, rouge, vert-bleuâtre; dans la cinquième et dans la sixième, les deux mêmes couleurs. En comparant ces couleurs vues par réfraction, avec celles qui provenaient de la réflexion, on remarquait que le blanc répondait au noir, le rouge au bleu, le jaune au violet, le vert à un mélange de rouge et de violet, c'est-à-dire, que la même partie qui paraissait noire à la vue simple, devenait blanche lorsqu'on regardait à travers les objectifs, et ainsi des autres couleurs. Mais les teintes produites par la lumière réfractée étaient faibles et languissantes, à moins que le rayon visuel ne fût très oblique: dans ce cas, elles prenaient assez d'éclat et de vivacité.

1140. Newton substitua l'eau à l'air entre les deux objectifs; à l'instant les couleurs s'affaiblirent, et les anneaux se contractèrent, c'est-à-dire, que celui de telle couleur déterminée avait sa circonférence plus près du centre, que quand cette couleur

était réfléchi par la lame d'air (1). Les diamètres de ces anneaux correspondans étaient entre eux à peu près comme 7 est à 8, et par conséquent le rapport de leurs carrés était celui de 49 à 64; d'où il suit que les épaisseurs des fluides, aux endroits où paraissaient les anneaux, étaient environ comme 3 à 4, c'est-à-dire, dans le rapport du sinus d'incidence à celui de réfraction, lorsque la lumière passe de l'eau dans l'air. Newton pense que ce résultat pourrait être étendu à toutes les espèces de milieux, en sorte que l'on en déduirait cette règle générale : lorsqu'un milieu plus ou moins dense que l'eau est resserré entre deux verres, l'intervalle entre ces verres, à l'endroit où l'on aperçoit cette couleur, est à l'intervalle qui donne la même couleur, au moyen de l'air, dans le rapport des sinus qui mesurent la réfraction, au passage du même milieu dans l'air. Cette règle pourra également s'appliquer à une lame mince détachée d'un corps quelconque, dont on voudrait déterminer l'épaisseur d'après le ton de sa couleur. Nous donnerons bientôt un exemple de la marche qui doit être suivie dans ces sortes de déterminations.

1141. Newton varia l'expérience de plusieurs autres manières; il fixa son attention sur les couleurs des bulles qui se produisent dans une eau savonneuse, dilatée par l'air qu'on y introduit en soufflant dans un tube (2). Il observa les changemens qu'elles subissaient, à mesure que la pellicule aqueuse, dont chaque bulle était formée, s'amincissait par l'écoulement de l'eau qui descendait de sa partie supérieure; il vit aussi les anneaux composés de ces couleurs se dilater, en s'écartant du sommet de la bulle, lorsqu'il les regardait plus obliquement; mais cette dilatation était beaucoup moindre, toutes choses égales d'ailleurs, que quand les couleurs étaient réfléchies par l'air. Il conclut de cette observation et de plusieurs autres, que quand la substance colorée avait une densité incomparablement plus grande que celle du milieu environnant, le changement d'obliquité dans la direction du rayon visuel n'en apportait aucun qui fût sensible dans la po-

(1) *Optice Lucis*, lib. II, pars 1, observ. 10.

(2) *Optice Lucis*, lib. II, pars 1, observ. 17.

sition des couleurs; en sorte que chaque partie, vue sous tous les degrés d'inclinaison, conservait constamment sa couleur.

Anneaux produits par des Couleurs solitaires.

1142. Dans toutes les expériences que nous venons de citer, les séries de couleurs, produites par la réflexion ou par la réfraction, différaient plus ou moins entre elles, soit par le nombre, soit par la combinaison des teintes. Newton, à l'aide d'une nouvelle expérience, parvint à démêler les différentes couleurs homogènes pour concourir vers l'effet total, et à faire, en quelque sorte, l'analyse du phénomène.

Ayant fait l'obscurité dans la chambre destinée à ses expériences, il se servit d'un prisme à travers lequel passait un rayon de lumière qui projetait le spectre solaire sur un papier blanc. La lame d'air comprise entre les deux verres réfléchissait, comme un miroir, les rayons renvoyés par ce papier (1). Newton tenant alors son œil immobile, il n'y avait qu'une seule couleur qui pût parvenir à cet œil, à l'aide de la réflexion produite par le papier. Mais ayant invité quelqu'un à faire tourner le prisme, soit dans un sens soit dans l'autre, autour de son axe, il vit paraître successivement des suites diversement colorées d'anneaux concentriques, de manière que ceux qui se présentaient simultanément étaient tous d'une même couleur. Les anneaux rouges avaient leurs diamètres sensiblement plus grands que les violets, et Newton dit qu'il avait un plaisir extrême à voir les anneaux passer tour à tour par différents degrés de dilatation ou de contraction, à mesure que les couleurs se succédaient. Il résultait de l'ensemble des observations que le violet était la couleur qui donnait en général, les plus petits anneaux, et qu'ensuite les diamètres croissaient graduellement dans l'ordre où s'offraient les autres couleurs, c'est-à-dire, le bleu, le vert, le jaune et le rouge. Ainsi, le premier des anneaux bleus était un peu plus éloigné du centre que le premier des violets; le premier des

(1) *Optice Lucis*, lib. II, pars 1, observ. 12, 13, 14, etc.

anneaux verts était situé un peu au-delà du premier des anneaux bleus, etc.; il en était de même des seconds, des troisièmes, etc., pris dans les différentes séries.

1143. De plus, la même couleur qui était réfléchie à certains endroits de la lame d'air était transmise dans les espaces intermédiaires. Les carrés des diamètres des anneaux qui provenaient de la réflexion suivaient, ainsi que dans la première observation, les rapports des nombres impairs 1, 3, 5, 7, 9, etc.; et les carrés des diamètres des anneaux produits par la couleur réfractée étaient entre eux comme les nombres pairs 2, 4, 6, 8, 10, etc.; d'où il résultait que les épaisseurs de la lame d'air aux endroits qui réfléchissaient la couleur et à ceux où la réfraction avait lieu étaient soumises respectivement aux mêmes rapports.

1144. Les épaisseurs dont nous venons de parler avaient été mesurées aux points où la couleur soit réfléchie, soit réfractée, était la plus vive. En partant de ces points, l'intensité de la lumière se dégradait indéfiniment de part et d'autre. Or, Newton ayant pour but d'assigner des largeurs aux différens anneaux, ce qui exigeait qu'il assignât aussi des limites aux dégradations dont nous venons de parler, adopta l'hypothèse suivante, qui était la plus simple que l'on pût faire.

1145. Concevons que dans la série 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, etc., le terme 2 représente maintenant l'épaisseur de la lame d'air à l'endroit où le premier des anneaux violets vus par réflexion et relatifs à une même position du prisme, est le plus fortement coloré, et appelons-la *l'épaisseur moyenne* de l'anneau. Celle du second sera 6, puisqu'elle est à celle du premier comme 3 est à 1; celle du troisième sera 10, etc. Par la même raison l'épaisseur moyenne du premier anneau violet vu par réfraction sera 4; celle du second sera 8; celle du troisième sera 12, etc.

Pour fixer maintenant les épaisseurs extrêmes, ou celles qui ont lieu aux deux extrémités de la largeur de chaque anneau, ce qui se présente de plus naturel est de supposer que, relativement au premier des anneaux violets vus par réflexion, la plus petite soit représentée par 1, et la plus grande par 3. De même les deux

nombres situés l'un à la gauche et l'autre à la droite d'un nombre quelconque qui est l'expression d'une épaisseur moyenne, représenteront les épaisseurs extrêmes de l'anneau correspondant, de manière que chacune de ces épaisseurs sera commune à deux anneaux consécutifs vus l'un par réflexion et l'autre par réfraction. Les épaisseurs relatives aux anneaux des autres couleurs suivront le même rapport.

1146. L'apparition de chaque couleur avait une petite durée, qui répondait à un certain mouvement du prisme, pendant lequel on voyait naître successivement différentes nuances de cette même couleur, jusqu'à ce qu'une nouvelle couleur vint à son tour offrir une semblable succession. Or, en supposant le mouvement du prisme uniforme, les différentes couleurs arrivaient, les unes plus tôt, les autres plus tard à leur dernier degré de dilatation, ou au plus grand accroissement du diamètre de leurs anneaux. La plus petite dilatation était celle de la couleur violette, et la plus grande celle de la couleur rouge, ce qui est le contraire de ce qu'on observe dans le spectre solaire, où le rouge est la couleur la plus resserrée et le violet la plus étendue. Newton ayant mesuré les épaisseurs de la lame d'air aux endroits qui offraient les limites des sept couleurs relatives à une même série, et prises dans l'ordre suivant, rouge, jaune, orangé, vert, bleu, indigo, violet, trouva qu'elles étaient comme les racines cubiques des carrés des nombres $1, \frac{8}{9}, \frac{5}{6}, \frac{3}{4}, \frac{2}{3}, \frac{3}{5}, \frac{9}{10}, \frac{1}{2}$; ou comme les nombres 10000, 9243, 8855, 8255, 7631, 7114, 6814, 6300 (1); et il est remarquable que la progression d'où ces nombres ont été extraits, soit celle qui représente, comme on l'a vu (1104), les sinus

(1) Ces nombres sont censés représenter les épaisseurs moyennes des anneaux qui forment les limites des sept couleurs considérées dans une même série, c'est-à-dire, les épaisseurs qui répondent aux endroits où la réflexion est la plus vive. La figure 71 servira à donner une idée de leurs positions relativement aux couleurs dont il s'agit. Le nombre 6300 indique l'épaisseur moyenne de l'anneau qui donne la première nuance de violet; le nombre 6814 désigne l'épaisseur qui répond à l'endroit où finit le violet et où commence l'indigo, et ainsi de suite jusqu'au nombre 10000, qui est l'épaisseur moyenne de l'anneau situé à l'endroit où se termine le rouge.

de réfraction des couleurs relatives aux mêmes limites, avec la différence que, dans ces dernières couleurs, elle va du violet au rouge. La lumière reproduit ici, sous une nouvelle forme, le type de l'échelle qui constitue notre gamme musicale dans le mode mineur (526).

1148. Maintenant, lorsque les deux objectifs étaient exposés à la lumière du jour, les diverses couleurs qui composent cette lumière formaient toutes à la fois leurs anneaux aux mêmes distances que quand elles agissaient séparément dans la seconde expérience; et si telles avaient été ces distances, que les anneaux des différentes couleurs ne pussent anticiper les uns sur les autres, chaque série aurait présenté par ordre autant de couleurs distinctes; mais les anneaux ayant des largeurs plus ou moins sensibles, et étant plus ou moins serrés entre eux dans l'espace qu'ils occupaient, se confondaient du moins en partie, à certains endroits, ce qui avait lieu spécialement dans la première série, qui renfermait une petite bande annulaire d'un blanc vif, produit par le mélange de toutes les couleurs (1). Dans chacune des séries suivantes les couleurs étaient en général plus distinctes; mais, passé un certain terme, les séries voisines anticipaient elles-mêmes les unes sur les autres: de là les couleurs, tantôt simples ou à peu près, tantôt plus ou moins mélangées et diversement nuancées, que présentaient successivement les différentes séries. Les rayons

(1) Soit ν_{1xz} (fig. 72) une coupe de la lame d'air prise dans l'espace auquel répondent les couleurs de la première série. Soit ν_2 l'épaisseur moyenne de l'anneau qui donne la première nuance de violet, et ν_1 , ν_3 les deux épaisseurs extrêmes. Soit de même ν_2 l'épaisseur moyenne à l'endroit où finit le violet et où commence l'indigo, et ν_1 , ν_3 les épaisseurs extrêmes. Soit enfin r_2 l'épaisseur moyenne à l'endroit où commence le rouge et où se termine l'orangé et r_1 , r_3 les épaisseurs extrêmes. On aura (fig. 71 et 72), $\nu_2 = 6300$; $\nu_1 = 6300$; $\nu_3 = \frac{2}{3}(6300)$, $\nu_1 = \frac{4814}{3} = 3407$, et $\nu_3 = \frac{2}{3}(6814) = 10221$. De plus, $r_1 = \frac{2143}{3} = 4621 + \frac{1}{3}$, et $r_3 = \frac{2}{3}(9243) = 13864 + \frac{1}{3}$. Donc r_1 est plus petite que ν_2 , et r_3 plus grande que ν_3 . Donc la position de r_1 étant à la gauche de ν_2 , et celle de r_3 étant à la droite de ν_3 , le violet et le rouge se confondent sur l'espace $\nu_2\nu_3$.

Or, le violet et le rouge étant les couleurs extrêmes de la série, il est facile de concevoir que la plus petite des épaisseurs extrêmes de la première nuance

qui se réfractaient dans les intervalles des anneaux formés par la réflexion des couleurs isolées se combinaient d'une manière analogue; en sorte que tel degré de ténuité dans un point donné de la lame d'air était propre en même temps à la réflexion de telle couleur simple ou mélangée, et à la transmission de telle autre couleur.

1148. Toutes ces couleurs pâlissaient et s'effaçaient à une certaine distance du centre, parce que les différents rayons, en se mêlant à peu près dans des proportions égales, ne produisaient plus qu'une lumière blanchâtre.

Diversité des Substances susceptibles d'offrir des Anneaux colorés.

1149. Il n'est pas nécessaire que la lame qui présente les anneaux colorés soit d'une matière fluide. Les lames d'un corps solide ont la même propriété, pourvu qu'elles soient réduites à un certain degré de ténuité. Il est possible, par exemple, d'amincir une lame de mica, au point qu'elle devienne capable de réfléchir une ou plusieurs des couleurs qu'offre la lame d'air, dans la première expérience de Newton. Et, ce qui est remarquable, c'est que les couleurs dont il s'agit ne dépendent point, quant à leur espèce, de la nature du milieu environnant : que l'on mouille la lame de mica, elles deviendront seulement plus faibles que quand cette

d'une couleur quelconque intermédiaire, telle que le verre, étant moindre que r_1 et plus grande que V_1 , sera située entre ces deux lignes, tandis que la plus grande des épaisseurs extrêmes de la dernière nuance de la même couleur étant plus considérable que V_3 , sera située à la droite de cette ligne, d'où l'on conclura que toutes les couleurs doivent se confondre sur l'espace v_23V , et y produire une couleur blanche par leur mélange.

Un raisonnement semblable prouvera que la même chose ne peut avoir lieu dans les autres séries, où il n'y a qu'une partie des couleurs relatives à chacune d'elles qui soient mêlées. Newton a imaginé une construction ingénieuse, qui rend sensible à l'œil la manière dont différentes couleurs homogènes se dégagent les unes des autres à certains endroits de la lame d'air, et s'associent plusieurs ensemble à d'autres endroits, pour produire des couleurs composées. *Optice Lucis*, lib. II, pars 2, *versus initium*.

lame était entourée d'air; mais il n'y aura que leur intensité qui soit changée.

1150. Ceci nous conduit à parler de quelques expériences faites par Mazéas, et dont les résultats ont paru ne pas s'accorder avec l'explication que donne Newton du phénomène des anneaux colorés (1). Dans ces expériences, deux verres superposés ne laissaient pas d'offrir le même phénomène, lorsqu'ils étaient placés sous un récipient purgé d'air, ou lorsqu'on les exposait à une chaleur assez forte pour chasser ce fluide de l'espace intermédiaire. On peut répondre que, dans le premier cas, on n'obtient jamais un vide parfait, et qu'en supposant la chose possible, dans le second cas, l'espace compris entre les deux verres est occupé au moins par le calorique; en général, une matière quelconque, quelque rare qu'elle soit, resserrée entre les deux verres, suffit pour faire naître des anneaux de diverses couleurs, et peut-être même les réflexions ou les réfractions des rayons qui produisent ces anneaux auraient-elles lieu dans le cas où l'espace dont il s'agit serait entièrement vide de toute matière, en sorte qu'elles dépendraient des seules distances entre les points correspondans des deux surfaces par lesquelles les verres se regardent.

1151. Newton appelle *accès* ou *retours de facile réflexion*, les dispositions successives d'un même rayon à être réfléchi par différentes épaisseurs d'une lame d'air ou de toute autre substance, et *accès* ou *retours de facile transmission*, les dispositions de ce rayon à être transmis par les épaisseurs intermédiaires. Ainsi, un rayon est dans un de ses retours de facile réflexion lorsqu'il tombe sur une lame de quelque substance, dont l'épaisseur est un des termes de la série 1, 3, 5, 7, 9, etc., en prenant pour l'unité la plus petite épaisseur qui soit capable de réfléchir ce rayon; et de même il est dans un de ses accès de facile transmission, lorsque l'épaisseur de la lame qui le reçoit est un des termes de la série 2, 4, 6, 8, etc. (2).

(1) Mémoires de l'Académie de Berlin, 1752. Voyez aussi l'Optique de Smith, not. 493 et suiv.

(2) *Optice Lucis*, lib. II, pars 3, propos. 13, *definitio*.

*Application des Résultats précédens aux Couleurs
des Corps opaques.*

1152. Voici maintenant les conséquences que Newton a déduites de toutes ces observations relativement à la coloration des corps. Les particules de ces corps, même de ceux que nous appelons opaques, sont réellement transparentes; c'est ce qu'observent tous les jours ceux qui font usage du microscope. Les bords amincis du caillou le plus opaque paraîtront, même à la vue simple, avoir un certain degré de transparence, si on les place entre la lumière et l'œil; et quant aux substances métalliques blanches, qui sembleraient d'abord devoir être exceptées, Newton observe que l'action d'un acide peut les atténuer au point de rendre leurs particules perméables à la lumière (1).

1153. Dans chaque corps, les particules sont séparées entre elles par de petits interstices qu'on nomme *pores*, et qui renferment différens fluides subtils. Ces particules ayant une épaisseur déterminée, repoussent les rayons qui, en les pénétrant, se trouvent dans un retour de facile réflexion, et le corps prend ainsi la couleur ou simple ou mélangée, analogue à celle des rayons réfléchis, et qui dépend du degré de ténuité des particules.

1154. Effectivement, nous avons vu (1149) que les anneaux colorés naissent aussi bien dans les lames des corps solides que dans celles des liquides ou des fluides; et puisque chaque petit espace compris dans une de ces lames réfléchit ou réfracte la lumière, il en résulte que si l'on divisait cette lame en une multitude de petits fragmens, chacun de ceux-ci produirait encore le même effet que quand il formait continuité avec les autres. Or, les particules d'un corps pouvant être assimilées aux fragmens séparés d'une lame, tout ce que l'on dit de cette lame s'y applique exactement.

(1) *Optice Lucis*, lib. II, propos 2.

1155. En parlant des particules des corps, on ne prétend pas désigner leurs plus petites molécules, ou celles que nous appelons *molécules intégrantes*. Pour concevoir ce qu'on doit entendre par les particules qui réfléchissent la lumière, on peut supposer, avec Newton, que les molécules intégrantes déjà séparées les unes des autres par des pores forment, au moyen de la réunion d'un certain nombre d'entre elles, d'autres molécules du second ordre, séparées par des pores plus étendus; que celles-ci, à leur tour, composent des molécules du troisième ordre, avec des interstices toujours plus considérables, et ainsi de suite (1). Or, les particules qui réfléchissent la lumière dans l'état ordinaire d'un corps ont une certaine épaisseur, d'où résultent entre elles des séparations d'une certaine étendue : ces particules sont censées alors isolées relativement à celles qui les avoisinent. Les milieux qui les interceptent, savoir, les fluides subtils qui occupent leurs pores, et l'air qui environne leur surface extérieure, font l'office des deux verres, entre lesquels est comprise la lame d'air dans l'expérience de Newton; par exemple, dans une lame de mica d'une épaisseur sensible, il y a des particules d'un certain ordre qui ont la propriété de réfléchir les rayons d'un blanc jaunâtre; et ce sont celles qui se trouvent naturellement à des distances respectives suffisantes pour que la lumière agisse sur elles comme si elles étaient seules. Si vous divisez cette lame par feuillets jusqu'à un certain degré de ténuité, vous isolez des particules d'un autre ordre qui réfléchiront d'autres couleurs, ainsi que le confirme l'observation.

1156. Nous avons parlé, à l'article de la divisibilité (27), d'une lame détachée d'un morceau de mica, dont tel était le degré de ténuité, que sa couleur primitive, qui offrait le blanc jaunâtre, avait passé au bleu le plus intense. Nous sommes maintenant en état de concevoir comment les propriétés de la lumière peuvent être employées à saisir ces petites quantités qui échappent à nos moyens mécaniques les plus susceptibles de précision. Suivant

(1) *Optice Lucis*, lib. III, quæst. 31.

Newton, l'épaisseur de la lame d'air, à l'endroit qui réfléchit le bleu pur dans le phénomène des anneaux colorés, est égale à $2,4$ millionièmes de pouce, pris sur le pied anglais. Or, d'après le principe énoncé plus haut (1140), l'épaisseur de la lame de mica dont nous avons parlé devait être à celle de la lame d'air à l'endroit qui offre le bleu pur, comme le sinus d'incidence est à celui de réfraction lorsque la lumière passe du mica dans l'air; mais comme le mica ne se prête point aux expériences qui donneraient immédiatement la loi de sa réfraction, on y a suppléé en profitant de cette autre observation de Newton, que les puissances réfractives des substances sont à très peu près proportionnelles à leurs densités (1066), pourvu que ces substances soient l'une et l'autre inflammables ou non inflammables.

1157. Cela posé, soit cr (*fig. 73*) un rayon de lumière qui rencontre la surface d'un morceau de mica, sous un angle infiniment petit, et soit rg le rayon réfracté, dont on déterminerait la direction, si le mica avait en même temps assez d'épaisseur et de transparence pour que cette détermination fût possible. Soit, dans la même hypothèse, rg' le rayon réfracté relatif à une seconde substance, dont on connaisse la puissance réfractive, et qui servira de terme de comparaison. Nous avons choisi, pour cet effet, le sulfate de chaux, dont telle est, suivant Newton, la puissance réfractive, que si l'on désigne par l'unité la quantité constante m , on aura $(g'n)^2 = 1,123$.

Maintenant la densité du mica, déterminée d'après la pesanteur spécifique, est à celle du sulfate de chaux comme $2,792 : 2,252$. On aura donc $(g'n)^2$ ou $1,213 : (gn)^2 :: 2,252 : 2,792$. Opérant par logarithmes, on trouvera pour celui de gn , $0,0886039$, d'où l'on conclura que l'angle de réfraction rgn est de $39^d. 11'$; et parce que, dans le cas présent, l'angle d'incidence est droit, le rapport entre les sinus, lorsque la lumière passe du mica dans l'air, sera celui du sinus de $39^d. 11'$ au sinus total. Or, ce rapport étant le même que celui qui existe entre l'épaisseur de la lame d'air désignée par $2,4$ millionièmes de pouce, et celle de la lame de mica qui réfléchit le beau bleu, on trouvera pour cette dernière $1,511$ millionièmes de pouce anglais, ou environ $1,6$

millionième de pouce, pris sur le pied français (1), c'est-à-dire, à peu près 43 millionnièmes de millimètre.

1158. La disposition d'un rayon à être réfléchi ou réfracté par telle particule d'un corps, dépend à la fois des deux surfaces de cette particule, puisqu'il ne tient qu'à une distance plus grande ou plus petite entre ces surfaces, que le rayon ne soit réfléchi au lieu d'être réfracté, ou réciproquement. De là vient que si l'on mouille l'une ou l'autre des faces d'une lame très mince de quelque substance, telle que le mica, les couleurs s'affaiblissent à l'instant; d'où il faut conclure que la réflexion ou la réfraction se fait près de la seconde surface; car si elle se faisait auprès de la première, ou avant que le rayon eût pénétré dans la particule, la seconde n'aurait aucune influence sur la réflexion ou la réfraction de ce rayon. De plus, la disposition dont il s'agit se propage et persiste dans le rayon, depuis la première surface jusqu'à la seconde; autrement, lorsque le rayon est parvenu à cette seconde surface, la première n'entrerait plus pour rien dans l'action qui le détermine à être réfléchi ou réfracté (2).

1159. La couleur d'un corps est d'autant plus vive et plus pure, toutes choses égales d'ailleurs de la part des milieux environnans, que les molécules de ce corps sont plus minces; de même que, dans la lame d'air de l'expérience de Newton, les parties les plus déliées ou les plus voisines du centre sont celles où les couleurs se montrent avec le plus de force et d'éclat. De plus, parmi les molécules qui réfléchissent des couleurs d'un seul ordre, celles qui donnent le rouge sont les plus épaisses, et celles qui donnent le violet sont les plus minces.

(1) Selon l'Encyclopédie méthodique, Mathématiques, t. II, seconde partie, p. 580, le pied anglais vaut 11 pouces 4 lignes $\frac{1}{2}$, ou $\frac{273}{10}$ lignes du pied français.

(2) *Optice Lucis*, lib. II, pars 3, propos. 12.

*Cause des Réflets irisés qu'on observe dans
divers Minéraux.*

1160. La nature nous offre dans plusieurs pierres un phénomène analogue à celui des anneaux colorés : de ce nombre est l'agate opaline ou l'opale, qui, dans les reflets qu'elle lance de son intérieur, semble réunir les teintes du rubis, de la topaze, de l'émeraude, du saphir, animées d'une vivacité particulière. Cette pierre ne doit sa beauté qu'à ses imperfections, et à la multitude de fentes et de gerçures qui interrompent la continuité de sa matière propre, et forment des vides occupés par un fluide subtil qui est probablement l'air. Les petites lames de ce fluide sont précisément dans le même cas que la lame d'air renfermée entre les deux objectifs dans l'expérience de Newton : aussi les couleurs de l'opale disparaissent-elles dès qu'on la brise.

Le carbonate de chaux transparent, le sulfate de chaux, le cristal de roche, etc., présentent aussi assez souvent à l'intérieur des reflets diversement colorés, que l'on doit attribuer de même à de légères fissures qui se sont faites naturellement dans la pierre, ou que la percussion y a produites.

*Explication des Couleurs changeantes de
certains Corps.*

1161. La densité des molécules des corps surpasse de beaucoup, en général, celle des milieux qui occupent les interstices entre leurs lames composantes, et de l'air qui environne ces corps. De là vient que les couleurs des mêmes corps, vues sous différens degrés d'obliquité, ne changent pas sensiblement; mais si l'on suppose que les lames n'aient guère plus de densité que les milieux environnans, alors un changement tant soit peu considérable dans leur position, à l'égard de l'œil, fera varier leurs couleurs (1).

(1) *Optice Lucis*, lib. II, pars 3, propos. 6.

Pour saisir la raison de cette différence, supposons que *ablk* (*fig. 74*) représente la coupe d'une lame de quelque substance, dont la densité soit incomparablement plus grande que celle du milieu qui environne cette lame : dans ce cas, un rayon de lumière *rc* qui rencontrera la surface de cette lame sous une obliquité quelconque, se réfractera dans l'intérieur, suivant une direction *ci* qui s'écartera très peu de la perpendiculaire *un* au point d'immersion, à cause de la grande différence entre le sinus d'incidence et celui de réfraction. Qu'un autre rayon incident *rc* rencontre la même surface sous une obliquité sensiblement différente, le rayon réfracté *co* ne s'écartera pas beaucoup plus de la perpendiculaire *un*, et par conséquent les espaces entre *ab* et *kl*, mesurés par les deux rayons réfractés, ne différeront que d'une petite quantité ; d'où il suit que la couleur qui dépend de ces espaces ne subira qu'un léger changement. Supposons au contraire que la densité de la lame *ablk* approche d'être égale à celle du milieu environnant : dans ce cas, les rayons incidens *dg*, *sg* ne subiront qu'une légère inflexion en traversant la lame ; en sorte que les rayons réfractés *gp*, *gm*, étant presque sur la direction des rayons incidens, il en résultera une grande différence entre les espaces mesurés par ces rayons, et en même temps entre les couleurs relatives à ces espaces.

1162. Ceci peut servir à faire concevoir les changemens que subissent les couleurs de certains corps, sous différentes positions de l'œil : telles sont celles qui embellissent le plumage de plusieurs oiseaux, et en particulier celui du paon. Ces couleurs, déjà si riches et si variées sous le même aspect, se diversifient encore en devenant mobiles avec l'oiseau lui-même, dont chaque position produit un jeu de reflets qui disparaissent sous une autre position pour faire place à de nouveaux reflets, et aller eux-mêmes se reproduire ailleurs : toutes ces belles apparences proviennent de ce que les barbes qui s'insèrent latéralement sur les rameaux des plumes de l'oiseau sont d'une ténuité qui avive les couleurs, et en même temps d'une densité qui, n'étant pas beaucoup plus considérable que celle du milieu environnant, fait varier la position des

couleurs à mesure que l'obliquité du rayon visuel varie elle-même (1).

1163. L'effet que nous venons de considérer a lieu aussi dans l'expérience des anneaux colorés (1135), quoiqu'alors la lame d'air interceptée entre les deux verres soit incomparablement moins dense que la matière de ces verres; mais c'est que, dans ce cas, la lumière, en s'écartant considérablement de la perpendiculaire au passage du verre dans la lame d'air, prend des positions dont l'obliquité change très sensiblement, à mesure que la direction du rayon visuel s'incline elle-même plus ou moins, ce qui fait varier à proportion les épaisseurs mesurées par les rayons réfractés. Cet effet est l'opposé de celui que représente la *fig. 74*, où l'on considère *rc*, *r'c* comme les rayons incidens, et *co*, *ci* comme les rayons réfractés. Car il est évident que si, au contraire, ces dernières lignes sont censées être les rayons incidens, une variation un peu sensible dans leurs directions en produira une très grande dans celle des rayons réfractés *cr*, *cr'*.

1164. On explique aisément, d'après les principes que nous avons exposés, les couleurs produites dans certaines liqueurs qui n'en avaient aucune sensible par le mélange d'une de ces liqueurs avec l'autre, ou les changemens de couleur que subit, dans le même cas, une liqueur naturellement colorée. Ainsi, l'acide nitrique, versé dans l'alkohol, où l'on a fait infuser assez légèrement des feuilles de rose pour qu'il n'en prît point la teinte, développe tout à coup une couleur semblable à celle qu'avaient les roses avant l'infusion. Le même acide, mêlé à la teinture du tournesol, change le bleu en un rouge vif. Le sirop de violette devient vert par l'addition d'un alkali. Dans tous ces mélanges, la réunion des molécules des deux liquides forme des molécules mixtes, dont l'épaisseur est différente de celle des molécules composantes, et détermine la réflexion de la couleur analogue à cette épaisseur.

(1) *Optice Lucis*, lib. II, pars 3, propos. 5.

*Application de la même Théorie aux Corps
transparens non colorés.*

1165. Considérons maintenant les accès de facile réflexion et de facile transmission dans les corps transparens, et commençons par ceux qui sont limpides et sans couleur. Les particules de ces corps surpassent en ténuité la plus petite épaisseur qui soit capable de réfléchir la lumière, et en conséquence les rayons qui pénètrent les molécules situées à la surface sont transmis; car les particules dont il s'agit sont dans le même cas que la petite lame d'air située près du contact des deux objectifs dans l'expérience des anneaux colorés, et qui transmettait toutes les couleurs sans en réfléchir aucune. Les rayons qui ont pénétré un milieu limpide continuent donc leur route dans toute l'épaisseur du milieu, sans qu'aucun se réfléchisse près du contact des molécules avec les milieux subtils renfermés dans les pores, comme si ces molécules formaient entre elles une parfaite continuité. Pendant tout ce trajet, les rayons conservent néanmoins leur disposition à être réfléchis ou réfractés, en vertu des accès de facile réflexion ou de facile transmission, de manière que si l'on désigne par e une certaine épaisseur qui aurait déterminé la réflexion de telle espèce de rayon, dans le cas où le milieu n'aurait que cette épaisseur, le même rayon conservera une tendance à être réfléchi à tous les points dont les distances à la première surface sont représentées par $3e$, $5e$, $7e$, $9e$, etc., et il sera disposé à être transmis aux distances $2e$, $4e$, $6e$, $8e$, $10e$, etc. De même si l'on désigne par e' une certaine épaisseur analogue à la réflexion d'une autre espèce de rayons, en supposant que le milieu n'eût que cette épaisseur, le rayon sera disposé à être réfléchi ou transmis à des distances représentées les unes par $3e'$, $5e'$, $7e'$, etc., les autres par $2e'$, $4e'$, $6e'$, $8e'$, etc. Ces distances sont ce que Newton appelle les *intervalles de facile réflexion*, ou de facile transmission (1).

(1) *Optice Lucis*, lib. II, pars 3, proposit. 12.

1166. L'une et l'autre tendance n'ont leur effet que quand la lumière est arrivée à la seconde surface du corps. Là, toute la partie de la lumière qui, à raison de la distance entre les deux surfaces ou de la série d'intervalles, se trouve dans un accès de facile réflexion, est réfléchiée près du contact de la seconde surface avec le milieu adjacent, et la partie qui se trouve dans un accès de facile transmission se réfracte en passant dans le milieu adjacent, de manière que si le milieu avait une épaisseur différente, qui donnât pour chaque accès une unité de plus ou de moins, les rayons changeraient de rôle; ceux qui auraient été dans leur accès de facile réflexion se trouveraient dans leur accès de facile transmission, et réciproquement.

On voit par là pourquoi il y a toujours une partie de la lumière qui se réfléchit au contact de deux milieux de densité différente, en échappant à la réfraction que subit l'autre partie (1045).

1167. Dans tout ce que nous avons dit jusqu'ici des accès, nous n'avons considéré que ce qui se passe dans le trajet des rayons depuis la première surface jusqu'à la seconde; mais la réflexion ramène une partie des rayons de la seconde surface à la première, et il s'agit de savoir quelle sera leur disposition pendant ce retour, et dans quel accès ils se trouveront à cette première surface.

Pour développer ce point de théorie, reprenons les choses dès l'origine, et supposons que ab , cd (fig. 75) soient deux faces exactement parallèles d'un milieu quelconque plus dense que l'air, et environné de ce fluide. Soit gn un faisceau de lumière qui tombe sur la surface ab . Parmi les rayons qui composent ce faisceau, les uns seront dans un accès de facile réflexion, et en conséquence se réfléchiront suivant nx inclinée en sens contraire de la même quantité que gn ; les autres étant dans un accès de facile transmission, se réfracteront suivant no .

L'un et l'autre accès seront déterminés par l'espèce d'intervalles que chaque rayon aura parcourus dans l'air; de manière que si le point radieux est au milieu de ce même fluide, tous les rayons à l'égard desquels le trajet depuis ce point jusqu'au point n sera compris dans la série 1, 3, 5, 7, etc., seront réfléchis, l'unité représentant ici la plus petite épaisseur d'air qui

soit capable de réfléchir chaque rayon, et tous ceux à l'égard desquels le même trajet sera compris dans la série 2, 4, 6, 8, etc., seront transmis suivant no .

Ces derniers rayons se trouvant alors dans un milieu différent, où les intervalles ne sont plus les mêmes, les uns en arrivant au point o seront de nouveau dans un accès de facile réflexion, et seront repoussés suivant or , l'angle roc étant égal à l'angle nod , les autres seront dans un accès de facile transmission, et repasseront dans l'air suivant oz parallèle à gn .

1168. Or, comme nous supposons un parfait parallélisme entre les lignes ab , cd , il en résulte que les rayons réfléchis suivant or , parcourent un espace égal à celui qu'ils avaient parcouru dans la direction no . Maintenant les intervalles de facile réflexion qu'a mesurés le rayon qui parcourait no , ou, ce qui revient au même, les distances auxquelles il s'est trouvé successivement par rapport au point n , à la fin de chaque intervalle, sont compris dans la progression des nombres impairs 1, 3, 5, 7, 9, etc. Or, le rayon conserve, après sa réflexion suivant or , la disposition qu'il aurait suivie en ligne directe, si le milieu eût été prolongé en dessous de cd . Il en résulte que quand il est parvenu, par exemple, en t , sa distance au point n doit être considérée comme étant égale à la somme des lignes on plus ot . Désignons par E l'intervalle ou la distance que mesure on . Les distances suivantes, ou celles qui répondent à la ligne or , seront représentées par $E+2$, $E+4$, $E+6$, etc. Donc la progression 0, 2, 4, 6, etc. qui est censée être une extension de celle qui a donné E , représentera les intervalles de facile réflexion, à partir du point o : d'où il suit que la progression des nombres intermédiaires 1, 3, 5, 7, etc., deviendra celle des accès de facile transmission, en partant du même point, ce qui est l'ordre inverse de celui qui a lieu, par rapport aux accès compris entre les points n et o . Donc, puisque or est égale à no , le rayon arrivé en r se trouvera dans un cas contraire à celui où il était au point o , c'est à-dire qu'il sera transmis par la surface ab .

Si, au lieu de prendre une nouvelle série après la réflexion en r , on considère les deux lignes no , or , comme ne formant qu'une

seule ligne, la quantité $2E$ mesurée par cette ligne étant un nombre pair, les termes de la série unique à laquelle elle appartiendra seront 0, 2, 4, 6, 8, etc., en sorte qu'en envisageant la chose sous ce point de vue, on concevra encore que le rayon doit se réfracter en r .

Concluons de là que les rayons qui se sont réfléchis sur la seconde surface d'un milieu, subissent dans leur retour vers la première surface des effets inverses de ceux qui avaient lieu dans le trajet depuis la première jusqu'à la seconde; en sorte qu'après la réflexion, les accès de facile transmission succèdent à ceux de facile réflexion (1).

Mais si les deux faces entre lesquelles se meut la lumière n'étaient pas exactement parallèles, où si elles avaient des inégalités sensibles, alors, parmi les rayons réfléchis suivant or , ceux qui auraient à parcourir un intervalle plus grand ou plus petit d'une unité pour revenir à la surface ab , seraient réfléchis de nouveau vers cd , tandis que les autres seraient transmis par la surface ab .

1169. Ce que nous venons de dire a fourni au père Boscovich la solution d'une difficulté proposée par lui-même contre l'explication de l'arc-en-ciel extérieur (2). Voici en quoi elle consiste. Soit ng (fig. 76) une des gouttes de pluie qui produisent cet arc, et $shgfna$ la route d'un faisceau de rayons d'une couleur quelconque, pris parmi les rayons efficaces : ce faisceau étant parvenu de h en g , une partie est transmise dans l'air environnant, et l'autre se réfléchit suivant gf . Or, les rayons qui sont entrés par le point h étaient dans un accès de facile transmission, et ceux qui se sont réfléchis en g étaient dans un accès de facile réflexion. Maintenant la corde gf étant égale à la corde hg , mesure la même série d'intervalles; et puisque les rayons qui partent de la réflexion en g pour aller en f subissent des effets inverses de ceux qui ont eu lieu en partant de la réflexion en h ; il s'ensuit qu'ils

(1) *Opusce Lucis*, lib. II, pars 3, propos. 19.

(2) Mémoires des Savans étrangers, t. III.

devraient se trouver en f dans un accès de facile transmission, et par conséquent il n'y aurait aucun de ces rayons qui dût être réfléchi de f en n ; mais ils sortiraient tous par ce point, ce qui rendrait impossible la formation de l'arc extérieur.

Le Père Boscovich répond en observant que la difficulté n'a lieu qu'autant qu'on suppose les gouttes de pluie parfaitement sphériques; et c'est ce qui n'est pas à présumer, d'après cela seul que chaque goutte est un peu comprimée dans sa partie inférieure par la réaction de l'air qu'elle frappe en tombant. Or, la plus légère différence entre les cordes hg , gf suffit pour qu'il y ait une unité de plus ou de moins d'un côté que de l'autre dans les intervalles mesurés par ces cordes; et pour que le rayon arrivé en f se trouve de nouveau dans un accès de facile réflexion, auquel cas il prendra la direction fn , et pourra se trouver en n dans un accès de facile transmission, qui le déterminera à repasser dans l'air suivant la direction na .

1170. La lumière qui traverse un milieu transparent ne parvient pas tout entière à la seconde surface de ce milieu; mais cela provient uniquement de ce qu'il y a toujours des rayons interceptés par le milieu, où ils s'éteignent en se heurtant contre les molécules propres de ce milieu; et le nombre de ces rayons interceptés augmente continuellement pendant tout le trajet du rayon.

Il résulte de là que l'intensité de la lumière sur un espace donné, à mesure qu'elle s'éloigne du point rayonnant, n'est pas exactement en raison inverse du carré de la distance, mais suit une loi qui diffère de celle-ci jusqu'à un certain point.

Bouguer a recherché cette loi, en supposant d'abord que le milieu eût une densité uniforme, et que les rayons fussent parallèles. Dans ce cas, il prouve que l'intensité de la lumière suit une progression géométrique. Il étend ensuite sa théorie aux milieux dont la densité est variable, et à l'hypothèse d'une divergence entre les rayons, et fait plusieurs applications intéressantes de cette théorie à divers phénomènes (1).

(1) Bouguer, Traité d'Optique; Paris, 1760, p. 231 et suiv.

Cause de l'Opacité d'un grand nombre de Corps.

1171. L'opacité des corps qui ont cette qualité provient non-seulement de ce que les molécules de ces corps éteignent et absorbent la lumière, mais plus encore de ce que ces molécules se trouvent séparées par de nombreux interstices remplis de quelque fluide d'une densité très inférieure à la leur; d'où il résulte qu'il y a beaucoup de rayons qui sont repoussés près du contact des surfaces des molécules et du milieu adjacent; et comme ces réflexions se multiplient rapidement, à mesure que les rayons pénètrent le corps, il arrive que bientôt ils échappent à la réfraction qui devrait se propager d'une surface à l'autre pour que le corps fût transparent (1).

1172. Ceci nous conduit à expliquer pourquoi la pierre nommée *hydrophane* acquiert une transparence sensible lorsqu'elle a été plongée dans l'eau, et qu'on la place entre la lumière et l'œil. Nous avons vu (9) que cette pierre est criblée d'une multitude de vacuoles qui, dans l'état naturel de l'hydrophane, sont remplis d'air. Le peu de densité de ce fluide, comparé à la matière propre de la pierre, occasionne la réflexion d'une grande partie des rayons qui la pénètrent, et ne laisse subsister qu'un faible degré de transparence, à l'aide du petit nombre de rayons qui poursuivent leur route jusqu'à la surface tournée du côté de l'œil. Mais si, à la place de l'air, l'eau s'introduit dans l'hydrophane, ce liquide ayant une densité qui se rapproche beaucoup plus de celle de la pierre, il y aura un bien plus grand nombre de rayons qui, au lieu d'être réfléchis au contact des deux milieux qui se succèdent dans l'intervalle entre les deux surfaces, seront réfractés et continueront leur trajet jusqu'à la surface située vers l'œil; ce qui fera croître la transparence dans un très grand rapport. Le papier mouillé ou imbibé d'huile acquiert aussi de la transparence par une cause semblable.

1173. A l'égard des corps qui joignent à la transparence une

(1) *Opticæ Lucis*, lib. II, pars 3, propos. 3.

couleur déterminée, ils paraissent offrir un moyen terme entre les corps limpides et les corps opaques. Leurs molécules réfléchissent des rayons de la couleur sous laquelle ils s'offrent à l'œil, et en même temps ces corps transmettent dans toute leur étendue d'autres rayons qui, pour l'ordinaire, ont la même couleur que les rayons réfléchis. Ainsi les molécules situées à la surface réfléchissent une partie des rayons qui arrivent à cette surface et laissent passer le reste; de nouvelles molécules situées un peu plus bas réfléchissent un certain nombre de rayons parmi ceux qui ont échappé à la première réflexion, puis transmettent les autres, et ainsi de suite jusqu'à la dernière surface, qui réfléchit en partie les rayons qu'elle reçoit, et les transmet en partie dans l'air voisin.

1174. Plus le corps coloré est transparent, plus aussi le nombre de rayons réfléchis dans son intérieur est petit, et plus en même temps la couleur est faible, lorsqu'on se borne à regarder le corps par réflexion. Elle devient au contraire très vive lorsqu'on place le corps entre la lumière et l'œil, parce que le nombre des rayons qui le pénètrent de part en part étant, pour ainsi dire, en raison inverse de celui des rayons repoussés par la réflexion, l'œil reçoit une grande quantité de couleur transmise, qui lui apporte l'impression de la couleur du corps.

A mesure que le principe colorant est plus abondant, la couleur du corps vu par réflexion est plus intense, et en même temps la transparence diminue, en sorte qu'il y a un terme où l'effet principal de la couleur est dû à celle qui est réfléchie près de la surface tournée vers l'œil, et alors le corps placé entre l'organe et la lumière n'a plus qu'un faible degré de transparence.

Divers exemples d'un Phénomène analogue à celui des Anneaux colorés.

1175. Il y a des milieux qui présentent une couleur différente, suivant qu'on les regarde par réflexion ou par réfraction, comme cela a lieu par rapport à chacun des petits espaces pris sur la lame

d'air, dans l'expérience des anneaux colorés : telle est l'infusion de bois néphrétique, qui paraît bleue sous l'aspect ordinaire, et qui devient jaune lorsqu'on place entre l'œil et la lumière le vase qui la contient. Une lame d'or extrêmement mince continue de réfléchir le jaune et paraît verdâtre lorsqu'on la regarde par réflexion. Ces phénomènes, et d'autres semblables, suivant l'expression de Newton, *n'ont plus besoin d'un OEdipe* (1).

1176. On voit combien l'observation des anneaux colorés sert à lier de faits différens dans une même théorie; mais on pourrait désirer que cette théorie remontât encore plus haut, et expliquât, d'après quelque hypothèse, pourquoi certains rayons sont transmis, tandis que d'autres sont réfléchis par une lame d'une épaisseur déterminée. On supposera, si l'on veut, d'après Newton (2), qu'il en est des rayons de la lumière à l'égard des différens corps naturels comme des corps sonores à l'égard de l'air, c'est-à-dire, que les rayons excitent dans les molécules des corps qui les réfractent ou les réfléchissent certaines vibrations qui se propagent d'une surface à l'autre, mais de manière que leur vitesse est plus grande que celle des rayons eux-mêmes, en sorte qu'elles prennent, pour ainsi dire, les devans. Or, comme ces vibrations consistent dans de petits mouvemens qui ont lieu alternativement en sens contraire, si au moment où le rayon arrive près du contact de la surface réfléchissante ou réfringente, le mouvement de vibration dans lequel il se trouve conspire avec celui du corps, le rayon sera transmis; et si ce mouvement est opposé à celui du corps, le rayon sera repoussé et réfléchi (3). Or,

(1) *Newtonis Opusc.*, t. II, p. 290.

(2) *Optice Lucis*, lib. II, pars 3, propos. 12. *Ibid.*, lib. III, quæst. 17.

(3) Cette hypothèse est très différente de celle des physiciens qui faisoient consister la diversité des couleurs dans celle des vibrations imprimées à la lumière par les surfaces réfléchissantes. A l'aide de celle-ci, on cherchoit à expliquer comment les rayons de la lumière, que l'on supposoit homogènes, étoient réfléchis de manière à produire plutôt telle sensation de couleur que telle autre. Mais l'hypothèse de Newton consiste à faire voir comment, parmi les rayons hétérogènes de la lumière, telle espèce est transmise, tandis que telle autre est réfléchie.

telle est la manière dont les mouvemens se combinent, que le rayon est tour à tour dans la circonstance qui détermine la réflexion et dans celle d'où naît la réfraction. Au reste, Newton ne propose cette idée qu'en faveur de ceux qui cherchent à se satisfaire, en imaginant une cause physique aux faits d'où part la théorie. Quant à lui, il lui suffit d'en avoir établi l'existence et la filiation. Les physiciens qui s'arrêtent sagement sur la limite tracée par l'observation, trouveront assez de quoi se satisfaire dans une théorie qui ramène les phénomènes infiniment variés de la coloration des corps à de simples distances entre les facettes des molécules, et qui leur offre cette admirable diversité de teintes et de nuances dont s'embellissent les productions de la nature et de l'art, sous l'aspect d'un tableau dont il suffit que la toile passe à un nouveau degré de ténuité pour faire naître à l'instant un nouveau coloris.

Difficultés que l'on peut opposer à la Théorie précédente.

On vient de voir que la cause à laquelle Newton attribue la coloration des différens corps n'a aucune relation directe avec leur nature chimique, et dépend principalement de la dimension en épaisseur de leurs molécules, jointe à la densité de celles-ci, qui est une propriété physique. Les principes constituans n'ont ici qu'une influence éloignée, en tant que la densité et la figure des molécules dépendent des qualités de ces principes, de leurs quantités relatives, et de la manière dont ils sont combinés entre eux. Mais depuis que la Chimie a fait des progrès rapides, qui ont eu une influence heureuse par rapport à la Physique elle-même, plusieurs des savans qui ont le plus contribué à la perfectionner, ont pensé que les couleurs des corps naturels étaient dues immédiatement à l'affinité que leurs molécules exerçaient de préférence sur certaines espèces de rayons, et personne n'a développé cette opinion avec plus de sagacité et de profondeur que le célèbre Bertholet (1).

(1) Traité sur la Teinture, t. I, p. 31 et suiv.

1177. Avant de faire connaître les motifs de cette même opinion, nous observerons que Newton lui-même avait déjà donné entrée à la Chimie dans la Physique de la lumière, en ramenant plusieurs des phénomènes produits par ce fluide à des actions dans les petites distances. Ainsi la réfraction et la réflexion étaient produites par des actions de ce genre, que les corps exerçaient sur la lumière (1062), avec cette différence que l'action était attractive dans un cas et répulsive dans l'autre. Il avait même trouvé que la nature des corps influait sur l'énergie de la force réfractive, qui était plus considérable, toutes choses égales d'ailleurs, dans les corps inflammables que dans les autres. On a découvert depuis que la quantité de l'écartement que subissent les rayons qui traversent un prisme varie avec la nature des substances, ainsi que nous le ferons voir dans la suite avec plus de détail. Il paraît aussi que la propriété qu'ont certains corps de faire subir deux réfractions à la lumière (1028) a une relation avec la nature de ces corps.

1178. Mais, dans tous ces phénomènes, l'influence directe des qualités physiques se manifeste d'une manière très sensible. La réfraction, par exemple, suit en général le rapport des densités (1066). La figure des molécules entre comme élément dans la double réfraction, puisque celle-ci n'a pas lieu relativement aux corps dans lesquels cette figure a un caractère particulier de symétrie et de régularité. La réflexion elle-même subit des variations qui évidemment sont indépendantes de la nature des corps; de ce nombre est la différence que le poli et l'éclat de la surface apportent dans la quantité de lumière réfléchie.

Notre savant chimiste ne nie pas lui-même que la réflexion produite par des lames très minces et transparentes, détachées d'un corps, ne dépende de la ténuité de ces lames; il adopte, dans leur totalité, les observations de Newton sur les anneaux colorés: il ne combat que les conséquences déduites de ce phénomène pour expliquer la coloration des corps opaques.

1179. Une des objections les plus fortes, parmi celles qu'il oppose à ces conséquences, se tire de ce que certaines substances, telles que le carmin et l'indigo, ne changent pas de couleur,

comme cela devrait avoir lieu, lorsqu'en les triturant, on atténue de plus en plus leurs particules. D'une autre part, lorsqu'on a dissous une certaine quantité d'indigo dans l'acide sulfurique, auquel cas il conserve sa couleur bleue, et qu'ensuite on étend la dissolution dans l'eau, les molécules qui passent par une multitude de dimensions toujours plus petites ne devraient pas continuer de réfléchir constamment des rayons bleus.

1180. On pourrait répondre que les particules d'indigo ou de carmin qui réfléchissent les couleurs ordinaires à ces substances sont d'une si grande ténuité, que la division opérée par les moyens dont nous venons de parler n'atteint pas jusqu'à la limite nécessaire pour isoler des particules propres à la réflexion d'une couleur différente (1). S'il est vrai, comme tout nous porte à le croire, que les corps soient composés de molécules réellement transparentes, on sera moins surpris de voir la couleur ordinaire du carmin ou celle de l'indigo se soutenir dans des opérations où les particules de ces substances ont encore de l'opacité. Le mica, dont les morceaux tendent ordinairement vers la transparence, à moins qu'ils ne soient d'une certaine épaisseur, doit conduire bien plus tôt à la limite qui détermine une couleur particulière (1156).

1181. Il n'est cependant pas tout-à-fait exact de dire que les moyens mécaniques n'altèrent jamais la couleur d'une substance opaque. Newton a observé que quelques-unes des poussières colorées dont se servent les peintres subissent un petit changement de couleur, à l'aide d'une longue et forte trituration, qui fait varier un peu l'épaisseur des particules réfléchissantes (2). Il arrive ordinairement, dans ce cas, que la couleur primitive passe à une nuance qui la rapproche d'une couleur voisine, dans l'ordre successif que présente le phénomène des anneaux colorés.

(1) L'indigo, qui est celle des deux substances dont la division est poussée le plus loin, dans les opérations citées, a une densité considérable. Or, suivant la règle établie par Newton (1140), le degré de ténuité qui répond à la réflexion de telle couleur augmente à mesure que la densité elle-même va en croissant.

(2) *Optice Lucis*, lib. II, pars 3, prop. 5.

1182. On objecte encore que tous les acides changent en rouge les couleurs bleues végétales, et que les alkalis les changent en vert. Or, comment imaginer que les substances de chacune de ces deux classes, même celles qui diffèrent le plus par leur pesanteur spécifique et par leur fixité, agissent toutes de manière à déterminer le degré de ténuité qui convient à la réflexion d'une même couleur?

Nous demanderons d'abord si l'on n'a pas non plus quelque peine à concevoir, dans l'hypothèse où le changement de couleur serait dû à l'action chimique de l'acide ou de l'alkali, comment des principes très différens par leurs qualités, s'accordent pour exercer le degré d'affinité qui produit constamment la réflexion de telle couleur rouge ou verte?

1183. Mais il nous semble que l'on peut affaiblir de beaucoup la difficulté par une réponse directe. Les expériences de Newton font voir que la propriété de réfléchir telle couleur dépend à la fois de la densité et de l'épaisseur des lames que pénètre la lumière; d'où il suit que la couleur verte, par exemple, peut être commune à des lames dont les densités diffèrent entre elles, pourvu que les épaisseurs varient dans le rapport qu'exige la réflexion de cette couleur. Mais il y a mieux, et l'on sait que la densité étant constante, une même couleur peut être réfléchie par diverses épaisseurs qui sont entre elles comme les nombres impairs, 1, 3, 5, 7, etc. Enfin, dans le phénomène des anneaux colorés, chaque anneau d'une couleur déterminée ayant une certaine largeur, les points de cette couleur répondent successivement à des épaisseurs qui vont en croissant à mesure qu'elles s'éloignent du centre. On voit par là que le phénomène dont il s'agit peut s'appliquer à la coloration des corps, de manière à donner une grande latitude soit aux acides, soit aux alkalis, pour agir diversement, en laissant subsister pour l'œil la même apparence, relativement à l'espèce de couleur dont ils déterminent la réflexion. Avec l'affinité, au contraire, la diversité des agens semble devoir en entraîner une dans les effets eux-mêmes.

1184. Suivant l'opinion de notre savant chimiste, une couleur est composée de différentes espèces de rayons lorsqu'elle dépend

de la combinaison de plusieurs principes, dont chacun a déterminé la réflexion d'une des couleurs du mélange; et elle sera simple, si elle provient de l'union d'un seul principe avec la substance colorée. « Ainsi, dit-il, l'oxide vert de cuivre nè peut être dû à » des molécules différentes, et le vert des plantes est sans doute » produit par une substance homogène (1). » Cependant, si l'on place sur un papier jaune une bande étroite de quelque substance colorée avec l'oxide de cuivre, et que l'on tienne ce papier entre la lumière et l'œil, en agitant un peu la bande verte pour aider la sensation, cette bande paraîtra bleue, ce qui prouve, ainsi que nous le dirons bientôt (2), que la couleur verte de l'oxide de cuivre est un mélange de jaune et de bleu; et non pas une couleur simple. Nous avons soumis à la même expérience les feuilles de plusieurs graminées et d'une multitude d'autres plantes, et toutes ont paru d'un bleu plus ou moins foncé. L'émeraude, qui est colorée par l'oxide de chrome, a offert un effet semblable. Or, cette observation, qui n'est pas favorable à l'action de l'affinité, s'accorde au contraire parfaitement avec ce qui se passe dans le phénomène des anneaux colorés, où les différentes espèces de rayons, en se mêlant à tous les endroits de la lame d'air interceptée entre les deux verres, donnent naissance à des couleurs plus ou moins composées.

1185. Nous voyons ce phénomène se reproduire dans plusieurs corps naturels, tels que le plumage de certains oiseaux, les métaux qui prennent un aspect irisé à la surface, les infusions de plusieurs bois, l'or réduit en lames minces, etc. Newton, qui connaissait si bien la force de l'analogie, en a conclu que le même effet avait lieu, en général, par rapport aux molécules de tous les corps, et que la nature se décelait encore ici elle-même, en offrant à nos observations un phénomène dans lequel on lisait, pour ainsi dire, les règles simples et précises qu'elle suivait dans sa manière ordinaire de peindre. En adoptant l'opinion contraire, non-seu-

(1) *Traité de la Teinture*, t. I, p. 57.

(2) Voyez ci-après l'article relatif aux couleurs accidentelles.

lement on se trouve forcé de donner deux échelles à l'action colorante, mais on est réduit à indiquer d'une manière vague l'affinité comme étant la cause de la coloration des corps opaques, sans pouvoir assigner aucune loi à son action, ni établir la liaison et la dépendance mutuelle des effets qu'on lui attribue. On doit être même embarrassé de concilier ici la force répulsive qui paraît produire la réflexion avec l'affinité, qui est une force attractive. Au reste, nous ne regardons pas la question comme décidée sans retour. Mais les réflexions que nous venons de hasarder n'auront pas été inutiles, si elles fournissent à d'autres l'occasion de soumettre à un examen plus approfondi la matière d'une discussion où Newton est attaqué, et ne pouvait l'être par un adversaire plus digne de lui (1).

Des Couleurs accidentelles.

1186. La plupart des couleurs que la lumière fait naître en se réfléchissant à la surface des corps opaques, ou en pénétrant les corps diaphanes, proviennent de la réunion de plusieurs couleurs simples et homogènes dont les actions se combinent de manière à produire sur l'organe une impression unique, déterminée par le nombre et les différentes espèces de rayons réfléchis ou transmis. Mais il y a des circonstances où les rayons qui colorent la

(1) Les bornes que nous sommes obligés de nous prescrire ne nous permettent pas de passer en revue d'autres objections de l'auteur, dont aucune ne nous paraît concluante. Il pense, par exemple, que l'encre étant le résultat d'une combinaison métallique placée dans des circonstances qui annoncent la plus grande compacité, ne devrait pas être noire, puis qu'une substance ne devient noire que quand ses corpuscules sont réduits au plus grand degré possible de ténuité. La réponse est que la densité ou la compacité d'un corpuscule et sa dimension en épaisseur sont deux choses distinctes. Ainsi, on parvient à réduire l'or, qui a beaucoup de densité, en lames assez minces pour avoir de la transparence, et nos moyens artificiels ne donnent pas, à beaucoup près, la limite de la division dont ce métal est susceptible. Rien n'empêche donc que les molécules de l'encre ne soient en même temps très denses et assez atténuées pour paraître noires.

surface d'un corps, en restant les mêmes, excitent en nous la sensation d'une couleur différente de celle que tend à produire leur ensemble, en sorte, par exemple, qu'une surface naturellement blanche nous paraît verdâtre, qu'une autre qui est disposée pour réfléchir la couleur verte agit sur l'œil comme une surface bleue, etc.; on a donné à ces couleurs, qui n'ont lieu qu'en vertu de certaines conditions particulières, le nom de *couleurs accidentelles*, pour les distinguer des couleurs naturelles sous lesquelles les corps s'offrent à nous dans les cas ordinaires.

1187. Le célèbre Buffon est un de ceux qui aient fait le plus de recherches sur les couleurs accidentelles (1). Un exemple suffira pour donner une idée de la manière dont il les faisait paraître. Lorsqu'on regarde fixement et long-temps un petit carré de papier rouge, placé sur un papier blanc, on voit naître autour du petit carré rouge une espèce de bordure d'un vert bleuâtre faible; en cessant de regarder le carré rouge, si l'on porte subitement l'œil sur quelque partie du papier blanc, on y aperçoit un carré teint du même vert-bleuâtre, et cette apparence est plus ou moins durable, suivant que l'impression de la couleur rouge a été plus ou moins forte.

1188. D'autres physiciens, et en particulier M. le comte de Rumford et M. Prieur de la Côte-d'Or, qui se sont occupés depuis du même objet, ont employé une manière de faire les expériences, qui en rend les effets beaucoup plus prompts et plus sensibles. Voici en quoi elle consiste. On place entre la lumière et l'œil un morceau de papier, d'étoffe ou de verre qui soit, par exemple, d'une couleur rouge, et on présente une petite bande de carton blanc parallèlement à la surface antérieure de la substance colorée; et très près de cette même surface. Le carton paraît alors d'un vert céladon ou d'un vert bleuâtre; et si on le fait aller et revenir avec vitesse, en le tenant toujours à une petite distance de la substance colorée, ou même en contact avec elle, sa couleur devient plus intense. On réussira même à voir, dès le

(1) Histoire naturelle, édit. in-12 ; 1774, Supplément, t. II, p. 309 et suiv.

premier instant, cette couleur dans toute sa vivacité, en donnant à la substance colorée une certaine position, comme lorsqu'on la tient élevée au-dessus du niveau de l'œil, et un peu inclinée en avant (1).

1189. La couleur accidentelle de la petite bande blanche varie suivant la couleur naturelle de la substance qui lui sert comme de fond. Ainsi la petite bande placée sur un papier bleu donne l'orangé rougeâtre, sur un papier violet le blanc verdâtre, sur un papier vert le violet rougeâtre, sur un papier jaune le violet bleuâtre, sur un papier orangé le bleuâtre. La plupart de ces diverses teintes sont peu intenses, quoique distinctes, surtout lorsqu'on emploie le mouvement pour les aviver (2).

Les expériences dont il s'agit s'étendent aux cas où la petite bande de carton a elle-même une couleur déterminée, mais différente de celle du fond. Par exemple, une bande d'une couleur verte devient bleue sur un fond jaune; et si elle est d'une couleur orangée, elle deviendra rouge sur le même fond.

1190. Le père Scherffer, savant jésuite, paraît être le premier qui ait entrepris de donner la théorie de ces apparences singulières (3). Le premier pas à faire, pour y parvenir, était de ramener les phénomènes à une règle fondée sur la composition de la lumière, et sur une certaine relation entre les couleurs des deux surfaces, dont l'une sert comme de fond à l'autre. Dans cette vue, le père Scherffer a recours à une construction très ingénieuse, imaginée par Newton, pour déterminer l'espèce de couleur composée qui doit résulter d'un mélange de couleurs primitives dont les qualités et les quantités relatives sont données (4).

(1) On peut rendre cette expérience plus piquante, en découpant une carte blanche sous la forme d'un petit arbrisseau, que l'on colle ensuite sur un papier rouge. Si l'on donne à ce papier la position convenable, on verra le petit arbrisseau verdir à l'instant.

(2) On conçoit que la nuance de la couleur accidentelle doit varier, suivant que la couleur du fond est plus ou moins pure, plus ou moins intense, etc.

(3) Dissertation sur les couleurs accidentelles; Journal de Physique, mars 1785, p. 175 et suiv.

(4) *Optice Lucis*, lib. I, pars 2, propos 6, probl. 2.

Cet illustre géomètre compare les actions des couleurs qui forment le mélange à celles que plusieurs poids exercent les uns sur les autres, de manière à produire une action unique, dont la direction passe par le centre commun de gravité de tous ces poids. Pour appliquer cette idée à la solution du problème dont nous venons de parler, Newton divise une circonférence de cercle en sept arcs *ab*, *bd*, *de*, etc. (*fig. 77*) dont les longueurs sont proportionnelles aux espaces qu'occupent sur le spectre solaire les sept couleurs principales qui le composent. Par exemple, *ab* est l'arc qui répond au rouge, *bd* celui qui répond à l'orangé, et ainsi des autres (1).

1191. D'après cela, veut-on savoir quelle est la couleur composée que doit prendre le mélange des sept couleurs en proportion donnée? Ayant cherché les centres de gravité *m*, *n*, *r*, *s*, *t*, *x*, *z*, des sept arcs qui représentent les couleurs du spectre solaire, on tracera autour de ces centres les circonférences d'autant de cercles dont les surfaces soient dans le rapport des quantités de rayons que les différentes couleurs doivent fournir au mélange, et l'on cherchera le centre de gravité commun de tous ces cercles. Soit *y* ce centre de gravité; si du centre *c* de la circonférence *age*,

(1) Les nombres indiqués par Newton comme devant être ceux avec lesquels les différens arcs *ab*, *bd*, *de*, etc., se trouvent en rapport, ne s'accordent pas avec ceux qui lui ont servi à représenter les espaces que les couleurs occupent sur le spectre solaire. Ceux-ci forment la série, 1, $\frac{3}{9}$, $\frac{2}{6}$, $\frac{3}{4}$, $\frac{2}{3}$, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$, dans laquelle 1 est la limite du violet, $\frac{3}{9}$ la limite entre le violet et l'indigo, $\frac{2}{6}$ la limite entre l'indigo et le bleu, etc. Il en résulte que les différences entre deux nombres voisins, prisés dans le même ordre, donnent cette autre série, $\frac{1}{9}$, $\frac{1}{18}$, $\frac{1}{12}$, $\frac{1}{12}$, $\frac{1}{6}$, $\frac{1}{4}$, dont les différens termes sont dans le rapport des espaces qui sur le spectre solaire répondent au violet, à l'indigo, au bleu, au vert, au jaune, à l'orangé, et au rouge. Or la somme des termes de cette seconde série étant égale à $\frac{1}{2}$, si l'on représente la circonférence par l'unité, on aura, en doublant ces mêmes termes, les nombres $\frac{2}{9}$, $\frac{1}{9}$, $\frac{1}{6}$, $\frac{1}{6}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{2}$, qui représentent les parties de la circonférence relatives aux diverses couleurs, ce qui donne 80^d pour le violet, 40^d pour l'indigo, 60^d pour le bleu, 60^d pour le vert, 45^d pour le jaune, 27^d pour l'orangé, et 45^d pour le rouge. Cette sous-division, qui existe dans notre *fig. 42*, est aussi celle que Scherffer a employée.

on mène par le point y un rayon cyp , le point p de la circonférence sur lequel tombera ce rayon indiquera l'espèce de couleur que doit offrir le mélange. Si le point p coupait l'arc bd en deux parties égales, la couleur dont il s'agit serait l'orangé pur; mais comme p , dans le cas présent, se rejette du côté de b , qui est la limite du rouge, la couleur sera l'orangé rougeâtre. D'une autre part, en même temps que la position du point p indique le ton de la couleur, la position du point y en fait connaître l'intensité, qui est d'autant plus forte que ce point se rapproche davantage de la circonférence, et d'autant plus faible qu'il est plus voisin du centre, en sorte que s'il coïncidait avec ce dernier point, la couleur tomberait dans le blanc.

1192. La même méthode sert à trouver la couleur mixte que doit produire la réunion d'un nombre donné de couleurs prises parmi les sept couleurs principales, et dont nous supposons que les quantités relatives soient les mêmes que dans le spectre solaire. Par exemple, si l'on demande quelle est la couleur composée qui doit résulter du mélange des six couleurs suivantes, violet, indigo, bleu, jaune, orangé, rouge, ou de toutes les couleurs moins le vert, la solution du problème se réduit à trouver le centre k de gravité de l'arc fae égal à la somme des six arcs qui représentent les couleurs données, et à faire passer par ce centre le rayon ck . La position du point k indique que la couleur composée que l'on cherche est le violet rougeâtre, et l'on voit que cette couleur doit être faible, à cause de la petite distance entre le point k et le centre c . On conçoit aisément ce qu'il y aurait à faire dans le cas de cinq couleurs composantes, ou d'un plus petit nombre. Dans ces derniers cas, les couleurs supprimées produiraient aussi, par leur réunion, une couleur mixte, qu'il est de même facile de déterminer; d'où l'on voit que l'ensemble des couleurs prismatiques peut être divisé de diverses manières en plusieurs parties susceptibles d'offrir tantôt toutes couleurs mixtes, tantôt des couleurs mixtes avec des couleurs simples. Dans le cas où la division ne se fait qu'en deux parties, chacune des deux couleurs résultantes est dite *complémentaire* de l'autre,

dénomination introduite par Hassenfratz, qui s'est beaucoup occupé d'expériences sur la lumière colorée.

1193. Maintenant, pour être en état de prédire quelle sera la couleur accidentelle que l'œil verra paraître, dans le cas où l'on place une petite bande de papier blanc sur un papier coloré, il suffit de savoir que cette bande présente toujours la couleur complémentaire de celle du fond. Ainsi, lorsqu'elle est sur un papier rouge, ou plutôt d'un rouge violet, on la voit d'un vert bleuâtre; et effectivement cette dernière couleur est celle qui résulte du mélange des couleurs prismatiques, à l'exclusion du rouge et du violet. Par la même raison, la petite bande prend une teinte d'orangé rougeâtre sur un fond bleu, une teinte de violet rougeâtre sur un fond vert, etc. On peut, au seul aspect de la figure, juger à peu près de la couleur accidentelle que doit faire naître sur la petite bande la présence de la couleur environnante, en portant l'œil d'abord sur le milieu de l'arc qui appartient à cette couleur, et ensuite sur le point opposé de la circonférence. Ce point indiquera, sinon la nuance, au moins l'espèce de la couleur accidentelle.

1194. Lorsque la petite bande est elle-même colorée, son passage à une couleur différente dépend de ce que celle qui lui est naturelle résulte d'un mélange de plusieurs couleurs, dont l'une est en même temps celle du fond. Ainsi, l'on sait que le vert, tel que l'emploient les arts, se forme de la réunion du jaune et du bleu. Donc si l'on place une petite bande verte sur un fond jaune, elle doit paraître bleue, parce que le bleu n'est autre chose que le vert dont on a soustrait le jaune. Par une raison semblable, une bande orangée doit paraître rouge sur un papier jaune, puisque l'orangé est un composé de rouge et de jaune.

1195. Nous venons de donner la règle à laquelle obéit la sensation que produit le phénomène sur l'organe de la vue. Mais quelle est la cause qui détermine dans l'organe lui-même une disposition conforme à cette règle, et comment une petite bande blanche, placée, par exemple, sur un fond rouge, quoiqu'elle envoie à l'œil tous les rayons qui composent la blancheur, excite-t-elle en lui l'impression du bleu verdâtre, c'est-à-dire de la cou-

leur qu'offrirait réellement la petite bande, si on avait soustrait de la blancheur la partie qui lui est commune avec la couleur du fond ?

Scherffer a essayé d'expliquer cette illusion, d'après le principe que, si un sens reçoit à la fois deux impressions du même genre, l'une forte et vive, l'autre beaucoup plus faible, celle-ci est comme absorbée par la première, en sorte qu'elle devient imperceptible pour nous. Reprenons l'exemple d'une petite bande blanche placée sur un papier rouge. Nous pouvons considérer la blancheur de cette bande comme étant composée de vert bleuâtre et de rouge. Mais la sensation de la couleur rouge agissant avec beaucoup moins de force que celle de la couleur environnante du même genre, se trouve éclip­sée par cette dernière, en sorte que l'œil n'est sensible qu'à l'impression de la couleur verte, qui étant comme étrangère à la couleur du fond, agit sur l'organe avec toute son énergie. Le principe s'applique, comme de lui-même, à tous les autres cas que nous avons cités.

1196. Cette explication, quoique ingénieuse, n'est pas exempte de difficultés. Le célèbre Laplace en a proposé une qui est plus satisfaisante. Elle consiste à supposer qu'il existe dans l'œil une certaine disposition, en vertu de laquelle les rayons rouges compris dans la blancheur de la petite bande, au moment où ils arrivent à cet organe, sont comme attirés par ceux qui forment la couleur rouge prédominante du fond, en sorte que les deux impressions n'en font plus qu'une, et que celle de la couleur verte se trouve en liberté d'agir comme si elle était seule. Suivant cette manière de concevoir les choses, la sensation du rouge décompose celle de la blancheur, et tandis que les actions homogènes s'unissent ensemble, l'action des rayons hétérogènes, qui se trouve dégagée de la combinaison, produit son effet séparément.

1197. Plusieurs substances minérales jouissent d'une propriété qui se rattache aux phénomènes qui viennent d'être exposés. Elle consiste en ce qu'étant regardées successivement par réflexion et par réfraction, elles offrent deux couleurs différentes dont chacune est la complémentaire de l'autre. Un des plus remarquables est la chaux fluatée nommée vulgairement *spath fluor*. On trouve

en Angleterre des cristaux cubiques de ce minéral, dans lesquels la couleur réfléchiée est le violet rougeâtre et la couleur réfractée est le vert, deux teintes qui ont entre elles la relation dont nous venons de parler. Ordinairement la première est le violet foncé; et la seconde, le vert clair. C'est une suite de ce que l'arc auquel répond le violet, étant plus petit que celui auquel répond le vert, son centre de gravité se rapproche davantage de la circonférence, tandis que le centre de gravité relatif au vert s'en écarte à proportion; ce qui tend d'une part à renforcer le ton de la couleur, et de l'autre à l'affaiblir.

Des Rapports entre la Lumière et la Chaleur.

Dans l'exposé que nous allons faire des rapports qui existent, à plusieurs égards, entre la lumière et la chaleur, nous nous bornerons à la considération des faits, sans prétendre en tirer aucune induction sur l'identité des causes. Nous avons cru que cet exposé trouverait ici d'autant plus naturellement sa place que, dans des expériences récentes, on a essayé d'ajouter à nos connaissances, sur les rapports dont il s'agit, en employant la lumière colorée comme terme de comparaison.

1198. On sait que les rayons solaires échauffent, en général, les corps exposés à leur action; mais ils ne les échauffent pas tous au même degré, et Schéele avait saisi, avec la sagacité qui lui était ordinaire, les circonstances qui font varier l'intensité de leur action, et le principe qui sert à expliquer cette diversité. Ce célèbre chimiste, ayant exposé à cette même action deux thermomètres égaux, dont l'un était rempli d'alkohol coloré d'un rouge foncé, et l'autre d'alkohol non coloré, observa que la liqueur rouge montait plus rapidement que celle qui était sans couleur; mais si l'on plongeait les deux thermomètres dans l'eau chaude, les mouvemens de la liqueur étaient les mêmes de part et d'autre. Schéele avait encore remarqué que plus la couleur d'un corps approche du noir, plus aussi ce corps est échauffé promptement par les rayons du soleil; tandis qu'au contraire

les corps les plus blancs sont ceux qui s'échauffent le plus lentement.

1199. On voit ici une analogie marquée entre la lumière et le calorique rayonnant, qui ne devient susceptible d'échauffer un corps qu'en perdant sa propriété rayonnante, pour prendre, par son union avec ce corps, le caractère de calorique combiné; et c'est alors seulement qu'il devient sensible au thermomètre (147 et suiv.) De même, tant que le mouvement de la lumière n'est point interrompu, il n'en résulte aucune chaleur proprement dite (1); et si ce mouvement ne fait que changer de direction, par l'effet de la réflexion, les rayons qui subissent cet effet ne contribuent point à la production de la chaleur qui ne dépend que des rayons absorbés. De là vient que les corps qui absorbent en plus grande abondance la lumière, comme les noirs, sont ceux qu'elle échauffe le plus; elle agit beaucoup plus faiblement pour échauffer les corps blancs, parce qu'ils la réfléchissent.

Il y a cependant cette différence entre la lumière et le calorique, que les rayons de la première traversent librement le verre et les liqueurs limpides, tandis que les rayons du calorique restent engagés dans ces mêmes corps auxquels ils communiquent de la chaleur (2).

1200. Le savant physicien Rochon se proposa, en 1775, de rechercher, par l'expérience, si les rayons qui diffèrent en réfrangibilité, produisaient sur le thermomètre des degrés de chaleur sensiblement différens (3). Il se servit d'un prisme de flint-glass, pour séparer les rayons diversement colorés, qu'il faisait passer ensuite tour à tour à travers une lentille. Il observa qu'un thermomètre d'air, exposé à l'action des mêmes rayons, montait à mesure que ceux-ci se succédaient, depuis le violet jusqu'au rouge; et le rapport de chaleur entre le rouge clair et le violet le

(1) Schéele, *Traité chimique de l'Air et du Feu*, traduit par le baron de Dietrich. Paris, 1781, p. 146.

(2) Berthollet, *Statique chimique*, t. I, p. 192.

(3) *Essai sur les Degrés de Chaleur des Rayons colorés*; *Recueil de Mém. sur la Mécanique et la Physique*, p. 348 et suiv.

plus intense lui parut être à peu près celui de 8 à 1. Mais il avouait modestement que, malgré toutes les précautions qu'il avait prises pour mettre de la précision dans ses résultats, il n'était pas encore satisfait de son travail (1).

1201. Le célèbre astronome Herschell, dont le nom rappelle des découvertes si importantes, a entrepris depuis une belle suite d'expériences dirigées vers le même but, et a étendu ses recherches à tout ce qui pouvait être l'objet d'un rapprochement entre les propriétés physiques de la lumière et celles du calorique. Dans les expériences relatives à la chaleur produite par les rayons diversement colorés du spectre solaire, il faisait passer successivement ces rayons par une ouverture pratiquée à un écran, et les recevait sur la boule d'un thermomètre placé derrière cette ouverture. Il conclut de ses observations, que la faculté calorifique des rayons rouges était à celle des rayons violets, à peu près dans le rapport de 7 à 2, beaucoup plus petit que celui auquel était parvenu le physicien français (2).

1202. M. Leslie a repris depuis les mêmes expériences, en se servant d'un instrument très sensible, qu'il nomme *photomètre* (mesure de la lumière), et dont la construction se rapproche de celle du thermomètre différentiel (164), déjà employé si avantageusement par le même physicien pour observer les effets du calorique rayonnant. La pièce essentielle du photomètre consiste de même dans un tube de verre qui imite un siphon renversé ; dont les deux branches seraient égales en hauteur et terminées par des boules d'un égal diamètre. Mais ici l'une des boules est d'émail noir, tandis que l'autre est de verre ordinaire. Les mouvements de la liqueur, qui est aussi l'acide sulfurique teint en rouge avec du carmin, se mesurent à l'aide d'une graduation dont le zéro est situé vers le haut de la branche terminée par la boule d'émail.

(1) Essai sur les Degrés de Chaleur des Rayons colorés ; Recueil de Mém. sur la Mécanique et la Physique, p. 355.

(2) Bibliothèque Britannique, t. XV, p. 196 et suiv.

1203. L'usage de cet instrument est fondé sur le principe que quand la lumière est absorbée par un corps, elle produit une chaleur proportionnelle à la quantité de l'absorption. Lorsqu'on expose l'instrument aux rayons du soleil, ceux de ces mêmes rayons qu'absorbe la boule de couleur noire échauffent l'air intérieur; ce qui détermine la liqueur à descendre d'abord avec rapidité dans la branche correspondante. Mais comme une partie de la chaleur qui s'introduit à la faveur de l'absorption se dissipe par le rayonnement, et que la différence entre la quantité de chaleur perdue et celle de chaleur acquise va toujours en diminuant, il arrive un terme où ces deux quantités étant devenues égales, l'instrument est stationnaire, et l'on juge alors de l'intensité de la lumière incidente par le nombre de degrés que la liqueur a parcourus.

1204. L'auteur de cet ingénieux instrument en indique les avantages, pour déterminer l'accroissement progressif que subit l'intensité de la lumière, et la gradation en sens contraire qui succède à ce progrès, soit depuis la naissance du jour jusqu'au terme de son déclin, soit depuis le solstice d'hiver jusqu'à la fin de l'automne suivant. On pourrait encore comparer, à l'aide du même instrument, l'action de la lumière dans les différentes contrées, dont les unes jouissent assez constamment d'un ciel pur et serein, tandis que, pour d'autres, il semble être couvert d'un voile qui en offusque l'éclat.

1205. M. Leslie s'étant proposé, comme nous l'avons dit, de mesurer l'énergie des rayons diversement colorés qui composent le spectre solaire, a fait passer un jet de lumière à travers un prisme de flint-glass, et les indications du photomètre présenté successivement aux différentes parties du spectre, ont donné à peu près, pour le rapport entre les degrés de force des rayons bleus, verts, jaunes et rouges, celui des nombres 1, 4, 9, 16; rapport qui, considéré dans les deux termes extrêmes, est double de celui que M. Rochon avait déduit de ses expériences, et plus que quadruple de celui que M. Herschell avait substitué au précédent.

1206. Le célèbre astronome anglais conçut aussi l'idée de com-

parer les rayons du spectre relativement à leur force éclairante, et il jugea que le rouge, qui terminait d'un côté le prisme, était surpassé par le jaune, dans lequel résidait le *maximum* de clarté; que le vert éclairait à peu près aussi bien, et qu'ensuite il y avait une dégradation sensible jusqu'au violet, qui donnait le *minimum* de clarté (1). Ces résultats diffèrent peu de ceux que Newton avait annoncés long-temps auparavant (2).

1207. Le même astronome essaya de vérifier une conjecture qui s'était offerte à lui dans le cours de ses recherches précédentes; savoir, qu'il existait, hors des limites du spectre solaire, des rayons soumis aussi à la loi de la réfrangibilité, mais non lumineux et simplement calorifiques. La conclusion qu'il tira de ses expériences fut que la faculté d'échauffer avait les mêmes limites que le spectre du côté du violet; qu'elle augmentait progressivement depuis le violet jusqu'au rouge, et ensuite au-delà du rouge, où elle résidait dans des rayons insensibles à l'œil et moins réfrangibles que tous ceux qui étaient lumineux, en sorte que son *maximum* répondait environ à un demi-pouce en dehors des rayons rouges.

1208. Ces expériences étaient assez intéressantes pour mériter d'être soigneusement vérifiées, et assez délicates pour en avoir besoin. M. Leslie, appelé en quelque sorte à faire cette vérification, y ayant apporté toutes les attentions les plus propres à la rendre décisive, n'a pu apercevoir aucun indice de chaleur au-delà des limites du spectre solaire, et il y a tout lieu de présumer que l'effet annoncé par M. Herschell était dû à l'influence étrangère de quelque cause accidentelle.

1209. Les résultats obtenus par divers physiciens ont offert le même défaut d'accord que les précédens. Mais celui d'une expérience qui paraît avoir été faite avec beaucoup de soin, par M. Bernard, a été en faveur de M. Leslie. Ce physicien ayant plongé la boule d'un thermomètre très sensible dans la lumière rouge du

(1) Bibliothèque Britannique, t. XV, p. 200 et suiv.

(2) *Optice Lucis*, lib. I, pars 1, propos. 7, exper. 16.

spectre, de manière qu'elle en était entièrement couverte, a noté le degré de température que marquait la liqueur de l'instrument. Il a ensuite transporté peu à peu son thermomètre hors du spectre, et il a vu la liqueur descendre à mesure que la boule se dégageait des rayons rouges, en sorte que quand elle s'est trouvée tout-à-fait à découvert, l'excès de la température de la liqueur sur celle de l'air environnant se réduisait à $\frac{1}{5}$ de celui qu'elle indiquait au commencement de l'expérience. M. Berard a conclu de là que le *maximum* de l'action calorifique du spectre résidait dans les rayons extrêmes, et non dans l'espace situé au-delà (1).

1210. Les expériences faites par MM. Wollaston, Ritter et Beckman, sur la partie opposée à celle qui jusqu'alors avait fait seule l'attention des physiciens, ont offert un accord plus satisfaisant que les premières. Le résultat auquel elles ont d'abord conduit les trois physiciens, a été que la faculté calorifique était insensible à la naissance du violet, en sorte que, depuis ce terme, elle s'accroissait graduellement en allant vers le rouge. Mais à ce résultat en a succédé un autre très remarquable, d'où les trois physiciens ont conclu qu'il existe un peu au-delà du rayon violet, des rayons obscurs, susceptibles d'exercer une action chimique analogue à celle qui avait déjà été reconnue dans la lumière directe du soleil dont l'effet est d'altérer les couleurs de toutes les substances végétales, et celles de plusieurs substances minérales. Les trois physiciens ont observé, par exemple, que le rayon violet avait, comme la lumière solaire, la propriété de noircir le chlorure d'argent. M. Berard a retrouvé dans les rayons indigo et bleus des indices de l'action chimique; mais elle décroissait rapidement, et bientôt elle devenait insensible. Cependant l'analogie semble annoncer qu'elle s'étend jusqu'aux rayons rouges, mais par une succession de nuances si légères, que les bornes de nos moyens ne nous permettent pas de la suivre.

1211. Il se présente ici deux hypothèses; selon l'une, les trois

(1) Voyez le rapport sur le Mémoire du même savant relatif aux propriétés physiques et chimiques des rayons qui composent la lumière solaire, par MM. Berthollet, Chaplart et Biot, Annales de Chimie, t. LXXXV, p. 309. et s.

propriétés relatives, l'une à la coloration, l'autre à l'action de la chaleur, et la troisième à l'action chimique, existeraient dans trois espèces distinctes de rayons, en sorte que le spectre pourrait être considéré comme un assemblage de trois spectres superposés, dont chacun emprunterait son caractère distinctif de l'une des propriétés dont il s'agit. Les limites entre lesquelles ils seraient renfermés, ne seraient pas les mêmes, au moins quant aux deux, dont l'un serait lumineux et coloré, et l'autre se manifesterait par son action chimique. Ce dernier dépasserait d'une petite quantité l'espace occupé par les rayons violets.

1212. Dans la seconde hypothèse, les actions chimique et calorifique seraient réunies dans les mêmes rayons à celle qui produit la sensation de la lumière et des couleurs. L'influence de la réfrangibilité qui va en croissant depuis le rouge jusqu'au violet, déterminerait une gradation analogue dans l'action chimique, et une gradation en sens contraire dans l'action calorifique. Les rayons qui existent au-delà du violet, et dans lesquels réside le *maximum* de l'action chimique, seraient réellement colorés comme les autres, mais ils échapperaient à nos organes, par la faiblesse de leur teinte, et l'action calorifique existerait aussi dans les mêmes rayons, où son *minimum* serait une quantité nulle pour nos sens.

Dans la première hypothèse, le calorique et la lumière constitueraient deux fluides différens, au lieu que dans la seconde on devrait les considérer comme les modifications d'un même fluide.

On sait que les physiciens sont partagés depuis long-temps entre ces deux opinions; et ce motif, indépendamment des autres considérations, suffirait seul pour faire balancer sur le choix entre les deux hypothèses auxquelles elles se rapportent. C'est une de ces questions sur lesquelles il convient de s'en tenir aux faits observés jusqu'ici, et d'attendre que l'expérience nous ait suffisamment éclairés sur leur manière d'être.

4. De la Vision naturelle.

1213. Nous avons considéré successivement la lumière comme lancée par les corps dont elle est une émanation, traversant ensuite l'espace avec une rapidité inconcevable et pourtant susceptible d'être mesurée, reçue enfin par les surfaces des corps, dont les unes la réfléchissent, tandis que les autres la transmettent; et l'étude des diverses modifications qu'elle reçoit, suivant les différentes manières dont ces corps agissent sur elle, nous a dévoilé les causes de la transparence, de l'opacité et des couleurs.

Les impressions que les objets excitent à leur tour dans l'organe de la vue, et qui nous en font distinguer les différents états, dépendent d'une action immédiate qu'exerce sur cet organe la lumière qu'ils lui envoient, soit qu'elle vienne immédiatement d'un corps lumineux, soit qu'elle ait été réfléchie par la surface d'un miroir ou d'un corps opaque, soit enfin qu'elle ait passé à travers un corps transparent.

Notre but sera maintenant de considérer en quoi consiste cette action, de tracer la marche que suivent dans l'organe les rayons envoyés par les objets, et d'exposer les résultats des différentes recherches faites par les physiciens sur la manière dont s'opère la vision; et pour commencer par ce qu'il y a de plus simple, nous supposerons d'abord qu'il n'existe entre l'œil et les objets aucun intermédiaire qui modifie l'action de la lumière.

De la Structure de l'Œil.

1214. Les anciens philosophes n'avaient, relativement à la manière dont la vision s'opère, que des idées imparfaites; ils savaient seulement, en général, que les yeux en sont les instrumens; et cependant les traits de sagesse et de prévoyance répandus sur le peu qu'ils en connaissaient ne leur avaient pas échappé (1); ils admiraient la position de l'œil dans le lieu le plus élevé de la tête

(1) Cicero, de Nat. Deor., t. II, n. 141 et seq.

d'où, comme une sentinelle, il embrassait dans un seul regard une multitude d'objets; son extrême mobilité, et cette facilité qu'il a de se diriger en tous sens, et de se multiplier, en quelque sorte, par la variété de ses situations; la souplesse des paupières toujours prêtes à s'abaisser comme un voile pour le défendre, soit de l'impression d'une lumière trop vive, soit du choc d'un corps extérieur, ou pour favoriser la puissance du sommeil sur l'ensemble de tous les organes. Mais ces observations, et d'autres du même genre, se bornaient aux alentours de l'œil; on n'avait pas pénétré dans le mécanisme intime de la vision. On a reconnu depuis que cet organe est un véritable instrument d'optique, au fond duquel la lumière va dessiner, ou plutôt peindre les portraits en petit de tous les corps situés en présence du spectateur; et l'on peut dire que parmi tant de sujets d'observation que la nature présente à l'œil de toutes parts, il ne voit rien qui porte plus sensiblement l'empreinte d'une intelligence infinie que la structure de l'œil lui-même.

1215. Entrons dans les détails, et commençons par une description de l'œil, qui serait imparfaite de la part d'un anatomiste, mais qui suffit au physicien, pour prendre une idée des effets de la vision.

La cavité dans laquelle l'œil est logé se nomme *l'orbite de l'œil*. Les nerfs optiques qui, séparés en partant du cerveau, s'étaient ensuite réunis en un point commun, se séparent de nouveau, et chacun d'eux entre dans l'orbite placée de son côté, où il s'épanouit pour former le globe de l'œil, en sorte que les enveloppes de ce globe ne sont autre chose que les expansions du nerf optique.

On distingue dans ce nerf deux tuniques principales, situées l'une sur l'autre autour de la partie médullaire. La tunique extérieure, qu'on appelle la *dure-mère*, prend, en s'épanouissant, une forme arrondie, dont la partie antérieure, qui est à découvert, représente à peu près un segment de sphère d'un diamètre plus petit que celui de la partie enfoncée dans la cavité de l'œil, ce qui la rend saillante et plus propre à recevoir les rayons qui viennent de côté.

De ces deux portions de sphère, celle qui occupe le fond de la cavité est opaque et d'une forte consistance ; on la nomme *sclérotique* ou *cornée opaque* ; l'autre portion, qui forme la partie antérieure, est plus mince, plus flexible, et en même temps diaphane, d'où lui vient le nom de *cornée transparente*. La seconde tunique du nerf optique, qui s'appelle la *pie-mère*, s'épanouit en-dessous de la dure-mère : elle est composée de deux lames, dont l'une, qui est une véritable membrane, s'applique exactement sur la cornée opaque, et se confond avec elle près de la cornée transparente ; l'autre, qu'on nomme *choroïde*, est un assemblage de nerfs et de vaisseaux qui sortent de la surface interne de la première, et qui sont imbibés d'une espèce de liqueur noirâtre. Ces nerfs et ces vaisseaux s'ouvrent en partie et forment ce tissu velouté dont Ruysch a fait une tunique particulière, à laquelle on a donné son nom.

Vers l'endroit où la cornée transparente s'unit à la sclérotique, la choroïde se détache, et de plus se sous-divise en deux lames, dont celle qui est antérieure produit cette espèce de couronne colorée qu'on appelle *l'iris*, vers le milieu de laquelle est une ouverture ronde connue sous le nom de *prunelle*. La lame postérieure, qu'on nomme *couronne ciliaire*, est plissée et comme composée de feuillettes oblongs, dont nous verrons bientôt l'usage.

L'iris est un assemblage de fibres musculaires, les unes orbitulaires et rangées autour de la circonférence de la prunelle, les autres dirigées comme autant de rayons. Les premières servent à rétrécir la prunelle, pour modérer l'impression d'une lumière trop vive, et les autres à la dilater, pour laisser entrer avec plus d'abondance une lumière faible.

Les couleurs les plus ordinaires de l'iris sont l'orangé et le bleu, et souvent ces couleurs se trouvent mélangées dans un même œil. Les yeux qu'on appelle *noirs* sont d'un jaune brun, ou d'un orangé très foncé.

La couronne ciliaire tient comme enchâssé, vis-à-vis le trou de la prunelle, un corps transparent, assez solide, d'une forme lenticulaire, et plus convexe vers le fond de l'œil que par devant : ce corps porte le nom de *cristallin*.

La portion médullaire du nerf optique forme, en s'épanouissant, une membrane blanche et très mince, appliquée sur la choroïde, et qu'on appelle *rétine*.

L'espace compris entre la coruée transparente et le cristallin se trouve divisé par l'iris en deux espèces de chambres, qui communiquent ensemble au moyen de la prunelle, et qui sont remplies d'une eau limpide, appelée *l'humeur aqueuse*. Entre le cristallin et le fond de l'œil est un autre espace beaucoup plus grand, occupé par une sorte de gelée transparente, qui est l'*humeur vitrée*. Le cristallin est comme enchatonné dans la partie antérieure de cette gelée, dont la puissance réfractive est moindre que la sienne.

Ce qu'on appelle le *blanc de l'œil* est produit par une tunique particulière, qu'on nomme *albuginée*, et qui adhère fortement à la cornée; elle est recouverte par une autre membrane, très mince, lâche et flexible, appelée *conjonctive*, qui se replie au bord de l'orbite et forme la surface interne des paupières. Celle-ci est percée d'une multitude de petits trous, par lesquels passe le fluide qui vient de la glande lacrymale.

L'œil a été pourvu de différens muscles destinés à l'avancer ou à le retirer en arrière, à en élargir ou à en resserrer l'ouverture, et à lui procurer une multitude de positions variées, pour le mettre à portée d'apercevoir distinctement les objets situés à différentes distances.

De la marche des Rayons dans l'Œil.

1216. De tous les points d'un objet qui se présente à l'œil, il part des rayons qui divergent dans tous les sens, mais parmi lesquels ceux qui sont dirigés de manière à pouvoir entrer dans la petite ouverture de la prunelle forment des espèces de pinceaux déliés, en sorte que ceux qui composent un même pinceau approchent du parallélisme. Supposons que l'objet étant d'une forme allongée, soit situé horizontalement, et ne considérons, pour plus de simplicité, que le pinceau qui vient du milieu, et les deux qui viennent des extrémités. L'axe du premier pinceau

passant par le centre de la cornée, et tombant à angle droit sur la surface du cristallin, pénètre les différentes humeurs de l'œil, sans y subir de réfraction. Cet axe porte le nom d'*axe optique*, et est d'un grand usage dans l'explication des phénomènes de la vision. Les autres rayons qui tombent obliquement sur la cornée se réfractent dans l'humeur aqueuse, en convergeant vers l'axe. Leur passage à travers le cristallin augmente cette convergence; et, en sortant de ce corps lenticulaire pour entrer dans un milieu moins dense, ils prennent un nouveau degré de convergence qui est tel, que le cône qu'ils forment derrière le cristallin a son sommet situé précisément sur le fond de l'œil, où il dessine l'image du point d'où les rayons sont partis pour se rendre à cet organe. Cette marche des rayons est analogue à celle dont nous avons parlé (1039), en exposant les effets de la réfraction dans les milieux terminés par des surfaces courbes.

Les axes des deux autres pinceaux, en entrant par la cornée, se réfractent ainsi que les rayons qui les accompagnent: ces pinceaux se croisent ainsi en passant par le trou de la prunelle, et subissent dans le cristallin et l'humeur vitrée de nouvelles réfractations, dont l'effet est de rapprocher les rayons qui les composent de leurs axes respectifs, en sorte qu'ils forment deux nouveaux cônes dont les bases reposent sur la surface postérieure du cristallin, et dont les sommets tombent sur le fond de l'œil, où ils dessinent de même les images des points qui leur correspondent sur l'objet.

Tous les pinceaux partis des autres points de l'objet font le même office, en sorte qu'il se forme au fond de l'œil une image complète de cet objet, mais qui est renversée, en conséquence de ce que les rayons qui viennent des points situés de part et d'autre de celui du milieu, se croisent en traversant la prunelle. L'opinion la plus commune est que l'image se peint sur la rétine: cependant de célèbres anatomistes ont pensé que la choroïde était la véritable toile du tableau (1).

(1) Smith, Traité d'Optique, p. 44, notes 31 et suiv.

1217. On peut vérifier, par l'expérience, ce que nous venons de dire sur la cause de la vision, en prenant l'œil d'un bœuf tué récemment, et en le dépouillant par derrière de sa sclérotique. Si l'on place cet œil dans l'ouverture faite au volet d'une chambre obscure, de manière que la cornée soit en dehors, on verra, à travers les membranes transparentes de la partie opposée, les images distinctes des objets extérieurs.

Manière dont le Sens du Toucher influe sur la Vision.

1218. Cette vérité une fois reconnue, qu'aussitôt qu'un objet est devant l'œil, cet objet a son portrait au fond de l'organe, il semble d'abord que la vision n'ait plus besoin d'autre explication; et l'on serait tenté de croire que nos yeux, à l'instant où ils s'ouvrent pour la première fois, sont déjà tout dressés, et que la seule présence des objets suffit pour que les impressions faites sur la rétine, et transmises par l'intermédiaire du nerf optique jusqu'au cerveau, donnent occasion à l'âme de se représenter ces objets tels qu'ils sont, et aux endroits où ils sont. Mais on concevra qu'il faut quelque chose de plus, si l'on fait attention que l'image qui se peint sur la rétine est une simple surface figurée et revêtue de couleurs, sans aucuns reliefs, et que d'ailleurs elle n'est que le résultat de l'action qu'exercent sur l'organe les extrémités des rayons qui le touchent, et ne se rapporte pas d'elle-même aux extrémités opposées, où se trouve situé le corps qui est l'objet de la vision. Ces considérations avaient déjà fait conjecturer à plusieurs physiciens, qu'il existait un intermédiaire qui nous servait à lier les impressions produites par les rayons que les corps envoient à l'œil avec les modifications de ces corps eux-mêmes. Ils pensaient que c'était le tact qui instruisait l'œil en quelque sorte, et qui nous aidait à rectifier les erreurs dans lesquelles cet organe nous entraînerait, s'il était abandonné à lui-même. Mais personne n'a mieux développé que Condillac (1) le

(1) Traité des Sensations

moyens que le tact emploie dans cette espèce d'enseignement, et c'est en partie d'après ce célèbre métaphysicien que nous allons essayer de les faire connaître.

1219. Les premières leçons nous viennent des divers mouvemens que fait la main, qui a elle-même son image au fond de l'œil. Tandis qu'elle s'approche et s'éloigne successivement de cet organe, elle lui apprend à rapporter à une distance plus ou moins grande, à un lieu plutôt que l'autre, l'impression qui se produit sur la rétine, d'après le sentiment que nous avons de chaque position de la main, de la direction et de la grandeur de chaque mouvement qu'elle fait. Tandis qu'une main passe sur l'autre, elle étend, en quelque sorte, sur la surface de celle-ci, la couleur dont l'impression est dans l'œil; elle circonscrit cette couleur entre ses limites, et fait naître dans l'âme la représentation d'un corps figuré de telle manière. Lorsqu'ensuite nous touchons différens objets, la main dirige l'œil sur les diverses parties de chacun d'eux, et lui en rend sensibles l'arrangement et les positions respectives; elle agit sans cesse, à l'égard de l'œil, par l'intermède des rayons de la lumière, comme si elle tenait une des extrémités d'un bâton qui aboutirait au fond de l'œil par l'autre extrémité, et qu'elle conduisit successivement ce bâton sur tous les points de l'objet. Elle semble avertir l'œil que le point qu'elle touche est l'extrémité du rayon qui le frappe. Elle parcourt ainsi toute la surface de l'objet; elle semble en prononcer la véritable figure. Tantôt courbée uniformément sur la surface d'un globe dont elle suit le contour dans tous les sens, elle marque la distinction de la lumière et des ombres, elle donne de la rondeur et du relief à ce que l'œil aperçoit. Tantôt obligée de varier sa propre figure, tandis qu'elle se moule alternativement sur les faces et sur les arêtes d'un corps anguleux, elle fait ressortir les diverses positions et l'assortiment des plans qui en composent la surface.

Dès qu'une fois les yeux sont instruits, alors l'expérience qu'ils ont acquise les met dans le cas de se passer des secours du tact; et la seule présence des objets détermine le retour des mêmes sensations, à l'occasion des impressions semblables que font sur l'organe les rayons envoyés par ces objets.

1220. Nous avons dit (1216) que l'image de chaque objet se peint au fond de l'œil dans une situation renversée, et des savans célèbres en ont conclu que chacun voyait naturellement tous les objets dans cette même situation ; mais il sera aisé de sentir combien cette conséquence est peu fondée, si l'on considère que nous voyons notre propre corps, qui a son image renversée sur la rétine, comme celle des autres objets, en sorte que le seul sentiment que nous avons de notre position détermine la sensation qui nous fait voir tous les objets droits.

En même temps que le tact instruit l'œil à rapporter au dehors les images des objets, et à en saisir les formes, il l'exerce sur l'estimation de leur position dans l'espace, de leurs grandeurs et de leurs distances ; et lorsque ces distances surpassent celles jusqu'où s'étendent les mouvemens de la main, nous y suppléons par un autre exercice, qui consiste à nous approcher de l'objet jusqu'au point de le toucher, et à nous en éloigner ensuite, et nous jugeons à peu près de sa distance par l'étendue des mouvemens que nous faisons vers lui, ou en sens contraire. Lorsqu'ensuite la distance surpasse la portée de nos mouvemens ordinaires, les rapports que nous sommes exercés à saisir nous servent comme de règles pour appliquer à des objets plus éloignés les impressions qui se font en nous ; mais à mesure que l'éloignement augmente, les circonstances deviennent toujours moins favorables à ces applications ; et, au-delà d'un certain terme, les objets se présentent à nous sous des apparences plus ou moins trompeuses, qui nous induisent dans ces espèces d'erreurs que l'on a nommées *illusions d'optique*, et dont nous parlerons dans la suite. Donnons un nouveau développement à ce sujet intéressant, et essayons de suivre l'œil depuis les espaces où il est dirigé par une sorte de souvenir des leçons qu'il a reçues du tact, jusqu'aux vastes régions qu'il franchit, bien au-delà du cercle qu'il a parcouru avec son guide.

Estimation de la Distance.

1221. Lorsque nous regardons un objet, il y a toujours un point de cet objet que nous fixons plus particulièrement que les autres, et vers lequel se dirigent les deux axes optiques, en sorte que ce même point devient le sommet de l'angle qu'ils forment entre eux. A mesure qu'un objet s'approche ou s'éloigne de nous, ou, ce qui revient au même, à mesure que nous avançons vers cet objet, ou que nous nous en écartons, les yeux font des mouvemens continuels pour varier leur figure et leur position, de manière à ce que les deux axes optiques coïncident toujours sur un même point de l'objet. Lorsque les distances dont il s'agit sont de celles que nous pouvons mesurer par les mouvemens de la main, ou en allant toucher l'objet, le sentiment que nous avons des mouvemens que font en même temps nos yeux pour se diriger vers l'objet, nous fait contracter l'habitude de juger des distances d'après les impressions qui sont liées à ces mouvemens, et en même temps d'estimer la position de l'objet (1); de là vient que la main va droit à l'objet qui est à sa portée, et que nous voulons toucher ou saisir. Nous parvenons encore à frapper sûrement, avec l'extrémité d'un bâton que nous avons à la main, un objet situé à une certaine distance; mais dès que nous n'employons plus qu'un œil pour fixer l'objet, alors le point de concours des deux axes optiques n'ayant plus lieu, il nous est beaucoup plus difficile de juger de la position de l'objet, comme on peut s'en assurer à l'aide de l'expérience suivante (2). On suspend un anneau à la hauteur de l'œil, par le moyen d'un fil délié, de manière que l'on ne puisse en voir l'ouverture. On prend un bâton long d'un mètre, à l'extrémité duquel on attache transversalement un autre bâton plus petit: alors, fermant un œil, on essaie d'enfiler l'anneau avec le petit bâton, et c'est presque toujours inutilement. Que l'on se serve des deux yeux, et l'on réussira dès la première tentative

(1) Mallebranche, Recherche de la Vérité, t. I, p. 115 et 119.

(2) Musschenbroeck, Essai de Physique, t. II p. 568, n° 1218.

1222. C'est en conséquence de ce que chacun des axes optiques est toujours exactement dirigé vers le point de l'objet que nous fixons de préférence, que quand nous n'avons besoin, relativement à cet objet, que d'un simple alignement, comme quand le chasseur vise l'animal sur lequel il veut tirer, nous fermons un œil pour mieux estimer la direction sur laquelle se trouve l'objet.

Unité de l'Impression produite dans les deux Yeux.

1223. Quoique chacun des objets situés devant nos yeux ait son image dans l'un et l'autre de ces organes, cependant nous ne voyons pas les objets doubles, parce qu'ayant reconnu, à l'aide du toucher, que tel objet était simple, en même temps que nous dirigeons vers lui les deux axes optiques, et que ses deux images se peignaient sur des parties correspondantes des rétines, nous avons lié l'idée de l'unité d'objet avec le sentiment des mêmes impressions, et nous nous sommes accoutumés à identifier deux sensations qui se trouvaient pour ainsi dire à l'unisson l'une de l'autre. Mais si les axes optiques ne concourent plus vers un même point, comme lorsque nous pressons légèrement un œil de côté, avec la main, l'objet paraît double, et il est évident qu'alors les deux images ne tombent plus sur des parties correspondantes des rétines(1).

Estimation de la Grandeur.

1224. Il y a un autre angle dont la considération est importante relativement aux phénomènes de la vision. Il est formé par les

(1) On peut produire une illusion du même genre, qui ait sa source dans le sens du toucher. Si l'on fait croiser l'index par le doigt suivant, en sorte que celui-ci se rabatte vers le pouce, et qu'ayant placé un petit corps globuleux sous les extrémités des mêmes doigts, on le presse pour le mettre plus exactement en contact avec l'un et l'autre, on croira sentir deux globes. Dans ce cas, le doigt qui a été dérangé de sa position naturelle exerce une action qui, n'étant plus d'accord avec celle de l'autre doigt, donne naissance à une sensation qui semble se rapporter à un nouvel objet. On pourrait dire, en quelque sorte, que celui qui fait cette expérience, touche des doigts.

deux rayons qui, en partant des extrémités de l'objet, viennent se croiser dans la prunelle : on l'appelle *angle visuel*.

Derrière cet angle il s'en forme un second, qui provient des mêmes rayons réfractés à travers le cristallin et les autres humeurs de l'œil; cet angle sous-tend le diamètre de l'image sur le fond de l'œil, et il est facile de voir qu'il augmente et diminue en même temps que le premier; et lorsque l'un et l'autre sont petits, les augmentations et les diminutions, ainsi que celles du diamètre de l'image, sont sensiblement en raison inverse des distances de l'objet à l'œil.

1225. Maintenant la grandeur d'un objet peut être conçue sous plusieurs rapports différens. Les véritables dimensions de l'objet, considéré en lui-même, donnent ce qu'on appelle *la grandeur réelle*, et l'ouverture de l'angle visuel détermine la grandeur *apparente*; d'où l'on voit que la grandeur réelle étant une quantité constante, la grandeur apparente varie continuellement avec la distance.

1226. Si nous jugions toujours des dimensions d'un objet d'après sa grandeur apparente, tout ce qui est autour de nous subirait continuellement à cet égard des variations très sensibles, qui nous entraîneraient dans d'étranges méprises. Par exemple, un géant de vingt-quatre décimètres, vu à la distance de quatre mètres, ne nous paraîtrait pas plus grand qu'un nain de six décimètres vu à la distance d'un mètre, puisque l'un et l'autre seraient vus à peu près sous le même angle.

Mais les expériences que nous avons faites avec le secours du tact sur la comparaison des distances et des grandeurs, nous ont mis à portée de redresser nos idées, dans les circonstances où nous sommes le plus intéressés à éviter la méprise, c'est-à-dire, dans celles où il s'agit des objets qui sont à notre proximité; car alors la distance dont nous jugeons assez exactement, entre comme donnée dans notre estimation, et nous empêche de nous en laisser imposer par l'idée fautive qui résulterait de la considération isolée des grandeurs.

Ainsi les diverses positions des yeux, analogues à la variation des angles formés par les axes optiques, à mesure que les objets

sont plus près ou plus éloignés, reproduisent en nous l'impression de la distance, telle que le tact nous a appris à l'estimer; et cette impression se compose avec celle de la grandeur apparente, ou de l'étendue que l'image occupe au fond de l'organe, en sorte que la sensation qui nous représente la grandeur réelle est comme le produit de ces deux élémens. Par exemple, lorsqu'un géant de vingt-quatre décimètres, qui était d'abord à deux mètres de distance, se transporte à quatre mètres, d'une part son image est diminuée de moitié au fond de nos yeux; mais, d'une autre part, la distance se trouve doublée, et l'espèce de combinaison qui se fait en nous des deux impressions relatives, l'une à la grandeur et l'autre à la distance, qui répondent à chaque position du géant, équivaut, pour ainsi dire, au produit constant de deux quantités, dont l'une augmente à proportion que l'autre diminue; d'où il résulte que le géant nous paraît toujours de la même taille.

1227. Nous concluons encore de ce qui vient d'être dit, que quand deux objets inégaux sont placés à la même distance, nous jugeons de leurs grandeurs respectives d'après le rapport entre les angles visuels relatifs à l'un et à l'autre, ou entre les grandeurs de leurs images au fond de l'œil; car alors les deux produits qui résultent de l'impression de la distance combinée avec celle de la grandeur, ont une quantité commune, savoir, la première impression, à laquelle on peut substituer l'unité, en sorte qu'ils sont proportionnels à l'autre quantité, qui est l'impression de la grandeur.

Jugemens relatifs aux Objets éloignés.

1228. Tant que les objets sont assez peu éloignés, pour que les angles formés par les axes optiques aient une ouverture sensible qui permette de les comparer, les mouvemens de nos yeux, relatifs à ces angles, nous aident encore à nous représenter avec une certaine justesse les distances, et en même temps les grandeurs dont l'estimation tient en partie à celle des distances; mais lorsque l'éloignement des objets rend les mêmes angles si petits qu'ils échappent à la comparaison, les grandeurs jugées dépen-

dent beaucoup des grandeurs apparentes : ainsi un objet situé à une distance considérable, nous paraît beaucoup plus petit qu'il ne l'est réellement.

1229. Le plus ou le moins de clarté des objets, et la manière plus ou moins nette et distincte dont nous les apercevons, nous les fait juger encore ou plus proches ou plus éloignés. C'est en se dirigeant d'après ce principe et le précédent, que les peintres diminuent les dimensions des figures à proportion que les objets qu'elles représentent sont censés être dans un plus grand éloignement, et qu'ils en expriment en même temps les contours par des teintes plus faibles, et même ébauchent si légèrement ces contours, qu'ils paraissent se perdre dans la couleur du fond, lorsque la distance est supposée très considérable. -

Enfin, lorsqu'entre un objet et nous il se trouve plusieurs autres objets, cette nouvelle circonstance nous aide encore à estimer la distance du premier objet, par une sorte d'addition que nous faisons de toutes les distances des objets intermédiaires, pour en composer une distance totale; d'où il résulte qu'alors un objet nous paraît plus éloigné que dans le cas où l'espace qui nous en sépare serait nu, et sans aucun point de ralliement qui pût nous servir à sommer toutes les parties de la distance.

Exemples à l'appui des Considérations précédentes.

1230. Pour confirmer tout ce que nous venons de dire au sujet de la vision, nous ajouterons ici un ou deux exemples qui prouvent à quel point l'œil est neuf dans l'art de voir, lorsqu'il donne accès à la lumière pour la première fois. Un jeune homme âgé de 13 ans, auquel M. Chesselden venait de faire l'opération de la cataracte (1), fut d'abord si éloigné de pouvoir juger en aucune manière des distances, qu'il croyait que tous les objets

(1) La cataracte est une privation de la vue, occasionnée par l'opacité du cristallin. Pour rendre au malade la faculté de voir, on déplace le cristallin en l'abaissant ou en l'extrayant.

indifféremment touchaient ses yeux (ce fut l'expression dont il se servit) comme les choses qu'il palpait touchaient sa peau. Les objets qu'il trouvait les plus agréables étaient ceux dont la surface est unie et la forme régulière, quoiqu'il ne pût encore porter aucun jugement sur leur forme, ni dire pourquoi ils avaient pour lui plus d'attrait que les autres. Il se passa plus de deux mois avant qu'il pût reconnaître que les tableaux représentaient des corps solides; jusqu'alors il ne les avait considérés que comme des plans diversement colorés; mais lorsqu'il commença à distinguer les reliefs des figures, il s'attendait à trouver en effet des corps solides en touchant la toile, et il fut très étonné lorsque, en passant la main sur les parties qui, par la distribution de la lumière et des ombres, lui paraissaient rondes et inégales, il les trouva planes et unies comme le reste. Il demandait quel était donc le sens qui le trompait, si c'était la vue ou le toucher. On lui montra le portrait en miniature de son père, qui était peint sur la boîte de la montre que portait sa mère, et il dit qu'il reconnaissait bien l'image de son père; mais il demandait, avec un grand étonnement, comment il était possible qu'un visage aussi large pût tenir dans un si petit espace; que cela lui paraissait aussi impossible que de faire tenir un nuid dans une pinte (1).

1231. La même opération faite par M. Grant à un aveugle âgé de vingt ans, a été suivie de circonstances semblables. Lorsque les yeux de ce jeune homme furent frappés, pour la première fois, des rayons de la lumière, on vit sur toute sa personne l'expression d'un ravissement extraordinaire. L'opérateur était devant lui avec ses instrumens à la main : le jeune homme l'examina depuis la tête jusqu'aux pieds; il s'examinait ensuite lui-même, et semblait comparer sa propre figure avec celle qu'il avait devant les yeux; tout lui paraissait semblable, exceptées les mains, parce qu'il prenait les instrumens du chirurgien pour des parties de ses mains. Il voulut faire un pas, et parut effrayé de tout ce qui était autour de lui. Il ne pouvait accorder les

(1) *Philosophic. Transact.*, n° 402.

sensations qu'il éprouvait par la vue avec celles que les mêmes objets avaient produites en lui par l'intermède du tact, et ce ne fut que par degrés qu'il parvint à distinguer et à reconnaître les formes, les couleurs et les distances (1).

Des Illusions d'Optique.

1232. Nous avons déjà eu occasion de parler des erreurs dans lesquelles nos yeux nous entraînent lorsque les objets sont hors du cercle de nos observations ordinaires, et nous avons vu que, dans ce cas, nous nous trompons également sur les grandeurs et les distances. Une autre cause qui contribue encore à nous en imposer, est la diversité des positions que prennent les corps à notre égard par une suite des mouvemens qui les transportent dans l'espace, ou de ceux que nous faisons nous-mêmes. Les circonstances qui déterminent ces erreurs, que l'on a nommées *illusions d'optique*, sont extrêmement variées; la sphère qui les embrasse est immense; elles s'étendent jusqu'aux vastes corps qui se meuvent dans les espaces célestes, et l'hypothèse relative à leur influence sur la manière dont plusieurs phénomènes planétaires s'offrent à notre observation, est devenue la base d'une théorie qui ramène à une heureuse simplicité ces phénomènes si embarrassans pour ceux qui voulaient voir des réalités dans de pures apparences. Nous allons donner l'explication de certaines illusions choisies parmi celles qui nous sont le plus familières, ou qui méritent le mieux d'être remarquées.

Illusions produites par des Objets immobiles.

1233. Il n'est personne qui, étant à l'une des extrémités d'une longue avenue, n'ait observé que les deux rangées d'arbres dont elle est composée paraissent converger l'une vers l'autre, au point de se toucher, si l'avenue s'étend assez loin pour cela; dans ce cas, les intervalles entre deux arbres correspondans sous-tendent

(1) Gazette littéraire de l'Europe, 21 mars 1764.

des angles visuels qui vont toujours en diminuant, et finissent par être insensibles à une grande distance. Il en résulte que, sur le petit tableau qui est au fond de l'œil, les images des arbres sont situées sur deux lignes inclinées entre elles, et qui concourent en un point commun, ou, ce qui revient au même, les intervalles entre les images des arbres correspondans diminuent graduellement, de manière que le dernier intervalle est presque nul. Or, si nous supposons que les deux axes optiques se dirigent successivement vers différens arbres toujours plus éloignés, la variation de ces angles, et en même temps celle de l'impression de la distance, deviendra toujours moins sensible; et, par une suite nécessaire, l'impression de la grandeur, qui dépend ici de l'intervalle entre les arbres correspondans, sera tellement prédominante, qu'elle déterminera presque seule le type de la sensation, en sorte que deux lignes exactement parallèles s'offriront à nous sous l'aspect de deux lignes convergentes. C'est par une cause semblable que quand on est à l'entrée d'une longue galerie, le plafond paraît aller un peu en s'abaissant, et le parquet en s'élevant.

1234. S'il n'existe qu'un seul plan, qui soit situé, à l'égard de l'œil, de la même manière que l'un ou l'autre de ceux qui convergeraient dans le cas précédent, comme quand on est à l'une des extrémités d'une longue pièce d'eau, ce plan paraîtra encore se relever de plus en plus à mesure que ses parties seront plus éloignées du spectateur; car alors on compare ce plan à la ligne de niveau qui passerait par l'œil, et qui fait l'office d'un second plan, dont le premier semble se rapprocher par la diminution des angles visuels qui partent des points correspondans pris sur l'un et l'autre plan.

1235. Si le spectateur est au pied d'une haute tour dont il regarde le sommet, elle paraîtra pencher de son côté: car il compare la position de cette tour à une verticale qui passerait par l'œil; et ainsi cette ligne verticale et la hauteur de la tour sont deux parallèles qui doivent tendre en apparence à concourir vers le haut. Dans ces sortes de cas la ligne verticale et la ligne horizontale sont des espèces de limites idéales auxquelles l'œil rapporte les angles visuels dont un des côtés est toujours l'une

ou l'autre de ces lignes, à peu près comme lorsqu'on veut estimer à l'œil l'inclinaison d'une ligne située dans l'espace, on la compare avec une horizontale ou une verticale imaginaire, qui passe par une des extrémités de la lignée donnée.

Lorsque nous nous trouvons à une certaine distance d'un terrain qui s'élève, il nous paraît plus long que dans le cas où il serait de niveau avec l'horizon; c'est ce qui est évident par la seule inspection de la *fig. 78*, où *mn* représente la position inclinée du terrain, et en même temps sa longueur, *mn'* celle qu'il aurait s'il était horizontal, et *nom*, *n'om* les angles visuels analogues aux deux positions.

1236. On pourra expliquer, d'après les mêmes principes, une multitude d'autres illusions d'optique qui se présentent tous les jours à un observateur tant soit peu attentif. Par exemple, s'il est situé vis-à-vis du milieu d'une longue ligne fort éloignée, il la verra s'infléchir à droite et à gauche, en sorte qu'elle lui paraîtra une portion de courbe dont l'axe passerait par son œil. S'il a devant lui un polygone régulier d'une certaine étendue, les côtés situés parallèlement à la surface de son corps lui sembleront plus grands que ceux qui sont obliques, et le polygone deviendra irrégulier en apparence. C'est une observation qu'il est facile de faire, et dont on peut varier à volonté les circonstances, en prenant diverses positions à l'égard du grand bassin des Tuileries.

Notion de la Perspective.

1237. Ce que nous venons de dire nous conduit à quelques considérations générales sur la perspective. Le but de cette science est de représenter sur un plan des corps de toutes les formes. Or, si l'on conçoit, pour plus de simplicité, que le corps dont on se propose de tracer l'image soit terminé par des faces planes, les figures de ces faces différeront nécessairement dans l'image de ce qu'elles sont sur le corps même. Par exemple, si l'on veut représenter un cube, on pourra bien donner la figure d'un carré à l'une des faces de l'image; mais les deux faces adjacentes qui concourent avec la première à la formation d'un même angle

solide, seront évidemment des quadrilatères d'une figure différente, puisque la somme des trois angles plans dont il s'agit, considérés dans l'image, doit être équivalente à quatre angles droits, tandis qu'elle n'en vaut que trois sur le solide. Malgré cette différence, on ne laisse pas de parvenir à un certain assortiment de lignes qui fait une sorte d'illusion, et offre à l'œil un portait fidèle de l'objet original.

Pour concevoir la raison de cette illusion, supposons un cube situé dans l'espace, sous une position déterminée, relativement à l'œil du spectateur, et supposons de plus que le cube soit transparent. Il résulte de ce que nous avons dit sur la manière dont s'opère la vision, que les axes des différens pinceaux de la lumière envoyés par tous les points du cube, et qui sont les seules lignes dont nous ayons besoin ici, après s'être croisés dans le trou de la prunelle, formeront une espèce de petite pyramide dont la base reposera sur le fond de l'œil, où elle produira l'image du cube. Maintenant supposons entre l'œil et le cube un plan, ou tableau transparent, à travers lequel passent tous les axes qui vont des différens points du cube à cet œil, en y laissant leur empreinte, et imaginons qu'alors le cube disparaisse. L'image formée par l'ensemble des empreintes deviendra l'objet immédiat de la vision; et comme tous les points de cette image enverront à l'œil des rayons dirigés comme ceux qui partaient immédiatement du cube, la copie offerte par le tableau fera naître au fond de l'œil des impressions semblables à celles qu'avait produites la présence de l'objet original. Or, cette copie est ce qu'on appelle la *perspective du cube*. On conçoit, d'après cela, comment cette copie dont tous les traits sont sur le passage des rayons qui proviendraient des différens points d'un cube, doit rendre ce solide aussi fidèlement que puisse le permettre le niveau du plan qui sert de toile au tableau. La géométrie fournit des règles pour tracer les lignes qui composent comme le dessin de ces sortes de portraits; et lorsqu'à ce dessin, qui a déjà par lui-même un caractère frappant de vérité, l'art de la peinture ajoute la distinction des ombres et de la lumière, et la magie du coloris, il résulte de ce concours une illusion à laquelle il ne semble manquer, pour

être parfaite, que ce qu'il faut pour ménager à l'œil, en se faisant sentir, tout le plaisir de la surprise.

*Cause de la Grandeur que paraît avoir la Lune
à son lever.*

1238. Une des illusions d'optique les plus remarquables, est celle qui nous fait juger la lune plus grande lorsqu'elle se lève, que quand elle est à une certaine hauteur au-dessus de l'horizon. Il n'est personne qui n'ait été frappé plus d'une fois du contraste que présente le diamètre de cet astre, comparé à lui-même, dans les deux circonstances dont nous venons de parler. Pour en concevoir la raison, il faut partir de ce principe, que nous voyons le ciel sous la forme d'une voûte très surbaissée. Soit T (fig. 79) la moitié du globe terrestre élevée au-dessus de l'horizon ux ; soit $zytx$ la moitié du cercle que parcourt la lune par son mouvement diurne, et $acgb$ la moitié correspondante de la courbe qui termine l'atmosphère (1) : les différentes couches dont celle-ci est composée réfléchissent de préférence les rayons bleus de la lumière du soleil, et ces rayons, renvoyés vers nos yeux, nous font voir l'atmosphère de cette même couleur. La surface $acgb$, qui est comme la limite jusqu'où s'étendent toutes ces réflexions, devient ainsi à nos yeux comme une voûte à laquelle tous les astres semblent attachés. Supposons un observateur placé au point o , et menons par ce même point un plan poi parallèle à ux . Le spectateur, pour qui la courbure de la terre est insensible, sera dans le même cas que si ce plan existait réellement, et ainsi la voûte céleste se réduira dans son jugement à l'arc $dcge$, qui repose sur le même plan; d'où il suit qu'il verra les points extrêmes d, e de cette voûte beaucoup plus éloignés que le point culminant l .

(1) On a représenté ici, pour plus de facilité, l'atmosphère plus étendue qu'elle ne l'est en effet; mais le véritable état des choses est à l'avantage de l'explication.

D'une autre part, les objets qui sont interposés entre nous et la lune, lorsque cet astre est à l'horizon, contribuent encore à augmenter la distance apparente des points d , e , par rapport au spectateur (1229), et à diminuer la courbure qu'il attribuait à la voûte du ciel.

Supposons que flh soit une coupe de cette voûte, telle que nous nous la représentons par l'effet des deux causes dont on vient de parler. Les arcs pu , ix étant censés infiniment petits, à cause du grand éloignement où se trouve la lune à notre égard, le moment où son centre parvient en u peut être regardé, sans erreur sensible, comme celui de son lever. Le spectateur alors la voit sous l'angle por , et la rapporte en L à la distance of . Lorsqu'ensuite la lune est arrivée en z , c'est-à-dire, au méridien, le spectateur la voit encore sous le même angle $p'or'$, mais il la rapporte en l , c'est-à-dire, à un point situé beaucoup plus près de lui. Quoique l'image de la lune occupe toujours le même espace dans l'œil du spectateur, comme cet astre lui paraît à une plus petite distance, il le juge aussi plus petit, à peu près dans le rapport de la ligne ol à la ligne of , car alors les deux produits qui résultent de l'impression de la grandeur combinée avec celle de la distance (1226) ayant une quantité commune, qui est la première impression, sont en quelque sorte proportionnels à la seconde; et ainsi nous nous formons une idée des grandeurs réelles, d'après le rapport entre les distances apparentes.

1239. Mallebranche, à qui l'on est redevable, au moins en grande partie, de cette explication, l'a vérifiée à l'aide d'une expérience simple et facile à faire; elle consiste à regarder la lune, lorsqu'elle est à l'horizon, à travers un verre enfumé. Dans ce cas, on ne la voit pas plus grande que quand elle est au méridien, pourvu que le verre soit si près de l'œil, qu'il éclipse entièrement tous les autres objets, et ne nous laisse aucun moyen d'estimer les distances (1).

(1) Recherche de la Vérité, t. I, p. 127 et suiv.; et t. III, p. 159 et suiv.

Illusions produites par le Mouvement.

1240. Une autre scène, non moins variée que la précédente; est celle que remplissent les illusions d'optique dont la source est dans le mouvement actuel des corps qui les font naître. Concevons d'abord un objet immobile, et un spectateur qui se meuve, par exemple, de gauche à droite, mais d'une manière insensible pour lui-même; l'objet, dans ce cas, se trouvant situé toujours plus à gauche par rapport au spectateur, l'œil de celui-ci recevra la même impression que si, étant immobile, il avait vu faire à l'objet un mouvement de droite à gauche : en général, lorsque nous faisons des mouvemens sans nous en apercevoir, nous les rapportons en sens contraire aux objets qui nous environnent. Ainsi, lorsque nous sommes tranquilles sur un bateau qui se meut, nous voyons les arbres, les édifices et les autres objets venir à nous, passer devant nous, ou s'éloigner, suivant que le bateau est emporté par des mouvemens opposés : c'est ce qu'un poète célèbre a exprimé d'une manière pittoresque, lorsqu'il fait dire au navigateur qui sort de la rade, que les terres et les villes s'éloignent de ses yeux (1).

1241. Supposons que le spectateur, se croyant toujours en repos, fasse un mouvement représenté par AB (*fig. 80*), tandis qu'un objet situé à une certaine distance parcourt ab . Dans cette hypothèse, Af sera le rayon visuel sur la direction duquel le spectateur verra l'objet au commencement du mouvement, et Bd celui sur la direction duquel il le verra à la fin du mouvement. Donc si telles sont les positions relatives et les longueurs des lignes AB , ab , que les deux rayons visuels se croisent en quel que point c , l'objet paraîtra au spectateur avoir fait un mouvement de gauche à droite, ou de f vers d , c'est-à-dire, en sens contraire du mouvement réel qui a eu lieu suivant ab .

Pour rendre cette explication plus sensible, nous pouvons sup-

(1) *Provehimur portu; terræque urbesque recedunt.* VIRGIL., *AEn.*, *lib. III*, v. 72.

poser qu'au premier instant du mouvement le spectateur regardait l'objet situé en a , à l'aide d'une lunette dirigée suivant Aa , il laisse ensuite cette lunette dans la même position pendant tout le temps du mouvement, en sorte que quand l'objet est arrivé en b , la lunette est dirigée suivant Ba parallèle à la ligne Aa . Pour voir alors de nouveau l'objet, le spectateur est obligé de mettre la lunette dans la position Bb , c'est à-dire, de la faire tourner de gauche à droite: ce qui lui fait juger que l'objet s'est mu dans le même sens.

1242. Concevons maintenant que le spectateur parcourt AB (*fig. 81*) tandis que l'objet fait le mouvement ab situé en sens contraire de AB . Si le spectateur était immobile, les rayons visuels relatifs aux deux termes extrêmes du mouvement de l'objet seraient Aaf et Abr , en sorte que le spectateur jugerait de la grandeur de ce mouvement par l'ouverture de l'angle bAa ; mais parce que lui-même a parcouru AB , les deux rayons visuels seront Af et Bd , et l'angle d'après lequel le spectateur estimera la grandeur du mouvement sera dcf , ou son égal AcB , plus grand que l'angle bAc qui aurait lieu dans le cas où le spectateur serait immobile, puisqu'il est égal à la somme des angles $bAc + Abc$. Donc le spectateur jugera le mouvement de l'objet plus rapide qu'il ne l'a été en effet, parce qu'en lui rapportant son propre mouvement le long de AB , suivant une direction BA qui est dans le même sens que celle du mouvement de l'objet, il lui attribue une accélération de vitesse qui lui est étrangère. Dans l'hypothèse où le spectateur emploierait encore ici une lunette pour regarder l'objet, cette lunette, d'abord dirigée suivant Af , ayant à la fin du mouvement une position suivant Ba parallèle à Af , se détournerait en décrivant l'angle nBd beaucoup plus grand que l'angle fAr , qui aurait eu lieu si le spectateur fût resté immobile.

1243. Supposons enfin que le mouvement AB (*fig. 82*) du spectateur et le mouvement ab de l'objet aient lieu dans un même sens, et que les directions des deux lignes, suivant lesquelles ils se font, soient tellement combinées avec les temps employés à parcourir ces lignes, que les rayons visuels Aa , Bb relatifs aux

deux termes extrêmes du mouvement, et tous les autres rayons qui se rapportent aux points intermédiaires, soient sans cesse parallèles entre eux : alors l'objet paraîtra immobile au spectateur, qui s'imagine être lui-même en repos, et l'on conçoit aisément qu'il verrait constamment cet objet au bout d'une lunette qui resterait dans la même position.

L'hypothèse d'un spectateur qui, ayant un mouvement insensible pour lui-même, le rapporte en sens contraire à des objets immobiles, a servi à expliquer le mouvement diurne apparent du soleil, en conséquence du mouvement réel qui fait tourner la terre autour de son axe ; on peut déduire aussi du même principe l'explication du mouvement annuel que le soleil nous paraît avoir dans l'écliptique. Les autres hypothèses, relatives aux mouvemens simultanés du spectateur et d'un objet qu'il a sous les yeux, ont fourni la véritable cause des dérangemens apparens que présentent les mouvemens périodiques des planètes, suivant que l'on croit voir ces astres ou rétrograder dans leurs orbites, ou accélérer leur vitesse, ou enfin rester stationnaires pendant un certain temps (1).

1244. Lorsque nous courons en regardant un objet situé à une très grande distance, et qui est sans mouvement, ou n'en a qu'un imperceptible pour nous, il nous semble que cet objet court avec nous et du même côté ; c'est ce qui arrive, par exemple, lorsqu'en courant nous portons nos yeux vers la lune. Le rayon visuel, toujours dirigé vers cet astre, fait alors des angles si petits avec lui-même, à mesure qu'il change de position, à cause de l'immensité de la distance, que ses directions sont sensiblement parallèles entre elles, en sorte que la lune nous paraît se mouvoir sur l'extrémité de ce rayon ; et comme nous avons le sentiment du mouvement que fait l'œil, d'où part le même rayon, nous en attribuons un semblable à la lune.

(1) Voyez l'explication développée de ces phénomènes, dans le *Traité élémentaire d'Astronomie physique* de M. Biot, p. 530.

Phénomène de l'Aberration.

Nous avons dit (1009) que le mouvement progressif de la lumière, combiné avec celui de la terre dans son orbite, avait fourni l'explication du phénomène appelé *aberration des étoiles*. Cette explication, qui ramène à une simple illusion d'optique le phénomène dont il s'agit, trouve ici naturellement sa place.

1245. On avait remarqué dans les étoiles fixes de petits mouvemens que quelques astronomes avaient été tentés de regarder comme une apparence uniquement produite par le mouvement de la terre dans son orbite. Choisissons le cas le plus simple, qui est celui où l'étoile que nous prenons pour exemple serait située au pôle de l'écliptique, et supposons que la conjecture des astronomes dont nous venons de parler eût eu quelque fondement. Dans cette hypothèse, où l'observateur rapportera à l'étoile son propre mouvement insensible pour lui-même, il est clair que ses différens rayons visuels, dirigés constamment vers l'étoile, formeront un cône dont la base sera l'écliptique, et dont le sommet coïncidera avec l'étoile. Les mêmes rayons prolongés formeront au-dessus de l'étoile un second cône opposé au premier par son sommet, et l'observateur rapportant continuellement l'étoile sur la direction de leurs prolongemens, croira voir cette étoile décrire dans le ciel un petit cercle, de manière que l'étoile lui paraîtra toujours dans le point de ce cercle diamétralement opposé au point de l'écliptique qu'il occupera lui-même.

Mais les étoiles fixes sont à une si grande distance de la terre, que l'angle formé par deux rayons visuels, qui, en partant des deux extrémités du diamètre de l'écliptique, iraient passer par un de ces astres, et que l'on appelle *angle de la parallaxe annuelle*, est d'une petitesse qui le rend inappréciable, en sorte que cette cause ne peut occasionner dans l'étoile aucune apparence sensible de mouvement : aussi le phénomène donné par les observations est-il tout différent; car l'étoile, au lieu de paraître dans la partie de son cercle annuel opposée à celle de l'écliptique dans laquelle se trouve l'observateur, est à 90^{d} en deçà, de manière

que l'étoile retarde toujours de ce même nombre de degrés par rapport au mouvement qu'elle aurait en vertu de la parallaxe. De plus, l'angle formé par le rayon visuel dirigé vers l'étoile, avec la ligne qui passe par le centre du cercle où est la véritable position de l'étoile, est de $20''$, d'où il suit que le diamètre du cercle qu'elle paraît décrire dans le cours d'une année est de $40''$.

1246. Bradley, qui avait observé avec beaucoup d'assiduité toutes les circonstances de ce mouvement apparent des étoiles fixes, découvrit enfin la véritable explication du phénomène, et l'idée qui la lui suggéra fut un de ces traits de génie qui font époque dans l'histoire des Sciences. Mais avant d'exposer cette explication, il faut établir le principe qui lui sert de base.

Supposons qu'un rayon de lumière, en partant du point radieux a (fig. 83), vienne frapper un œil situé en m suivant une direction am , et avec une vitesse représentée par cette ligne; supposons de plus qu'au moment où l'œil est frappé par ce rayon il se meuve lui-même suivant une direction mf , et représentons par mn l'espace qu'il parcourt dans chaque instant égal à celui que le rayon emploie à parcourir am . L'œil recevant en m le rayon am , le frappera lui-même avec l'intensité de sa propre vitesse mesurée par mn , et le spectateur s'imaginera recevoir l'impression d'un mouvement qui lui serait imprimé dans la direction opposée nm , avec une vitesse représentée par cette ligne; et l'on concevra, avec un peu d'attention, que cette impression apparente aurait encore lieu dans l'hypothèse où le rayon serait immobile dans l'espace. Mais, d'une autre part, l'œil reçoit réellement l'impression du mouvement qu'avait le rayon dans la direction am ; d'où il suit que si l'on termine le parallélogramme $mnda$, les deux impressions se composeront de manière que l'œil sera dans le même cas que si le rayon de lumière était venu le frapper dans la direction de la diagonale dm . Concluons de là que l'œil verra le point radieux a sur cette même direction.

Il résulte, de ce qui vient d'être dit, que si la vitesse de nos mouvemens ordinaires avait, avec celle de la lumière, un rapport appréciable, nous ne pourrions aller et venir sans rap-

porter les objets environnans hors de leurs véritables positions. Mais comme, dans ce cas, la vitesse de la lumière est censée infinie relativement à la nôtre, l'angle amd étant infiniment petit, la diagonale md coïncide avec la direction réelle am de la lumière, et il n'en résulte aucun déplacement apparent de la part des objets.

1247. Il en est tout autrement du mouvement rapide par lequel la terre nous entraîne en parcourant son orbite annuelle, lorsque ce mouvement se combine avec celui de la lumière qui nous vient des étoiles. L'effet du double mouvement dont il s'agit est de faire voir les astres où ils ne sont pas, et de produire ces apparences si heureusement expliquées par Bradley.

Soit a (*fig. 84*) le lieu vrai d'une étoile fixe que nous supposons toujours située au pôle de l'écliptique; soit $tnzm$ la circonférence de ce cercle, et n le lieu du spectateur. Tandis que l'œil de celui-ci est frappé par un rayon an parti de l'étoile, il le frappe lui-même de manière qu'à l'égard du spectateur l'impression se transforme en celle qu'il recevrait, si son œil était frappé dans la direction nu , qui coïncide avec la tangente au point n . Concevons que an et nr soient entre elles dans le même rapport que celui qui existe entre la vitesse de la lumière et la vitesse de la terre dans son orbite, et complétons le parallélogramme $anrc$. D'après ce que nous avons dit il n'y a qu'un instant, l'œil rapportera l'étoile sur la direction de la diagonale nc . Or, la vitesse de la lumière est à celle de la terre dans son orbite, comme 10313 à l'unité; et si l'on calcule d'après ces données la valeur de l'angle anc , on la trouvera de $20''$, conformément à l'observation.

Maintenant si le mouvement de l'étoile pouvait être l'effet de la parallaxe, le spectateur placé en n rapporterait l'étoile sur la direction de la ligne na , d'où il suit qu'il verrait l'étoile dans la partie qui répond à d sur le diamètre correspondant du petit cercle annuel que l'étoile paraîtrait décrire dans le ciel; mais il la voit au contraire à l'extrémité c du diamètre qui coupe le précédent à angle droit. Le même effet se répétera pendant tout le mouvement du spectateur dans l'écliptique; et ainsi l'étoile, en parcourant son cercle d'aberration $gcdb$, est toujours, comme

nous l'avons dit, en arrière de 90^d , relativement à la position qu'elle aurait, si la parallaxe annuelle était la cause de ses déviations apparentes.

1248. Nous avons ramené le phénomène au cas le plus simple, qui est celui où l'étoile étant située au pôle de l'écliptique, tous les rayons qu'elle envoie au spectateur sont perpendiculaires sur la route de l'œil, en sorte que l'étoile paraît décrire un cercle, parce que la différence entre les deux diamètres de l'ellipse qui représente l'orbite de la terre, peut être négligée dans le cas présent : alors, la quantité de l'aberration est constamment de $20''$. Les mouvements apparens des autres étoiles qui ont des positions différentes, produisent des ellipses plus ou moins alongées, dans chacune desquelles la quantité de l'aberration augmente et diminue alternativement à mesure que l'étoile s'approche des extrémités du grand axe ou du petit axe de son ellipse.

L'explication que Bradley a donnée du phénomène dont il s'agit ici, en même temps qu'elle confirme la découverte du mouvement progressif de la lumière, ajoute aux preuves que l'on avait déjà du mouvement de la terre autour du soleil, et c'est ainsi que les vérités empruntent une nouvelle force des résultats qui nous les montrent enchaînées l'une à l'autre.

Du Mirage.

1249. Les marins ont observé depuis long-temps que, dans certaines circonstances, les vaisseaux à la voile, situés dans le lointain, offrent, outre l'image ordinaire qui est droite, une seconde image dont la position est renversée. Ils ont donné à ce phénomène le nom de *mirage*, que l'on a appliqué, par extension, à un autre phénomène qui a lieu à la surface de la terre, et embrasse un champ beaucoup plus étendu.

Il appartenait au célèbre Monge, qui avait souvent été témoin de ce dernier phénomène pendant son séjour en Égypte, d'en dévoiler la véritable cause, en nous la montrant dans la réflexion des rayons lumineux sur la surface invisible d'une couche d'air située près de la terre. À l'aide de cette cause, tout ce que le

phénomène semblait avoir d'extraordinaire vient se ranger parmi les effets connus des lois de la lumière. Nous avons puisé tout ce que nous allons dire sur ce sujet dans l'excellent mémoire où il l'a décrit, et en a donné une explication aussi simple que satisfaisante. Nous reviendrons ensuite au premier phénomène, qui est produit par une action différente de la même cause.

1250. M. Monge remarque d'abord que la production du phénomène dont il s'agit exige que l'on soit dans une grande plaine à peu près de niveau ; que cette plaine se prolonge jusqu'aux limites de l'horizon ; et que, par son exposition au soleil, elle soit susceptible d'acquérir un haut degré de chaleur. Ces diverses circonstances se trouvent réunies dans le terrain de la basse Egypte.

1251. Voici maintenant à quels traits on reconnaît le phénomène. L'espace dans lequel il se montre, et qui auparavant offrait de toutes parts aux yeux un sol aride, jusqu'à une certaine distance, paraît terminé à environ une lieue, par une inondation générale. Les villages qu'elle environne ressemblent à des îles placées au milieu d'un grand lac. On voit sous chacun d'eux son image renversée, telle qu'on la verrait sur une surface d'eau réfléchissante, située en avant. Seulement, comme cette image est éloignée, les petits détails échappent à la vue, et l'on ne voit distinctement que les masses : de plus, les bords de l'image renversée sont un peu incertains, et tels qu'ils s'offriraient à la vue, si l'eau supposée éprouvait une légère agitation.

1252. A mesure qu'on approche d'un village placé dans l'inondation, le bord de l'eau apparente s'éloigne, le lac se rétrécit ; il finit par disparaître, et le phénomène qui cesse pour ce village se reproduit pour un autre village que l'on découvre au-delà.

Les voyageurs qui, après un long et pénible trajet dans un terrain desséché, aperçoivent le phénomène, et s'imaginent toucher au moment d'étancher la soif qui les dévore, sont bientôt détrompés, lorsqu'à mesure qu'ils se hâtent d'arriver à l'objet de leurs espérances, ils le voient fuir devant eux, et reconnaissent qu'ils poursuivent un fantôme.

1253. Pour en venir maintenant à la théorie du phénomène ;

rappelons-nous que quand la lumière passe d'un milieu dans un autre qui est plus rare, sous un angle d'incidence qui va toujours en diminuant, il y a un terme où l'angle de réfraction étant droit, la direction du rayon réfracté coïncide avec la surface de contact des deux milieux, en sorte qu'au-delà de ce terme, le même rayon se relève au-dessus de cette surface, en faisant avec elle un angle de réflexion égal à l'angle d'incidence (1045). Tel est le principe d'où part M. Monge, et dont il déduit l'explication suivante.

1254. Vers le milieu du jour, et pendant la grande ardeur du soleil, les rayons de cet astre, en tombant sur la surface du sol, qui bientôt sera le théâtre du phénomène, l'échauffent au point que la couche d'air en contact avec elle parvient à une température très élevée : cette couche se dilate, sa densité devient sensiblement plus petite que celle de la couche qui repose sur elle. Les rayons qui arrivent des parties basses du ciel, et qui, après avoir pénétré la couche dense, forment avec la surface supérieure de la couche dilatée des angles assez petits pour qu'au lieu de passer dans cette couche, ils soient réfléchis par la même surface, conformément au principe énoncé plus haut, vont porter à un œil placé dans la couche dense l'image renversée des parties du ciel dont nous avons parlé, et que l'on voit alors au-dessous du véritable horizon.

1255. Dans ce cas, si rien n'avertit l'observateur de son erreur, comme l'image des parties inférieures de la voûte du ciel, vue par réflexion, est à peu près du même éclat que celle qui est vue directement, elle semble être un prolongement de celle-ci, qui se présente sous la figure d'un arc dont la concavité est tournée vers le spectateur, en sorte qu'il juge les limites de l'horizon et plus basses et plus voisines de lui qu'elles ne le sont en effet. Mais si quelques objets terrestres, tels que des arbres, des villages et des monticules, lui fournissent des alignemens pour voir les choses sous leur véritable aspect, comme la surface de l'eau, lorsque le rayon visuel fait un petit angle avec elle, n'est ordinairement apparente qu'à la faveur de l'image du ciel qu'elle réfléchit, la surface de l'air qui offre une reproduction de la

même image se transforme aux yeux du spectateur en celle d'une eau réfléchissante.

1256. Les villages et les arbres situés à une distance convenable du phénomène, en interceptant une partie des rayons qui viennent des régions basses du ciel, occasionnent dans son image des vides qui sont aussitôt remplis par des images renversées que font naître des mêmes objets les rayons qu'ils envoient vers la surface de l'air.

1257. C'est lorsque la densité et l'épaisseur de la couche dilatée de ce fluide sont constantes, et que la température de la couche supérieure se maintient au même degré, que le phénomène devient susceptible d'offrir ce qu'il y a dans sa manière d'être de plus propre à exciter la surprise du spectateur, qui est d'avoir l'air de fuir à son approche. Pour bien concevoir ce qui fait varier ainsi sa position apparente, soit mn (fig. 85) une ligne prise sur la surface réfléchissante, bg une partie du ciel située dans le même plan vertical, ocn le plus grand angle sous lequel les rayons puissent le réfléchir par la surface dont il s'agit, et acm l'angle d'incidence correspondant. L'œil du spectateur, que nous supposons placé en o , verra l'image du point a sur la direction prolongée du rayon rc , et cette image coïncidera avec l'un des points où commence le phénomène, relativement à la position actuelle du spectateur. Toutes les autres images, par exemple celle du point z , étant produites par des rayons dont l'angle d'incidence zym et l'angle de réflexion zyn sont plus petits que les précédens, appartiendront à des parties de l'inondation, situées au-delà du bord où elle prend naissance.

1258. Supposons maintenant que l'observateur fasse un mouvement en avant, de manière que son œil se trouve transporté en o' . L'angle qui répond au *maximum* d'inclinaison de la lumière réfléchie étant déterminé et constant, l'œil verra sur la direction $l'p$ parallèle à rc , l'image d'un autre point s tellement situé, que l'angle d'incidence spm , et par suite l'angle de réflexion lpn , seront égaux aux premiers. Or, cette image coïncide, comme la précédente, avec un des points où commence maintenant le phénomène pour l'observateur : donc, le mouvement que l'œil

de celui-ci a fait de o en o' , a produit dans le point dont il s'agit un mouvement égal mesuré par as , suivant la même direction. On pourra appliquer le même raisonnement à toutes les positions ultérieures que prendra successivement le spectateur, d'où l'on conclura qu'il doit voir le bord de l'inondation situé de son côté, reculer sans cesse avec une vitesse égale à la sienne, et ne plus lui laisser apercevoir qu'un sol desséché aux endroits qu'elle semblait baigner. Si, de plus, le spectateur s'avance vers un village situé dans le même espace, le bord de l'inondation doit lui paraître d'abord se rapprocher de ce village, ensuite l'atteindre, et bientôt après se transporter au-delà.

1259. Il est facile de déduire de l'explication précédente celle du mirage en mer, dont la cause est seulement un peu différente, et agit absolument de la même manière. Nous commencerons par observer que comme l'eau de la mer permet aux rayons lumineux de pénétrer dans son intérieur jusqu'à une certaine profondeur, sa surface en restant exposée au soleil ne s'échauffe pas à beaucoup près autant que le ferait un sol aride dans la même circonstance; et ainsi elle ne peut communiquer à la couche d'air qui repose sur elle qu'une température peu élevée, mais l'évaporation y supplée.

La quantité de calorique renfermée dans l'eau elle-même, quoique peu considérable, suffit pour convertir les molécules aqueuses en contact avec la couche d'air dont il s'agit en une vapeur qui s'y introduit et en diminue la pesanteur spécifique (300). La surface de cette même couche devient alors susceptible de réfléchir les rayons lumineux sous l'angle d'où dépend la production du mirage : aussi toute la différence entre ce dernier phénomène et le mirage qu'on observe à la terre, consiste en ce que, dans celui-ci, la diminution de pesanteur spécifique que subit l'air est produite par l'effort qu'exerce immédiatement le calorique, en vertu de son seul ressort, pour écarter les molécules de cet air, au lieu que celui qui a lieu dans l'autre effet résulte de l'union du calorique avec les molécules de l'eau, sous la forme d'un fluide élastique qui est la cause de la dilatation de l'air.

5. De la Vision aidée par l'Art.

1260. Nous avons remarqué, en parlant des sons, la finesse de tact de l'oreille pour les démêler les uns des autres lorsqu'ils sont comme fondus ensemble dans une même harmonie. Rien ne paraissait plus admirable que cette espèce de discernement de l'oreille; mais nous n'avions pas encore parlé de l'œil. Représentons-nous cet organe en présence d'une scène vaste et parsemée d'objets de toutes les grandeurs, de toutes les formes, de toutes les teintes : cette scène se transporte tout entière, dans un instant indivisible, au fond de l'œil sur un espace incomparablement plus petit qu'un seul des objets qu'elle embrasse, et les rayons qui, pour remplir ce message, viennent de tous les objets, disons mieux, de tous les points de chaque objet, passent en foule et comme pêle-mêle, par l'ouverture beaucoup plus petite encore de la prunelle, sans que leur harmonie en soit altérée : l'œil, à son tour, sans aucune confusion, saisit dans cet ensemble immense, tous les détails dont chacun forme seul un ensemble : il les isole ou les groupe à son gré; et tandis que l'oreille, frappée en même temps par un trop grand nombre de voix, n'entend plus que du bruit, l'œil, au milieu de tous ces langages divers que tant d'objets semblent lui parler, distingue ce que chacun d'eux veut lui dire, et le contraste même que forment les mouvemens des uns avec l'immobilité des autres, ne trouble point cette espèce de commerce. Change-t-il lui-même de position ? se tourne-t-il d'un autre côté ? Nouvelle scène, nouveau concours d'impressions variées, toujours également nettes et distinctes : tout a changé pour lui, mais il est encore le même.

Tel est l'organe de la vue, lorsque seul, et sans aucun secours étranger, il exerce ses facultés naturelles. Il nous reste à exposer ce qu'ont fait les arts pour étendre encore sa puissance, et lui procurer de nouvelles manières de voir.

*Des Effets de la Lumière régulièrement
réfléchie, relativement à la Vision.*

Nous avons expliqué (1152 et suiv.) de quelle manière les rayons de la lumière, réfléchis par les surfaces plus ou moins raboteuses des objets ordinaires, nous en font apercevoir les formes et les couleurs. Mais lorsque la réflexion se fait régulièrement à la surface des corps polis, auxquels on a donné le nom de *miroirs*, les rayons renvoyés par ces surfaces se dirigent vers nos yeux, comme s'ils partaient des différens points d'un objet imaginaire, qui se présente à cet organe avec tous les caractères de la réalité. Nous allons examiner successivement les propriétés dont jouissent les miroirs plans, les miroirs concaves et les miroirs convexes.

Du Miroir plan.

1261. Si nous supposons un point radieux situé vis-à-vis d'un miroir plan, il est d'abord évident que ce point envoie de toutes parts des rayons divergens sur la surface de ce miroir. Tous ces rayons sont repoussés de manière qu'ils font leur angle de réflexion égal à l'angle d'incidence. Concevons maintenant un œil situé en présence du même miroir. Parmi les rayons réfléchis suivant une infinité de directions différentes; il y en aura un certain nombre qui se dirigeront vers le trou de la prunelle par lequel ils passeront, et l'on pourra considérer leur ensemble comme un cône tronqué, dont la plus grande base serait égale au cercle de la prunelle, et dont la plus petite base reposerait sur la surface du miroir. Or, cette dernière base est commune au cône dont il s'agit, et à un autre cône composé de rayons envoyés par le point radieux; mais la réflexion n'a fait autre chose que plier les rayons, elle n'en a point dérangé les positions respectives: d'où il suit qu'ils arrivent à l'œil précisément dans le même ordre et avec le même degré de divergence que s'ils venaient immédiatement d'un point imaginaire situé à l'endroit

où concourraient les rayons qui forment le cône tronqué, s'ils étaient prolongés derrière le miroir. L'œil sera donc affecté comme si ces prolongemens étaient réels; car l'impression qu'il reçoit dépend uniquement de la direction du mouvement qu'ont les rayons à l'instant où ils arrivent; tout le reste se passe comme à son insu; et parce qu'il a l'habitude de rapporter les objets à quelque point de la ligne droite suivant laquelle les rayons viennent le frapper, il verra au sommet imaginaire du cône qui est entré par la prunelle, une image du point radieux qui produira en lui la même illusion que si ce point avait été transporté tout-à-coup derrière le miroir.

De plus, il est facile de concevoir que l'image sera placée au-delà du miroir, à la même distance où l'objet se trouve en deçà, puisque le cône imaginaire qui aboutit à cette image est égal et semblable au cône réel qui part de l'objet, et qu'il fait le même angle avec la surface du miroir.

On saisira encore mieux cette explication à l'aide de la *fig.* 86, où *AB* représente une ligne prise sur la surface d'un miroir plan, *R* le point radieux, *sRt* le cône de rayons qui, après avoir été réfléchi en *st*, se dirige vers l'œil situé en *o*, et lui fait voir l'image du point radieux à l'endroit *r* du concours imaginaire des rayons *ms*, *nt*, et de tous les rayons intermédiaires (1).

1262. Au lieu d'un simple point radieux, plaçons devant le miroir un objet étendu dans les trois dimensions; les résultats de la lumière réfléchie seront encore les mêmes que ceux de la lumière directe; c'est-à-dire, que l'œil verra derrière le miroir

(1) Si le miroir est métallique, on doit concevoir que, parmi les rayons partis du point *R*, les uns sont réfléchis au contact de l'air et de la surface *AB*, tandis que les autres, après avoir pénétré la petite épaisseur des molécules situées près de cette même surface, subissent sur leur base intérieure une réflexion qui les renvoie vers la base opposée, d'où ils repassent dans l'air environnant (1166). Il en résulte que l'œil reçoit deux images du point radieux, mais qui se confondent sensiblement à cause de la distance presque infiniment petite entre les deux surfaces réfléchissantes. A l'avenir nous ne distinguerons pas les deux réflexions dont nous venons de parler, et nous supposons, pour plus de simplicité, que l'image principale soit celle qui

une image égale et semblable à l'objet, et tellement située, que tous les points qui se correspondront sur l'un et l'autre seront aux mêmes distances au-delà et en deçà du miroir.

On jugera aisément que tous les gestes que fait un homme devant un miroir sont répétés en sens contraire par son image; et de là vient que quand nous voulons exécuter, à l'aide du miroir, des mouvemens qui exigent que nous nous voyions nous-mêmes, nous avons besoin d'un certain exercice pour éviter de nous laisser séduire par cette imitation trompeuse.

Nous ne pouvons voir dans un miroir qu'une partie de nous-mêmes, dont la hauteur soit double de celle du miroir; car la hauteur de l'image représente la base d'un triangle, dont les côtés sont ceux de l'angle visuel qui sous-tend cette hauteur; et, dans le même cas, la hauteur du miroir représente une ligne qui coupe le triangle parallèlement à sa base. Or, cette ligne divise chaque rayon visuel en deux parties égales, puisque le miroir est également éloigné de l'image et de l'œil; d'où il suit que la ligne dont il s'agit est égale à la moitié de la base du triangle. Donc la hauteur du miroir est aussi la moitié de celle de l'image, et en même temps de la partie de notre corps, laquelle est représentée de grandeur naturelle par cette image.

1263. Étant données la distance de l'œil au miroir, et les hauteurs du miroir et de l'objet, on peut facilement déterminer à quelle distance du miroir il faudrait placer l'objet pour l'y voir tout entier dans une position parallèle à celle du miroir; car, supposant la chose faite, et employant la même construction

provient des rayons réfléchis sur la surface du miroir, quoique ce soit réellement celle que produisent les rayons qui ont pénétré les molécules métalliques situées au même endroit.

Si le miroir est une glace étamée, il y a trois réflexions; la première au contact de la surface antérieure de la glace et de l'air, une seconde au contact de sa surface postérieure et de l'amalgame, et la troisième sur les bases intérieures des molécules métalliques. Mais les deux dernières réflexions sont censées coïncider de même sur les directions communes, et nous nous exprimerons comme s'il n'existait que celle qui a lieu à la surface de l'amalgame.

que ci-dessus (1262), on concevra que le miroir intercepte sur le triangle, dont la base est la hauteur de l'image, et dont les côtés sont ceux de l'angle visuel, un triangle plus petit, qui, ayant pour base la hauteur même du miroir, est semblable au grand triangle. On aura donc cette analogie : la base du petit triangle, ou la hauteur du miroir, est à la base du grand triangle, ou à la hauteur soit de l'image soit de l'objet, comme la hauteur du petit triangle, ou la distance de l'œil au miroir, est à la hauteur du grand triangle, ou à la distance de l'œil à l'image. Les trois premiers termes de la proportion étant connus, on trouvera facilement le quatrième, qui est égal à la distance de l'œil au miroir, plus à celle du miroir à l'image; d'où il suit qu'en retranchant du quatrième terme la distance de l'œil au miroir, qui est donnée, on aura la distance du miroir à l'image, la même que celle de l'objet au miroir. Par exemple, si la hauteur du miroir est de 1^{mètre}, 6, et celle de l'objet de 2^{mètres}, 4, et si la distance entre l'œil et le miroir est de 4 mètres, on trouvera 6 mètres pour la distance de l'œil à l'image, d'où ayant retranché 4 mètres, qui donnent la distance de l'œil au miroir, on aura 2 mètres pour la distance à laquelle il faudrait placer l'objet, à l'égard du miroir, pour l'y voir tout entier.

1264. Quand l'objet se meut devant le miroir, en s'avancan ou en reculant, l'image fait autant de chemin que lui derrière le miroir; mais si c'est le miroir même qui s'approche ou s'éloigne de l'objet, l'image fera une fois plus de chemin que lui. Supposons, par exemple, que le miroir recule d'un mètre devant l'objet; si l'image ne reculait que d'une égale quantité, sa distance à l'égard du miroir se trouverait encore la même, et ainsi elle serait moindre d'un mètre que celle de l'objet au miroir. Il faut donc que l'image parcoure deux mètres, pour qu'il y ait toujours de part et d'autre égalité de distance.

1265. Il résulte de ce qui vient d'être dit, que si l'objet est dans une position verticale, et que le miroir s'incline de 45^d à l'horizon, la position de l'image deviendra horizontale, puisqu'il faudra que chaque point de la hauteur de cette image, qui était d'abord située verticalement, ait décrit un arc de 90^d, ce qui

ne peut avoir lieu sans que la même image ne paraisse parallèle à l'horizon. On voit par là pourquoi les mouvemens des images qui se peignent dans l'eau sont beaucoup plus sensibles que les agitations du liquide.

1266. Une autre observation qui est relative aux images à l'égard desquelles l'eau fait l'office de miroir, c'est qu'en général elles sont faibles et comme simplement ébauchées, parce qu'elles ne sont produites que par la réflexion des rayons qui échappent à la puissance réfractive de l'eau (1045). Cependant, lorsque nous sommes sur le bord d'un lac tranquille, les rayons, qui, en partant des arbres et des édifices situés sur le bord opposé, sont réfléchis vers nos yeux par la surface de l'eau, étant très obliques, et par là même beaucoup plus abondans, nous font voir les images de ces objets éloignés beaucoup plus nettement que nous ne voyons celles des objets semblables qui sont près de nous sur le même bord.

1267. La réflexion partielle dont nous venons de parler a également lieu pour les miroirs de glace; et de là vient que ces miroirs donnent deux images distinctes de chaque objet, dont l'une est produite par les rayons qui se réfléchissent sur la surface antérieure de la glace, et l'autre par les rayons qui, après avoir pénétré l'épaisseur de la glace, se réfléchissent au contact de la surface postérieure et de l'amalgame métallique dont elle est enduite. Cette dernière image est beaucoup plus vive que l'autre, en sorte qu'elle attire seule l'attention dans les cas ordinaires. Mais si l'on présente la tête d'une épingle à une petite distance de la glace, et que l'on donne au rayon visuel un certain degré d'obliquité, on apercevra très sensiblement l'image réfléchie par la surface antérieure de la glace, et il y aura même telle inclinaison où elle sera vue plus distinctement que celle qui provient de la surface postérieure.

1268. D'après ce qui a été dit plus haut (1261), l'image dont nous venons de parler est vue derrière la surface antérieure de la glace à la même distance où le point radieux est situé en dedans. Il en est autrement de l'autre image à l'égard de laquelle les deux distances correspondantes sont nécessairement inégales,

C'est ce qu'il sera aisé de concevoir à l'aide de la construction que présente la figure 87. Soit f le point radieux, O le lieu de l'œil, et soient AB , DC les surfaces des deux glaces. Menons la ligne fp perpendiculaire sur ces surfaces. Les rayons incidens fk , fx qui, après s'être réfléchis sur la surface AB , parviendront à l'œil suivant des directions kl , zx ; lui feront voir l'image du point radieux au point de concours u de leurs prolongemens situé sur la perpendiculaire fp , de manière que Au sera égale à Δf , conformément à ce qui précède.

1269. Maintenant, parmi tous les autres cônes qui ont leurs sommets en f , il y en aura un qui sera situé de manière que les rayons fg , fh , qui coïncident avec deux apothèmes opposés pris sur sa surface (1), se réfracteront dans la glace, l'un de g en e , l'autre de h en n , ensuite se réfléchiront de e en x , et de n en m vers la surface supérieure, et enfin repasseront dans l'air, où ils subiront une nouvelle réfraction qui les enverra vers l'œil, suivant les directions xl , mz .

1270. Supposons à présent que le cône de rayons partis du point f aille se réfléchir immédiatement sur la surface postérieure DC , comme si l'autre n'existait pas. L'axe de ce cône prendra la direction ft , qui tombe entre les points e , n , en s'abaissant au-dessous de celle que suit l'axe du cône gfh , qui se rapporte à l'état réel des choses. Les mêmes positions relatives auront lieu à l'égard des rayons réfléchis provenus du cône auquel appartient l'axe ft , et des rayons xl , mz , qui tirent leur origine du cône gfh ; d'où l'on conclura que les deux réfractions qu'ont subies ceux dont ce cône est l'assemblage, tendent à relever la position de l'image principale au-dessus de celle qu'elle aurait dans le cas d'une réflexion immédiate sur la surface DC .

1271. Une autre différence entre les effets des rayons qui donnent les deux images, consiste en ce que ceux qui sortent de la glace suivant les directions xl , mz , et tous les autres compris entre eux, ne sont pas distribués dans le même ordre que s'ils

(1) On s'est borné ici à représenter ces rayons, parce qu'ils suffisent pour l'intelligence de l'explication du phénomène.

provenaient de la réflexion immédiate qu'auraient subie sur la surface AB ceux d'un cône qui serait parti du point f , en sorte que leur assemblage pût être considéré comme le prolongement de ce cône. Les directions de ces rayons dépendent de la réfraction de ceux qui ont passé de la glace dans l'air environnant. Or, l'effet de cette réfraction est de les disperser de manière qu'étant prolongés au-delà des points s , m , ils ne concourent plus en un point commun situé sur la ligne fp . Mais ce point se trouve remplacé par un autre, qui est comme le centre d'action de toutes les molécules lumineuses, comprises dans l'ensemble des rayons, et il se forme à l'endroit de ce centre un foyer virtuel qui donne naissance à l'image principale. Le point dont il s'agit est analogue à celui qu'on a nommé *point d'irradiation*, et dont nous donnerons la notion lorsque nous traiterons de la réfraction dans les milieux terminés par des surfaces planes.

1272. La petite dispersion que subissent les rayons réfractés à leur passage de la glace dans l'air environnant, tend à rapprocher de l'œil le foyer virtuel dont nous venons de parler, en sorte que l'image, au lieu de se trouver en p sur la perpendiculaire qui passe par le point radieux f , coïncide avec un point tel que y , situé en deçà de cette verticale. Il en résulte qu'elle paraît à la fois plus voisine de la surface inférieure de la glace, que si elle provenait immédiatement de la réflexion, et plus voisine de l'œil que l'autre image située au point u . C'est effectivement ce qu'on observe lorsqu'on examine attentivement les positions des deux images, surtout si l'on augmente convenablement l'obliquité du rayon visuel à l'égard de la glace.

Nous n'avons fait connaître que le premier degré et le plus sensible d'un phénomène dont l'étendue est en quelque sorte illimitée. Pour le prouver, nous allons reprendre l'explication précédente, en y ajoutant de nouveaux détails qui la rendront plus complète en elle-même, et dont nous nous servirons pour suivre à l'aide de la théorie, la marche progressive du phénomène au-delà du terme où s'arrête l'observation.

1273. Si l'on se sert, dans l'expérience que nous avons citée, d'une bougie allumée, et que l'on tienne toujours l'œil très incliné,

alors, au lieu de deux images de la flamme, on en verra cinq ou six placées à peu près sur une même ligne, les unes derrière les autres, et qui paraîtront toujours plus faibles à mesure qu'elles seront plus reculées derrière le miroir. Pour expliquer cet effet, supposons de nouveau que AB, DC (fig. 88) représentent les deux surfaces du miroir, que r soit un des points radieux qui composent la flamme de la bougie, et qu'il y ait un œil situé en o . Du point r il part un faisceau de rayons qui se dirige suivant re , et dont une partie em , qui est dans un accès de facile transmission (1151), pénètre la glace, tandis qu'une autre partie qui se trouve dans un accès de facile réflexion (*ibid.*), étant repoussée suivant eh , est perdue pour l'œil. La partie em , après s'être réfléchi au contact de la glace et de l'amalgame, arrive au point u ; et si les deux surfaces du miroir étaient parfaitement parallèles, cette partie se trouverait tout entière dans un accès de facile transmission (1167); mais comme on ne peut pas supposer que le parallélisme soit rigoureux dans tous les points correspondants des deux surfaces du miroir, il suffit qu'il y ait, dans le petit espace situé autour de u , et sur lequel tombe le faisceau de rayons mu , quelques points qui donnent une unité de plus ou de moins dans l'intervalle correspondant, pour qu'une partie des mêmes rayons soit réfléchi de nouveau suivant uv , tandis que l'autre, après s'être réfractée dans l'air, se dirigera suivant wo , et fera voir à l'œil une image du point radieux, située sur la direction ou . Un second faisceau rx se sous-divise de même, au point x , en deux parties, dont l'une xz pénètre la glace, et l'autre xo , qui est réfléchi à la surface antérieure, va rencontrer l'œil, et lui fait voir une seconde image du point radieux, située sur la direction ox , et qui est plus faible que la première lorsque les rayons qui en portent à l'œil l'impression, font, avec la surface d'un miroir, un angle un peu considérable, parce que dans ce cas le nombre de ceux qui subissent la réfraction est beaucoup plus grand que le nombre de ceux qui échappent à son action. Les deux images que l'on aperçoit lorsque l'on place une épingle à une petite distance de la glace, sont analogues à celles dont nous venons de parler; mais un troisième

faisceau suit la route *raglino*, de manière que chaque fois qu'il rencontre la surface antérieure de la glace, il s'y sous-divise de même en deux parties, dont l'une est réfractée et l'autre réfléchie; et telle est ici sa position, qu'après avoir subi deux réflexions en *g* et en *t*, au contact de la glace et de l'amalgame, il arrive à l'œil, et lui fait voir une troisième image située sur la direction *on* et moins sensible que les deux précédentes.

En considérant attentivement la figure, on se fera une idée des réfractions et des réflexions partielles qui ont lieu aux différens points d'immersion des rayons partis du point radieux. On conçoit qu'il doit y avoir d'autres faisceaux qui, après avoir subi dans l'intérieur de la glace trois réflexions, quatre réflexions, etc., iront peindre au fond de l'œil de nouvelles images du point radieux, mais qui s'affaibliront de plus en plus à mesure que les réflexions et réfractions qui ne concourent pas à l'effet auront dérobé successivement aux différens faisceaux une plus grande partie des rayons dont ils étaient primitivement composés. Or, comme à proportion que les rayons ont plus de détours à faire entre les deux surfaces de la glace, il est nécessaire que leur incidence ait lieu sur des points *e*, *a*, etc., situés toujours plus en arrière à l'égard de l'œil, et que leur émergence se fasse par des points *u*, *n*, situés toujours plus en avant, leur inclinaison sur la glace diminuera à proportion, et chaque faisceau partiel de rayons émergens fera voir l'image qui lui appartient à une plus grande distance derrière la glace, que l'image précédente.

1274. Les jugemens que nous portons sur les grandeurs et les distances des images que nous offre un miroir plan, sont les mêmes que si les objets n'avaient fait que changer de position, et se transporter aux endroits où concourent les rayons repoussés vers l'œil par la surface réfléchissante; et comme la vision dans les miroirs n'a qu'un champ d'une médiocre étendue, l'image d'un objet, à mesure qu'elle s'éloigne par une suite des mouvemens que fait l'objet lui-même, conserve sa grandeur dans nos idées, parce que nous tenons compte en même temps de l'augmentation de distance.

Du Miroir concave.

1276. Le miroir concave, qui va nous occuper maintenant, produit des effets très particuliers, dont quelques-uns semblent tenir du prestige. Sous un certain point de vue, l'image paraît droite et située derrière le miroir, mais très amplifiée, et en même temps plus éloignée que ne l'est l'objet en avant. Vient-on à éloigner par degrés cet objet du miroir, l'image disparaît d'abord, ou ne présente plus qu'un assemblage confus de lumière et de couleurs; mais tout-à-coup, à une plus grande distance, l'image, reprenant sa forme, se renverse, et sort du miroir en allant vers le spectateur; et suivant les mouvemens que fait l'objet, elle le touche ou se place à côté de lui : on dirait que l'objet lui-même a doublé son existence.

1277. Pour expliquer ces différens effets, concevons que bnm (fig. 89) représente une portion de la circonférence d'un des grands cercles d'un miroir concave sphérique, et que R soit un point radieux situé dans le plan de ce cercle, et pris au-dessus du centre c : tous les rayons incidens Rd , Rh , Rf , etc., qu'il faut supposer infiniment rapprochés, se réfléchiront du côté de l'axe Rn , de manière que les rayons réfléchis s'entre couperont, savoir dr et ht au point r , ht et fg au point t , fg et og au point g situé sur l'axe. Or, à mesure que les rayons incidens sont plus près de l'axe, les angles d'incidence de deux rayons voisins diffèrent moins entre eux, parce que les petits arcs qui avoisinent l'axe, tels que no , of , varient très peu dans leurs inclinaisons par rapport à l'axe; d'où il suit que les rayons incidens qui répondent à ces petits arcs font avec eux des angles à peu près égaux tandis qu'à une certaine distance, telle que d , les inclinaisons des petits arcs éprouvant des variations très sensibles, à cause que la courbe se relève rapidement en cet endroit, les angles d'incidence doivent varier eux-mêmes dans un grand rapport. Donc aussi les rayons réfléchis par les arcs voisins de l'axe feront entre eux des angles qui varieront très lentement, et par conséquent il y aura toujours un certain nombre de ces rayons qui se

couperont dans un très petit espace situé vers g , sur l'axe de la courbe. Nous avons déjà remarqué (1022) que cet espace considéré comme un point, est ce qu'on appelle le *foyer* des rayons partis de R . On voit ici une nouvelle application du principe, que les quantités qui approchent de leur limite varient par de très petites différences (1085), en sorte qu'il y a toujours un certain espace où l'on peut les supposer à peu près constantes, et où leurs actions se condensent en quelque sorte. Dans le cas présent, la limite est l'incidence qui a lieu dans la direction de l'axe cn .

Idee des Caustiques par Réflexion.

1278. Si l'on conçoit une courbe ayg , à l'égard de laquelle les rayons réfléchis soient autant de tangentes, cette courbe se nomme *caustique par réflexion*; et il est évident qu'il s'en formera de l'autre côté de l'axe une seconde gs semblable à la première, et qui la coupera au foyer g .

1279. Si le point radieux R s'écarte du point n , les caustiques se rapprocheront de la circonférence bnm ; car alors les angles d'incidence, et par une suite nécessaire les angles de réflexion, se trouvant diminués, chaque rayon réfléchi, tel que hr , se rejettera davantage du côté de l'arc hn , et par conséquent tous ces rayons s'entrecouperont dans des points moins éloignés de la circonférence bnm .

1280. Supposons que le point radieux soit à une distance infinie de n ; dans ce cas, le foyer g se trouvera précisément au milieu du rayon cn . Nous avons déterminé géométriquement (1021) la position de ce point que l'on appelle le *foyer des rayons parallèles*, parce qu'à une distance infinie, les rayons incidents qui avoisinent l'axe deviennent sensiblement parallèles.

Au contraire, à mesure que le point radieux s'approchera du centre, les caustiques s'écarteront de la circonférence bnm ; et lorsque le point radieux sera parvenu au centre, alors tous les rayons incidents se réfléchissant sur eux-mêmes, les caustiques se réduiront à un point unique qui se confondra avec le centre c .

1281. Si le point radieux descend ensuite au-dessous du centre, les caustiques s'élèveront au-dessus, de manière qu'elles formeront toujours des angles plus petits avec l'axe, aux endroits où elles s'entre couperont; et lorsque le point radieux sera arrivé au milieu du rayon cn , les rayons réfléchis les plus voisins de l'axe devenant parallèles (1021), les caustiques se sépareront et s'étendront à l'infini par leurs parties supérieures.

Le point radieux continuant de descendre, les rayons réfléchis se trouveront dans deux cas différens; car, d'une part, les angles d'incidence des rayons ro , ri , etc. (fig. 90), jusqu'à un certain terme, se faisant sur des arcs peu inclinés à l'axe, les rayons réfléchis analogues od , id , au lieu de s'entre couper, divergeront entre eux (1); d'où il suit que si on les prolonge en dessous de l'arc bnm , ce seront leurs prolongemens qui se couperont, en formant une nouvelle caustique aux endroits p , z , etc. D'une autre part, les angles d'incidence des rayons suivans rk , rx , etc., ayant lieu sur des arcs qui se relèvent rapidement, les rayons réfléchis correspondans se rejettent les uns vers les autres, et s'entre couperont de manière à former la caustique $\mu\omega\phi$ plus ou moins éloignée de celle qui lui correspond de l'autre côté de l'axe, au lieu que les caustiques produites en dessous de l'arc bnm auront en p un point d'intersection.

1282. La caustique $\mu\omega\phi$ descendra vers l'arc bnm , à mesure que le point r se rapprochera lui-même de cet arc; car alors les angles d'incidence des rayons rk , rx , etc., devenant toujours plus petits, les rayons réfléchis kd , xd , feront eux-mêmes avec l'arc km des angles qui iront toujours en diminuant, et par conséquent ils s'inclineront de plus en plus vers le bas, et leurs intersections se feront plus près de l'arc bnm . Ce que nous disons ici de cet arc peut également s'appliquer à tout autre qui ferait partie de la surface concave du miroir.

1283. Voici maintenant les conséquences qui résultent de toutes ces différentes positions, relativement aux images pro-

(1) Les rayons incidens sont à peu près dans le même cas, par rapport à l'arc ni , que s'ils tombaient sur un miroir plan.

dites par les miroirs concaves. Soit RAR' (*fig. 91*) un objet placé en présence d'un miroir concave, entre le centre c et le foyer des rayons parallèles. Si par les extrémités R, R' , on mène les axes $ncx, n'cx'$, les cônes de lumière qui partent de ces mêmes extrémités, suivant des directions très voisines de $Rn, R'n'$, se réfléchiront de manière que leurs foyers seront quelque part en r, r' , sur les parties des axes situées en dessus du centre c (1022); et comme ce que nous disons ici des extrémités de l'objet s'applique également à tous les autres points, l'ensemble de tous les foyers produira une image rar' de cet objet, qui sera renversée, par une suite de ce que les axes se croisent au centre. Si l'on suppose au contraire que rar' soit l'objet, RAR' deviendra l'image.

Mais ces sortes d'images sont perdues pour l'œil du spectateur. Car, dans le cas où RAR' est l'objet, cet œil ne pourrait voir l'image, qu'en se plaçant quelque part en o , dans l'espace situé au-dessus d'elle. Mais il serait nécessaire alors que les prolongemens $rx, r'x'$ des rayons qui passent par les extrémités de l'image, au lieu d'être divergens, convergeassent suivant des directions $ro, r'o$, qui allassent se croiser dans la prunelle. Et si l'on conçoit que rar' soit l'objet, on retombe dans la même difficulté; car il est évident que, dans aucun cas, le spectateur ne pourra placer sa tête entre l'objet et l'image, sans intercepter les rayons qui vont de l'un à l'autre.

1284. On peut cependant apercevoir l'image lorsqu'elle est située derrière l'objet, comme rr' . Mais il faut la recevoir sur un plan où cette image, se trouvant dans le même cas que si elle avait été peinte, devienne visible à l'aide des cônes de rayons que ces différens points envoient vers l'œil. Cette expérience réussit assez bien lorsque l'objet RAR' est une petite lame transparente de verre coloré, qui, donnant un passage aux rayons réfléchis, leur permet de parvenir en r, r' , où est situé un carton blanc sur lequel l'œil voit l'image, en se plaçant de côté, dans une position inférieure à celle du carton.

Images ordinaires.

1285. Avant d'expliquer la manière dont l'œil aperçoit immédiatement les images produites par le miroir concave, nous remarquerons que l'on peut raisonner de chacun des points r , t , etc. (*fig.* 89), à peu près comme du point g , situé sur l'axe, où il fait la fonction de foyer, par rapport aux rayons partis de R, qui forment de très petits angles avec le même axe; c'est-à-dire qu'il y a aussi autour du point t , par exemple, un très petit espace dans lequel se réunissent, après leur réflexion, les rayons qui se meuvent du point R vers le miroir, dans des directions très voisines de celles des rayons Rf et Ro, en sorte que chaque point de la caustique devient aussi comme un foyer d'un ordre inférieur, dans lequel les rayons concentrent assez leur activité, pour que l'ensemble de leurs prolongemens affecte l'œil d'une manière sensible.

1286. Cela posé, concevons d'abord que l'objet soit ce même point radieux R, que la figure représente placé au-dessus du centre. Dans toutes les positions où l'œil pourra voir l'image, il la rapportera à quelque point de l'une des caustiques ag et gs : par exemple, s'il est situé de manière que les rayons réfléchis ht , ft (*fig.* 92), après s'être croisés en t , aient le petit degré de divergence convenable relativement à la position de l'œil en O, cet œil verra l'image en t , c'est-à-dire entre le miroir et le centre c .

1287. Si le point R (*fig.* 89) est placé dans ce centre, alors l'image se confondra avec l'objet et sera comme absorbée par lui, de sorte qu'en quelque endroit que l'œil soit situé, il ne pourra apercevoir l'image. Par une raison semblable, si l'œil lui-même occupe le centre, l'image du point situé quelque part que ce soit sera invisible pour lui, et il ne pourra apercevoir que sa propre image, qui sera fort confuse, et couvrira toute la surface du miroir.

1288. Dans toutes les positions du point R entre le centre et le foyer des rayons parallèles, l'image paraîtra toujours devant le

miroir, mais elle sera au-dessus du centre, puisque alors les caustiques sont elle-mêmes plus élevées que ce centre.

1289. L'image sera très confuse lorsque le point R se trouvera précisément au foyer des rayons parallèles, parce que ces rayons seront mêlés avec ceux qui, plus éloignés de l'axe, convergeront vers l'œil, et auront ainsi des positions respectives contraires à celles qu'exige la netteté de la vision.

1290. Concevons enfin que le point r (fig. 90) descende au-dessous du foyer des rayons parallèles : alors, suivant les différentes positions de l'œil, l'image paraîtra ou par devant le miroir, ou par derrière, ou bien l'œil la verra en même temps des deux côtés de la surface du miroir ; car si cet organe ne peut recevoir que des rayons réfléchis, tels que $o\delta$, $i\epsilon$, qui divergent entre eux en partant du miroir, l'image sera vue seulement par derrière au point de concours z de ces rayons prolongés, et parce que les rayons $o\delta$, $i\epsilon$ divergent moins que les rayons incidents ro , ri dont ils proviennent, il est clair que op sera plus grand que or , et iz plus grand que ri ; d'où il suit que l'image paraîtra à une plus grande distance derrière le miroir que celle où est situé l'objet en avant.

Si, au contraire, l'œil n'est à portée que de recevoir des rayons convergens, tels que $l\omega$, $k\omega$, prolongés au-delà de leur point de concours ω , en sorte que le diamètre de la prunelle occupe la distance $e\lambda$, l'image paraîtra dans ce même point ω .

Enfin si l'œil est placé vers le point ϵ , de manière que la prunelle puisse donner en même temps accès à des rayons qui appartiennent aux deux caustiques $\mu\omega\phi$ et pz , il verra une image du point lumineux par devant le miroir, et une seconde par derrière : et comme chaque caustique a son analogue de l'autre côté de l'axe, il pourra arriver que le spectateur voie l'image quadruple avec les deux yeux (1).

1291. Au lieu d'un simple point radieux, supposons un objet qui ait quelque étendue, et ne considérons que les rayons qui

(1) Pour que ces différens effets aient lieu, il est nécessaire que le miroir forme une portion un peu considérable de la sphère à laquelle il appartient.

partent des extrémités de cet objet. Tout ce que nous avons dit du point r pourra s'appliquer à chacune de ces mêmes extrémités, ainsi qu'à tous les points intermédiaires.

Lorsque l'image sera vue derrière le miroir, elle paraîtra amplifiée et toujours droite; car alors le miroir concave ne diffère du miroir plan qu'en ce qu'il rend plus convergens vers l'œil les deux côtés de l'angle visuel qui sous-tend la grandeur de l'image, ce qui ne change rien à la situation de cette image, et en augmente seulement l'étendue. L'image, dans le même cas, paraîtra plus éloignée du miroir par derrière, que ne le sera l'objet en avant, puisqu'alors on pourra raisonner de chaque point de l'objet, comme nous avons fait (1290) par rapport à un seul point radieux. Enfin, on conçoit que l'image doit être déformée, puisque ses différens points ne peuvent avoir les mêmes positions respectives que les points correspondans de l'objet, comme cela a lieu quand on se sert d'un miroir plan.

1292. Une singularité des phénomènes que nous venons d'exposer, est qu'à mesure que l'objet s'approche du miroir, la distance apparente de l'image derrière le miroir augmente en même temps que la grandeur de cette image, en sorte qu'il arrive la même chose à cette image qu'à un objet dont les dimensions s'accroîtraient, tandis que cet objet s'éloignerait de nous; et ainsi, au lieu que, dans la vision ordinaire, nous jugeons toujours l'objet de la même grandeur, lorsqu'il recule devant nous, parce qu'en estimant l'augmentation de distance, nous rectifions l'erreur que la diminution de l'image au fond de l'œil pourrait occasionner dans le jugement que nous portons sur la grandeur réelle, ici, au contraire, où la distance et la grandeur de l'image croissent en même temps, la grandeur jugée doit aussi s'accroître dans un rapport considérable, puisque, en supposant que la distance apparente restât la même, il suffirait que l'image augmentât dans ses dimensions, pour nous la faire juger effectivement plus grande.

1293. Lorsque l'objet est au-dessus du foyer des rayons parallèles, auquel cas l'image est vue par devant le miroir, cette image est toujours renversée. Pour en concevoir la raison, il suffit

de considérer qu'en même temps que le point radieux R (*fig.* 89) descend vers le miroir, jusqu'au foyer des rayons parallèles, les caustiques s'écartent au contraire du miroir. Or, on peut considérer deux points radieux situés l'un au-dessus de l'autre, comme les extrémités antérieure et postérieure d'un même objet. Donc la caustique qui produira l'image de l'extrémité antérieure, ou de celle qui est plus près du miroir, sera à une plus grande distance de ce miroir que la caustique relative à l'extrémité postérieure: d'où il suit que l'image entière sera elle-même située en sens contraire de l'objet.

1294. Mais pour mieux saisir la raison de ce renversement, supposons que R (*fig.* 93) étant un point radieux, il y ait un œil situé en o , de manière que Rz soit l'axe du pinceau de rayons incidens, et zo celui du pinceau de rayons réfléchis, à l'aide desquels l'œil voit l'image r du point R sur la caustique ag . Concevons que l'axe Rz fasse un mouvement vers la droite, en tournant sur le centre c , pour prendre la position $R'n'$, la caustique suivra ce mouvement, sans changer de situation relativement à l'axe, et l'œil verra l'image du point R' à quelque endroit r' de cette caustique $a'g'$; c'est-à-dire à l'endroit où elle sera touchée par l'axe $z'o$ du pinceau de rayons réfléchis, provenant de l'incidence suivant $R'z'$; d'où il est aisé de juger que l'image du point radieux a fait un mouvement en sens contraire de celui de ce même point. Donc si l'on suppose que R, R' soient les deux extrémités d'une flèche, la position de l'image r' de cette flèche sera renversée; et l'on conçoit en même temps que ce renversement tient à ce que les axes Rz, R'z' des pinceaux de rayons incidens se croisent en un point x , avant de rencontrer le miroir, ce qui n'a pas lieu lorsque l'image est vue sans renversement.

1295. A l'égard du jugement que nous portons sur la grandeur de l'image, comme il dépend principalement du rapport entre les angles sous lesquels l'œil voit l'objet et l'image elle-même, il varie suivant les différentes distances qui séparent l'œil de l'un et de l'autre. En général, lorsque l'objet est plus voisin de l'œil que le lieu de l'image, il paraît plus grand qu'elle, et au con-

traire c'est la grandeur de l'image qui l'emporte, lorsque celle-ci est vue à une plus petite distance. Entre les deux effets inverses, il y a un terme où l'image paraît égale à l'objet.

1296. Supposons maintenant l'objet placé au-dessous du foyer des rayons parallèles, et l'œil dans une des positions où il voit l'image par devant le miroir : dans ce cas l'image sera droite; car nous avons vu qu'alors le mouvement des caustiques se faisait dans le même sens que celui du point radieux (1282), tandis que ce point s'approchait du miroir. Il en résulte que les parties antérieure et postérieure de l'image auront la même position, relativement au miroir, que les parties correspondantes de l'objet, et ainsi l'image entière sera tournée du même côté de l'objet.

Dans ce même cas, l'image sera plus grande que l'objet, parce que les axes des pinceaux de rayons incidens, qui partent des extrémités de l'objet, ne s'étant pas croisés avant d'arriver au miroir, cette circonstance les rend beaucoup plus susceptibles de converger après la réflexion, et augmente dans un rapport très sensible la grandeur de l'angle sous lequel l'image est aperçue.

1297. Cette image paraît sur le côté du miroir, comme il est facile d'en juger par la position de la caustique $\mu \omega \phi$ (fig. 90), et des autres qui concourent à la formation de cette image. Au contraire, on peut toujours se placer de manière à apercevoir, dans l'espace qui répond au milieu du miroir, les objets situés au-dessus du foyer des rayons parallèles, et ce sont aussi ces dernières images qui produisent l'illusion la plus séduisante. On peut tellement disposer le miroir et l'objet qui sera, par exemple, un bouquet de fleurs, que tous les deux étant masqués par quelque corps étranger, ceux qui entrent dans l'appartement n'aperçoivent que l'autre bouquet produit par la lumière réfléchie, et soient bientôt surpris de sa disparition, lorsqu'en s'avancant vers lui, ils s'écartent de la position sous laquelle il était visible pour eux.

*Usage des Miroirs concaves dans les Instrumens
d'Optique.*

1298. Les miroirs concaves sont employés dans la construction de plusieurs télescopes, dont nous donnerons une idée dans la suite. On préfère ceux de métal, qui n'offrent jamais qu'une seule image de l'objet, et on le fait communément au moyen de différens alliages, dont le choix et les rapports de quantité sont tels, que la surface du métal mélangé est blanche, et par là même disposée à réfléchir abondamment la lumière. Mais ces miroirs sont sujets à se ternir, et le cèdent de beaucoup, sous ce rapport, à ceux de platine, dont le poli est à l'abri des impressions de l'air. D'une autre part, on avait cru que le pouvoir réfléchissant de ces derniers l'emportait, toutes choses égales d'ailleurs, sur celui des miroirs ordinaires. Mais des expériences comparatives, faites avec beaucoup de soin par M. Arago, à l'Observatoire royal, ont prouvé qu'à cet égard le platine avait une infériorité sensible. Peut-être la différence provient-elle de ce qu'on est obligé d'allier d'abord le platine avec de l'arsenic, qui, tandis qu'ensuite on le fait évaporer, à l'aide de la chaleur, laisse le même métal criblé d'une infinité de pores qui occasionnent autant de petites pertes de lumière réfléchie. Depuis un certain temps, on est dans l'usage de substituer, pour la construction des télescopes, des verres achromatiques (1) aux miroirs de platine, et personne n'a obtenu un succès plus marqué dans l'exécution de ces verres que M. Lerebours, artiste si avantageusement connu par les nombreux services que les instrumens d'Optique sortis de ses mains ont rendus en France à l'Astronomie et à la Marine.

Pour que les miroirs métalliques remplissent le but de l'observateur, il faut que leur forme, qui est une portion de sphère,

(1) Nous donnerons dans la suite la théorie de ces sortes de verres.

soit travaillée avec une grande précision, et que leur poli soit très parfait, sans quoi ils rendent les images confuses en absorbant une grande quantité de rayons. La difficulté de réunir ces conditions avait fait penser à Newton que les miroirs de verre étamés méritaient la préférence lorsqu'ils étaient construits avec soin (1); mais le succès n'a pas répondu à l'attente de ce célèbre géomètre, et l'on ne se sert guère aujourd'hui que de miroirs métalliques ou de verre pour les instrumens dans lesquels l'effet de la réflexion se combine avec celui de la réfraction.

Usage des mêmes Miroirs pour exciter la Combustion.

1299. Lorsque les rayons du soleil qui arrivent à nous dans des directions peu différentes du parallélisme tombent sur la surface d'un miroir concave, de manière que celui qui part du centre de l'astre se confond avec l'axe de ce miroir, la réflexion les fait coïncider à peu près au foyer des rayons parallèles; là leurs actions concentrées excitent dans les corps qui s'y trouvent exposés une chaleur assez puissante pour enflammer ces corps, les fondre, ou les vitrifier, suivant les différentes natures des mêmes corps. C'est ce qui a fait donner à cette espèce de miroir le nom de *miroir ardent*.

1300. Un corps enflammé, situé en présence d'un miroir concave, envoie aussi vers la surface de ce miroir des rayons qui, après leur réflexion, se réunissent en un foyer commun; mais outre qu'ils ont par eux-mêmes beaucoup moins d'énergie que les rayons solaires, il résulte, de leur divergence sensible, que ceux qui tombent très près de l'axe, sont beaucoup moins condensés dans un espace donné, ce qui ôte au foyer une grande partie de son activité. On peut déterminer leur incidence à se faire suivant des directions parallèles, en employant

(1) *Optice Lucis*, lib. I, pars 1, propos. 7.

deux miroirs, dont le diamètre soit d'environ 40 centimètres (15 pouces) et dont telle soit la courbure, que la distance entre le foyer et la surface réfléchissante se trouve aussi à peu près de 40 centimètres. On élève ces miroirs verticalement, de manière que leurs concavités se regardent, et on peut les éloigner l'un de l'autre de 10 mètres (30 pieds) ou davantage. On place au foyer de l'un un charbon allumé, dont on entretient l'ardeur par un souffle bien égal, dirigé du côté qui est situé vers le miroir. Les rayons qui tombent sur ce miroir devenant parallèles après leur réflexion, rencontrent sous ces mêmes directions la surface de l'autre miroir, où une seconde réflexion les fait concourir au foyer des rayons parallèles, en sorte qu'ils deviennent assez actifs pour allumer un morceau d'amadou, ou des grains de poudre à canon, que l'on présente à ce foyer.

1301. Le Père Kirker a imaginé le premier de substituer à un miroir concave plusieurs miroirs plans, tellement disposés, que les rayons du soleil réfléchis sur leurs surfaces convergeassent vers un même point. Il n'employa que cinq de ces miroirs, en les plaçant de manière que le concours des rayons se faisait à plus de 32^m, 5 (100 pieds) de distance, et il trouva que la chaleur y était presque insupportable. « Or, ajoute ce physicien, si cinq miroirs produisent un si grand effet, que ne feront pas cent ou mille miroirs arrangés de la même manière ? la chaleur qu'ils exciteront sera si violente, qu'elle brûlera tout, et réduira tout en cendres (1) ».

1302. Plusieurs physiciens ont entrepris depuis des expériences dirigées vers le même but ; mais l'espèce de miroir polygone, exécuté au Jardin des Plantes en 1747 d'après l'idée qu'en avait conçue le célèbre Buffon, efface tout ce que l'on avait tenté jusqu'alors en ce genre, soit par la grandeur des effets, soit par l'ordonnance ingénieuse de la construction (2). Ce miroir était

(1) Kirker, *Ars magna Lucis et Umbræ*, lib. X, p. 888.

(2) Buffon, Histoire Naturelle, édition in-12, 1774 ; Supplément, t. II, p. 141 et suiv.

composé de cent soixante-huit glaces étamées, susceptibles de se mouvoir en tout sens, de manière que l'on était le maître de les fixer à différens degrés d'inclinaison; il en résultait que l'on pouvait donner à l'ensemble une forme plus ou moins concave, et porter le foyer à différentes distances. Ce miroir brûlait le bois à 65 mètres (200 pieds), fondait les métaux à $14^m,5$ (45 pieds), et son auteur était persuadé qu'en multipliant les glaces on pourrait produire les mêmes effets à une distance beaucoup plus grande.

1303. On lit, dans les anciennes histoires, qu'Archimède mit le feu aux vaisseaux des Romains, en se servant de miroirs ardens. Plusieurs physiciens ont traité ce récit de fabuleux, d'après le peu d'apparence que le savant Syracusain eût pu construire des miroirs concaves d'une assez grande étendue pour que leurs foyers parvinssent à la distance où devait se trouver la flotte romaine. Mais le fait n'a plus rien d'impossible, si l'on suppose qu'Archimède ait employé les actions combinées de plusieurs miroirs plans; et ce célèbre géomètre avait donné d'ailleurs des preuves plus que suffisantes, qu'il était capable de concevoir une pareille idée.

Du Miroir convexe.

1304. Les effets du miroir convexe sont beaucoup moins variés que ceux du miroir concave; ils se réduisent à faire voir l'image derrière le miroir plus petite que l'objet et plus voisine de la surface réfléchissante. C'est l'inverse de ce qui a lieu, lorsque l'image est vue aussi derrière le miroir concave; mais, dans le même cas, les deux miroirs s'accordent à présenter l'image dans une position droite.

Soit bnm (fig. 94) une partie de la circonférence d'un des grands cercles du miroir convexe, et R un point radieux placé dans le plan de ce cercle. Si l'on suppose que les rayons réfléchis qui appartiennent aux rayons incidens Rn , Ro , Rf , etc., se prolongent derrière la surface du miroir jusqu'à ce que chacun soit coupé par le suivant, les intersections g , r , p , etc. de ces rayons produiront une caustique gs située du même côté de l'axe, et il

s'en formera une seconde ga toute semblable du côté opposé, en sorte que les deux caustiques se couperont dans un point g situé sur l'axe.

A mesure que le point radieux s'éloignera ou s'approchera de l'arc bnm , les caustiques elles-mêmes s'en éloigneront ou s'en approcheront par des mouvemens contraires ; et si le point radieux est supposé à une distance infinie, le point g où se coupent les caustiques sera situé au milieu du rayon cn ; d'où il suit que c'est à ce même endroit que se trouve le foyer des rayons parallèles.

1305. Si l'observateur a son œil situé dans le plan de l'arc bnm , cet œil verra l'image du point radieux dans quelque point de l'une ou l'autre caustique : par exemple, si telle est la position de l'œil, que les rayons Rf , Rh , après s'être réfléchis suivant les lignes fx , hu , parviennent à la prunelle, l'image sera vue au point de concours p de ces mêmes lignes prolongées derrière le miroir.

1306. L'image paraîtra toujours plus près du miroir que l'objet ; car, à cause de la propriété qu'a le miroir convexe d'occasionner en général une tendance des rayons vers la divergence (1024), il est évident que les rayons réfléchis divergeront plus entre eux que les rayons incidens, ce qui rapprochera leur point de concours imaginaire de la surface du miroir. On peut tirer la même conséquence de ce que le point g dans lequel se coupent les caustiques, et qui présente l'image du point radieux, lorsque l'œil est placé sur l'axe cR , ne parcourt que la moitié du rayon nc tandis que le point radieux s'éloigne jusqu'à une distance infinie du miroir.

Si nous substituons à un simple point un objet d'une certaine étendue, son image sera vue de même derrière le miroir, à une moindre distance que celle où est placé l'objet par devant : en même temps elle paraîtra droite ; car, supposons que l'axe cR , en restant fixe par son extrémité c , fasse un mouvement qui ait lieu, par exemple, de gauche à droite, en entraînant avec lui le point radieux R , il est évident que le mouvement de la caustique gs se fera dans le même sens : donc, si l'on suppose un objet

dont les deux extrémités correspondent, l'une au point R, tel qu'on le voit sur la figure, l'autre à l'endroit où le même point a été transporté par le mouvement de l'axe, l'image de cet objet sera située derrière le miroir, dans une position semblable à celle que l'objet occupe lui-même par devant; et ainsi le miroir, à cet égard, ne différera pas du miroir plan, qui représente les objets dans leur véritable situation.

1307. Enfin l'image comparée à l'objet paraîtra rétrécie dans toutes ses dimensions; car l'effet de la réflexion sur les surfaces convexes étant de diminuer la convergence des rayons, il en résulte que les côtés de l'angle visuel sous lequel l'œil aperçoit l'image, convergent moins que ceux de l'angle sous lequel il verrait l'objet à la même distance; et ainsi l'ouverture de l'angle et en même temps la grandeur apparente de l'objet doivent être diminuées.

Ici se présente une observation qui est en quelque sorte l'inverse de celle que nous avons faite en parlant des miroirs concaves (1294). La distance et la grandeur apparente ayant diminué à la fois, la grandeur jugée doit être de même plus petite.

Miroirs cylindriques, ou coniques.

1308. On fait aussi des miroirs en forme de cylindre ou de cône, dont les effets sont piquans pour la curiosité. On place leur base au milieu d'un dessin qui ne présente que des traits irréguliers, des espèces d'énigmes pour l'œil, dont le mot est dans le miroir même, où l'on aperçoit la figure régulière de quelque objet familier. La Géométrie fournit des règles pour combiner les traits du dessin avec la courbure du miroir, de manière qu'il en résulte l'effet qu'on se propose. Comme le miroir représente les objets autres qu'ils ne sont, on profite de son infidélité même pour lui donner une image vicieuse à rectifier.

Des Effets de la Lumière réfractée, relativement à la Vision.

1309. Les progrès de la Dioptrique ou de la science des rayons réfractés, dont nous allons maintenant nous occuper, ont été beaucoup plus lents que ceux de la Catoptrique, qui a pour objet la lumière réfléchie. La loi fondamentale de cette dernière science, qui consiste dans l'égalité des angles d'incidence et de réflexion, devait, par sa seule simplicité, se présenter plus aisément; et il y a tout lieu de présumer qu'Euclide, qui l'a appliquée aux effets des miroirs, dans son *Traité d'Optique*, n'avait fait que profiter des connaissances établies depuis longtemps dans l'école Platonicienne, dont il suivait la doctrine. La loi à laquelle est soumise la réfraction de la lumière était encore inconnue lorsque, vers la fin du treizième siècle, un Florentin, nommé *Salvino degl' Armati*, inventa les lunettes à lire, découverte admirable, à l'aide de laquelle l'œil, plus prompt à vieillir que les autres organes, retrouve tout-à-coup des années qui semblaient perdus sans retour. On attribue la première ébauche du télescope aux enfans d'un lunettier de Middelbourg en Zélande, qui, s'étant avisés de disposer entre leurs doigts deux verres de lunette l'un derrière l'autre, firent remarquer à leur père que les objets vus par l'intermède de ces verres paraissaient beaucoup plus gros qu'à la vue simple. Le lunettier, frappé de cet effet singulier, imita, par une construction plus commode, le modèle que ses enfans venaient de lui présenter. D'autres artistes de la même ville s'appliquèrent à perfectionner cet instrument, qui porta d'abord le nom de *Lunette de Hollande*.

1310. Mais pour tirer du télescope tous les avantages qu'il semblait promettre, il fallait connaître la loi de la réfraction. Képler la chercha inutilement, mais il trouva, par l'observation, une espèce de règle qui était au moins un à peu près, et qui lui apprit que l'on pouvait substituer un oculaire convexe à l'oculaire concave que l'on avait employé jusqu'alors. Scheiner

et Rheita enchérèrent sur cette amélioration, et le dernier parvint à une combinaison de verres lenticulaires, qui réunissait divers avantages à celui de redresser les objets que l'on voyait renversés avec un seul oculaire.

Enfin Snellius, géomètre hollandais, détermina la loi fondamentale de la Dioptrique, qui, d'après la manière dont il l'envisageait, consiste en ce que les cosécantes des angles d'incidence et de réfraction sont en rapport constant. Descartes substitua à ce rapport celui des sinus dont il est l'inverse, et qui présente la même loi sous une forme plus simple; muni de ce résultat, il fit de savantes recherches sur les courbes les plus propres à concentrer dans un même point les rayons devenus convergens par la réfraction. Mais la difficulté d'exécuter des verres dont la forme fût assujettie aux lois de ces courbes, a fait revenir à la figure sphérique, en sorte que la science a plus gagné que l'art aux travaux de Descartes sur la Dioptrique. Barrow, auquel avait été réservée la gloire de servir de maître à Newton, si cependant Newton a eu besoin de maître, a publié sur la même science un ouvrage estimé, dans lequel il éclaircit plusieurs points qui n'avaient encore été traités qu'imparfaitement (1). La pratique, trop négligée jusqu'alors, fit de grands progrès entre les mains d'Huyghens, et l'art de tailler les verres lui doit une grande partie de sa perfection.

1312. Newton, qui avait expliqué si heureusement la loi de la réfraction par l'attraction du milieu réfringent, a aussi développé les principes de la Dioptrique dans un ouvrage particulier (2); et a imaginé une espèce de télescope qui porte son nom, dans lequel il combinait les effets des verres convexes avec ceux du miroir concave. Mais il n'avait proposé cette construction que parce qu'il regardait comme impossible de détruire un défaut frappant qu'ont les télescopes et les lunettes ordinaires, qui est de décomposer la lumière comme le fait le prisme, et de

(1) *Lectiones Opticæ et Geometricæ*; Londini, 1674.

(2) Opusc. VIII, *Lectiones Opticæ*.

produire ces franges de fausses couleurs dont les objets paraissent bordés, lorsqu'on les regarde au travers des instrumens dont il s'agit. Newton fut conduit à cette conséquence par une autre qu'il se pressa trop de tirer d'une expérience dont nous parlerons dans la suite, expérience simple et facile à faire, dont le véritable résultat échappa à son attention. Pendant près d'un demi-siècle on ne pensa point à la répéter, tant il était difficile de démêler une erreur perdue dans une foule de vérités importantes. Enfin, une expérience faite par Dollond, célèbre opticien anglais, dans les circonstances convenables pour la rendre décisive, et qui offrait un résultat opposé à celui de Newton, donna naissance aux lunettes achromatiques, dont nous ferons l'histoire dans un plus grand détail, lorsque nous y serons conduits par la suite des matières que nous avons à traiter; et cette découverte ouvrit une nouvelle carrière au génie des plus illustres géomètres, et aux talens des plus habiles artistes.

Nous parlerons successivement des effets de la réfraction dans les milieux terminés par des faces planes, et dans ceux dont les faces sont curvilignes; et, après avoir considéré les effets des verres simples, nous exposerons ceux des instrumens dans lesquels on combine entre eux, soit des verres courbes et des miroirs, soit seulement des verres sans miroirs.

De la Réfraction simple dans les Milieux terminés par des Faces planes.

1313. Soit a (*fig. 95*) un point radieux pris dans un milieu quelconque terminé par la surface ef , et qui envoie vers cette surface des rayons dans une infinité de directions différentes.

Supposons que an représente un de ces rayons, et que nt soit le rayon réfracté, lequel se rapprochera de la perpendiculaire zx , si le milieu situé au-dessus de ef est plus dense que celui qui est en dessous, ou s'en écartera (*fig. 96*) dans le cas contraire.

Eu point a menons ab perpendiculaire sur ef , et prenons

entre a et b , ou du côté opposé (*fig. 95*) un point z tellement situé, que zb soit à ab comme le sinus d'incidence est au sinus de réfraction, relativement au milieu situé au-dessus de ef . On prouve par la Géométrie, que si l'on prolonge un rayon réfracté quelconque zn , jusqu'à ce qu'il rencontre l'axe ab de la radiation, le point k , où il coupera cet axe, sera toujours situé en deçà (*fig. 96*), ou au-delà (*fig. 95*) du point z , en sorte que ce dernier point sera la limite de tous les rayons réfractés provenus du point a (1).

Concevons que le rayon incident an , en restant fixe par son extrémité a , se rapproche de l'axe bk par son extrémité n . L'angle d'incidence ban étant diminué, l'angle de réfraction znt le sera pareillement; de plus, le point k se sera rapproché du point z . Concluons de là que quand les rayons qui, en partant du point a , tombent sur la surface ef , sont à une petite distance de l'axe, les rayons réfractés forment à peu près à l'endroit du point z , une espèce de foyer imaginaire; car, d'après le principe que toute quantité qui approche de sa limite varie par des degrés extrêmement petits (1085), les rayons qui ont leur concours près du point z doivent être plus denses que partout ailleurs, ou abonder davantage dans un espace donné (2).

1314. Supposons que différents rayons an , ai , etc. (*fig. 97*),

(1) Dans le triangle ank , l'angle a est le supplément de l'angle d'incidence ban (*fig. 95*) ou cet angle lui-même (*fig. 96*), et l'angle k est égal à l'angle de réfraction znt (*fig. 95*) ou à son supplément (*fig. 96*). Donc si nous designons le sinus d'incidence par i , et le sinus de réfraction par r , nous aurons $nk : an :: i : r$.

Ayant mené par le point z la ligne gh parallèle à ef , prolongeons, s'il est nécessaire, na jusqu'à la rencontre de gh ; nous aurons, à cause des triangles semblables, nab , saz , $as : an :: az : ab$. Donc (*fig. 95*) $as + an : an :: az + ab : ab$; et (*fig. 96*) $an - as : an :: ab - az : ab$; donc $ns : an :: zb : ab :: i : r$; mais nous avons eu $nk : an :: i : r$. Donc $nk = ns$. Or, à cause de l'angle obtus nzs (*fig. 95*), ou de l'angle aigu nzs (*fig. 96*), on a nz plus petite que ns ou nk (*fig. 95*), et nz plus grande que ns ou nk (*fig. 96*). Donc tous les rayons réfractés tomberont au-delà de z (*fig. 95*), ou en deçà (*fig. 96*).

(2) Barrow, *Lect. Opticæ et Geometr.*, p. 42, NN. 12, 13, 14, etc.

partis du point a , tombent en même temps sur la surface ef , à des distances sensibles du point b , et du même côté de l'axe. Leurs prolongemens en-dessous de ef iront couper cet axe successivement en des points qui s'éloigneront du point z , d'où il suit qu'ils s'entre couperont en divers points d, c, m , etc., situés à la gauche de l'axe (*fig. 97*), ou à la droite (*fig. 98*).

Si l'on considère les rayons an, ai comme les rayons extrêmes; parmi tous ceux qui, en partant du point a , tombent sur le petit espace in situé dans le plan abf , leur point de concours imaginaire sera au point d , que l'on détermine à l'aide du calcul. Mais il y a d'autres rayons partis du même point a qui tombent sur d'autres plans, et qui se dispersent par l'effet de la réfraction, de manière que tous ceux qui appartiennent à un petit cône dont la base aurait un diamètre égal à in , ont leurs points de concours comme disséminés dans un petit espace voisin du point d , en sorte qu'il n'y a point alors de foyer proprement dit (1). La détermination du point qui est comme le centre d'action de tous ces rayons, de manière qu'ils peuvent être censés partir de ce point comme d'un point radieux, est un problème très délicat qui a fort exercé les physiciens, et qu'ils ont résolu de différentes manières. Newton place ce point à peu près au milieu de la distance entre le point de concours d des rayons extrêmes, et le point p de l'axe (2).

Ce qui précède nous fournit l'explication de différens phénomènes dus à la réfraction des milieux séparés par des surfaces planes. Nous nous bornerons au cas où la lumière passe d'un milieu plus dense dans un plus rare.

1315. Si l'on place un petit objet dans l'eau, et que l'œil soit situé verticalement au-dessus de cet objet, il en verra l'image à une distance de la surface de l'eau, qui ne sera que les trois quarts de la distance réelle; car la première distance est à la seconde, d'après ce qui a été dit (1313), comme le sinus d'incidence

(1) Sgravesande, t. II, p. 766, n° 2701.

(2) Opusc. XVIII, *Lectiones Opticæ*, *Scholium ad propos. 8.*

est au sinus de réfraction, c'est-à-dire, comme 3 est à 4, quand la lumière passe de l'eau dans l'air.

En général, la réfraction des rayons qui passent dans l'air en sortant d'un milieu plus dense, dont la surface située du côté de l'œil est plane, fait voir l'image plus rapprochée de cette surface; car si l'on suppose un point radieux situé en a (*fig. 98*), et que ul représente le diamètre de la prunelle, le point de concours imaginaire d des rayons réfractés tn , li , sera toujours situé dans l'intérieur du triangle ban , d'où il suit qu'il sera toujours plus près de l'œil que le point a .

1316. Placez un corps au fond d'un bassin vide, et que plusieurs personnes s'écartent du bassin jusqu'à ce que son bord leur cache le corps dont il s'agit : versez ensuite de l'eau dans le bassin ; à l'instant le corps sera aperçu par tous les observateurs, dont on suppose que l'œil est resté fixe dans sa position.

Il suit encore de là qu'un bassin rempli d'eau paraît moins profond que quand il était vide, parce que tous les points de la surface du fond se rapprochent de l'œil.

1317. Si l'objet a une certaine longueur, telle que ab (*fig. 99*), et qu'il soit situé parallèlement à la surface du milieu réfringent, sa longueur paraîtra augmentée; car alors l'angle visuel aob , à l'aide duquel l'œil apercevrait l'objet ab à la vue simple, aura ses côtés compris entre ceux de l'angle mon sous lequel l'œil voit l'image de cet objet.

1318. Un bâton que l'on plonge en partie dans l'eau, sous une direction oblique à la surface de ce liquide, paraît rompu à l'endroit de son immersion, en sorte que l'image de la partie plongée se relève au-dessus de cette même partie. Car soit ef (*fig. 100*) la surface de l'eau, ha le bâton, et o la position de l'œil. Parmi tous les rayons que le point a , considéré comme point radieux, envoie vers la surface ef , il y en aura un tel que an , qui, après sa réfraction au point n , se dirigera vers l'œil, et lui fera voir l'image du point a quelque part en x ; d'où il suit que la partie plongée ga aura pour image une ligne gx qui fera paraître le bâton brisé au point g .

Concevons que le bâton, en restant fixe par l'extrémité a

se relève par l'extrémité opposée, jusqu'à ce qu'il coïncide avec la ligne ab perpendiculaire sur ef ; et supposons que l'œil soit toujours situé en o ; la grandeur apparente de la partie plongée sera égale à xb , beaucoup plus courte que la grandeur réelle ab . En général, un objet plongé verticalement dans l'eau paraît toujours raccourci, et cela d'autant plus que son extrémité supérieure se rapproche davantage de la surface de l'eau; en sorte que le *minimum* a lieu, pour une même position de l'œil, lorsque l'extrémité supérieure de l'objet est de niveau avec le liquide.

Les choses étant dans ce dernier état, si l'on retire de l'eau l'objet dont il s'agit, et qu'il soit d'une forme déliée, on le verra, avec une espèce de surprise, s'allonger comme par un développement rapide de toutes ses parties.

A mesure que l'objet sort de l'eau, on aperçoit, à l'aide de la réflexion, l'image de sa partie extérieure, et cette image est d'abord plus courte que celle de la partie intérieure, vue par réfraction; mais comme cette dernière diminue, tandis que l'autre augmente, il y a un terme où elles sont de la même longueur. Or, l'image vue par réflexion est égale, dans tous les instans, à la partie de l'objet située hors de l'eau, ce liquide faisant ici l'office d'un miroir plan (1262). Supposons qu'au moment où les deux images ont la même longueur, on mesure la partie située hors de l'eau, et qu'ayant ensuite retiré tout-à-fait l'objet, on mesure aussi la partie qui était plongée dans l'eau. On pourra toujours déterminer, d'après le rapport entre l'une et l'autre, la quantité dont la partie plongée dans l'eau paraissait, par l'effet de la réfraction, plus petite qu'elle ne l'était réellement. Par exemple, si la partie située hors de l'eau est la moitié de la partie plongée, on en conclura que la longueur apparente de cette dernière partie était aussi la moitié de sa longueur réelle.

De la double Réfraction.

1319. Lorsqu'un faisceau de rayons traverse une masse d'eau ou de verre, il reste simple, et c'est pour cela que si l'on regarde les objets à travers deux faces opposées de ces mêmes milieux, on ne voit qu'une seule image de chacun; mais un grand nombre de substances minérales ont la propriété remarquable de déterminer le faisceau de lumière qui les pénètre à se sous-diviser en deux parties qui suivent deux routes différentes. On dit alors que la réfraction est double; et si l'on regarde les objets à travers deux faces opposées de l'un de ces corps, leurs images paraissent doubles, posé certaines circonstances que nous ferons connaître, dans la suite. Une des parties du faisceau est soumise à la loi de la réfraction ordinaire; l'autre suit une loi particulière qui dépend du phénomène.

1320. Nous devons la connaissance du phénomène de la double réfraction (1021) à Erasme Bartholin, qui, ayant regardé l'image d'une ligne à travers un rhomboïde transparent de chaux carbonatée (spath calcaire), observa que cette image était double (1). Ce rhomboïde venait de l'Islande, où l'on en trouve qui sont d'une limpidité parfaite. Bartholin fut extrêmement surpris de l'observation dont nous venons de parler, et enchérissant, par l'imagination, sur ce qu'elle avait par elle-même de merveilleux, il disait que ce phénomène, enseveli dans l'Islande, où abondaient les corps destinés à le produire, offrait aux naturalistes la preuve d'une vérité jusqu'alors ignorée, savoir, que le froid des climats septentrionaux, loin d'affaiblir les rayons de la lumière, leur donnait au contraire un nouveau degré d'énergie. La vérité est que tous les climats fournissent de la chaux carbonatée transparente susceptible de doubler aussi les images des objets, et que beaucoup d'autres substances que nous citerons dans la suite partagent cette même propriété.

1321. L'explication de l'effet singulier dont il s'agit ici a exercé

(1) *Erasmii Bartholini, Experim. cristalli Islandici disdiacastici; Hafniæ, 1770; dedic. ad Regem Frider. III.*

la sagacité de plusieurs savans distingués, à la tête desquels paraissent Huygens et Newton; et ce qui prouve la difficulté du sujet, c'est la variété des opinions entre tous ces savans, dont chacun, sans s'arrêter à ce qui avait été fait par les autres, essayait de se frayer une route particulière; en sorte qu'au milieu de ce conflit d'autorités et de résultats sur un sujet qui a été retourné de tant de manières différentes, il semblait également difficile, soit de choisir dans ce qui avait été dit, soit de dire quelque chose de nouveau. Cependant, il n'y avait point à choisir, si on y eût regardé de près; et contre l'ordinaire de ce qui arrive, surtout quand il s'agit d'une matière délicate, les premières recherches étaient celles qui avaient conduit directement au but. La véritable loi s'était montrée au génie d'Huygens; mais on l'avait rejetée sans examen, parce qu'elle se trouvait liée, dans la construction à l'aide de laquelle cet illustre physicien l'avait représentée, au système des ondulations qui était alors comme éclipsé par celui de l'émission, et qui, de plus, avait contre lui, dans le cas présent, la supposition que la double réfraction était produite par des ondes de deux figures différentes. Ainsi les physiciens poursuivirent leurs recherches, sans songer qu'ils s'occupaient d'une chose faite, et il a fallu, pour ainsi dire, une nouvelle découverte, dont la gloire est partagée entre Wollaston et Malus, pour la faire sortir du système dans lequel elle était restée comme enfouie depuis près d'un siècle. Nous reviendrons sur cet objet, après que nous aurons décrit les principales circonstances du phénomène.

Marche de la Lumière à travers un seul Rhomboïde.

1322. Concevons que *eb* (*fig.* 101) représente un rhomboïde de chaux carbonatée, dans lequel *a* et *n* soient les deux grands angles solides (1), ou ceux qui sont composés de trois angles

(1) La position que l'on a donnée ici au rhomboïde, pour la facilité de la démonstration fait paraître ces angles aigus, par une suite des règles de la projection.

plans obtus égaux entre eux (1); menons les petites diagonales ae , bn , des deux faces $hade$, $gben$, que nous regarderons comme les bases du rhomboïde, en les supposant situées horizontalement. Le quadrilatère $aenb$ (fig. 101 et 102), formé par les petites diagonales des bases et par les arêtes intermédiaires ab , en , sera ce que nous appelons la section principale du rhomboïde.

1323. Soit st (fig. 101 et 102) un rayon de lumière qui tombe perpendiculairement sur la base supérieure du rhomboïde. Il se divisera au point d'immersion en deux parties, dont l'une tl , sera sur le prolongement du rayon incident, comme dans le cas ordinaire, et l'autre tf s'écartera de la précédente, en se rejetant vers le petit angle solide b , c'est-à-dire qu'il y aura une double réfraction du rayon de lumière.

1324. Nous appellerons désormais le rayon tl , *rayon ordinaire*; le rayon tf , *rayon extraordinaire*; et la distance ft de l'un à l'autre, prise sur la base inférieure du rhomboïde, *distance radiale*.

1325. Si le rayon incident st tombe obliquement sur la surface du rhomboïde, il se divisera toujours en deux parties, dont l'une, qui sera le rayon ordinaire, se réfractera en se rapprochant de la perpendiculaire au point d'immersion, suivant une loi analogue à celle des réfractations communes, et qui est telle, que le sinus de réfraction est à celui d'incidence constamment comme 3 à 5; l'autre partie, qui sera le rayon extraordinaire, s'écartera toujours de la précédente, pour se rapprocher de l'angle b , quelle que soit la direction du rayon incident. Nous verrons dans la suite quelle est la loi de cette seconde réfraction.

1326. Si le rayon incident est dans le plan de la section principale $aenb$, le rayon ordinaire et le rayon extraordinaire seront aussi l'un et l'autre dans ce même plan : toutes les théories sont d'accord sur ce résultat.

(1) La valeur de chacun de ces angles est de $101^{\circ} 32' 13''$, en conséquence de ce que le rapport entre les diagonales du rhombe est celui de $\sqrt{3}$ à $\sqrt{2}$.

*Duplication des Images, à l'aide d'un seul
Rhomboïde.*

Il est facile d'expliquer, d'après ce qui précède, les phénomènes qui ont lieu lorsqu'on regarde un objet à travers un rhomboïde, ou à travers deux rhomboïdes superposés.

1327. Supposons, pour plus de simplicité, que *aenb* (fig. 104) étant la coupe principale du rhomboïde, il y ait un point visible *p* placé à une certaine distance en dessous du rhomboïde, et un œil situé en *s*, au-dessus de la base supérieure. Parmi tous les rayons que le point *p* envoie vers le rhomboïde, il y en a un, tel que *pl*, dont la partie *lt*, considérée comme rayon ordinaire, après avoir repassé dans l'air, parvient à l'œil suivant une direction *ts*, parallèle à *pl*. L'autre partie, qui est le rayon extraordinaire, prend une direction telle que *lz*, en se rejetant vers l'angle aigu *e*; et comme après son émergence en *z*, suivant une ligne *zx*, ce rayon redevient parallèle à *pl*, il est perdu pour l'œil. Maintenant, entre tous les autres rayons qui partent du point *p*, il y en a un second dont la direction *po* se rapproche tellement de *pl*, que *or* étant le rayon ordinaire qui en provient, le rayon extraordinaire *ou* croise le rayon *lt* au point *k*, et, après son émergence en *u*, suit une direction *us* parallèle à *po*, et qui va aboutir à l'œil. On conçoit que cette supposition est toujours possible, puisque l'on est le maître de prendre le rayon *po* sous telle inclination que l'on voudra par rapport à *pl*. L'œil verra donc deux images du point *p*, l'une sur la direction *st*, et qui sera l'image ordinaire; l'autre sur la direction *su*, et qui sera l'image extraordinaire. Quant au rayon *or*, il est évident qu'à cause de son parallélisme avec *po*, après son émergence en *r*, suivant une ligne telle que *rm*, il ne peut passer par l'œil.

A mesure que le point *p* se rapprochera de la ligne *bn*, le point *k* descendra vers cette même ligne; et lorsque le point *p* touchera *bn*, le point *k* se confondra avec lui, de manière que la double image subsistera toujours.

1328. Il est remarquable que l'une des deux images, savoir,

celle qui est vue sur la direction *su*, et qui est produite par le rayon extraordinaire, paraisse toujours plus éloignée que l'autre de la base supérieure du rhomboïde. On peut rendre très sensible cette différence de distance, en traçant un cercle sur un papier, et en observant, à travers le rhomboïde, les deux images de ce cercle qui se croiseront, en même temps que l'une sera vue dans une position inférieure à celle de l'autre.

1329. Dans l'expérience représentée par la *figure 104*, l'image extraordinaire vue sur la direction *su*, paraît plus voisine de l'angle obtus *n* que l'image ordinaire, dont le lieu est sur la direction *st*, ce qui est l'effet inverse de celui que présentent les rayons ordinaire et extraordinaire provenus d'un même rayon incident : cette inversion est une suite du croisement des rayons *ou* et *lt* au point *k*.

Cette même marche des rayons par des directions croisées sert à expliquer une expérience intéressante, qui est due au célèbre Monge. Prenez le rhomboïde en appliquant l'index sur l'arête *ab* (*fig. 101*) et le pouce sur l'arête *en*, et placez sa base supérieure *adeh* le plus près possible de l'œil, de manière que l'une des deux images du point *p* soit située en arrière de l'autre, par rapport à vous. Alors faites glisser doucement, en dessous du rhomboïde, une carte qui, restant appliquée à la base inférieure, s'avance de *b* vers *n*, jusqu'à ce qu'elle cache une des deux images. Vous remarquerez avec surprise que cette image, dont la carte vous dérobe d'abord la vue, n'est point celle qui est située du côté où vient la carte, mais celle qui est de votre côté. On conçoit, à la seule inspection de la *figure 104*, que l'arête *en* étant celle qui regarde l'observateur, la carte qui s'avance de *b* vers *a* doit d'abord intercepter le rayon incident *po*, auquel appartient le rayon émergent *su*, qui produit l'image la plus voisine de l'observateur.

Tracez avec de l'encre une ligne droite sur un papier, et faites tourner le rhomboïde au-dessus de cette ligne. Vous observerez que la plus grande distance entre les deux images a lieu sous une même direction du rayon visuel, que nous supposons ici coïnci-

der avec le plan de la coupe principale $aenb$ (1), lorsque la ligne est située parallèlement aux grandes diagonales des bases. Ces images se rapprocheront à mesure que la ligne fera un angle moins ouvert avec les mêmes diagonales, et lorsqu'elle leur sera devenue perpendiculaire, c'est-à-dire qu'elle coïncidera au contraire avec les petites diagonales, les deux images se confondront, de manière cependant que l'une dépassera l'autre, par une suite de ce que l'effet de la double réfraction subsiste toujours (2).

1330. Lorsque le rayon incident st (fig. 102) est perpendiculaire sur la base supérieure du rhomboïde, il est évident que l'image ordinaire d'un point placé en l doit être vue sur le prolongement tl de st , par un œil dont le rayon visuel coïncide avec ce prolongement. L'image extraordinaire est alors déplacée, mais il y a aussi une circonstance où celle-ci est vue sans déplacement, c'est-à-dire que si le point visible est en f' , et que $s'l'$ soit le rayon incident et $t'l'$ le rayon extraordinaire, ces deux rayons coïncideront sur une même direction. Dans ce cas, l'angle d'incidence du rayon $s'l'$ est d'environ 16^d , et l'angle $s'l'e$ à peu près de 74^d , d'où il suit que le rayon réfracté $t'f'$ ne s'écarte que d'environ 2^d du parallélisme avec l'arête en (3).

(1) Pour vous assurer de cette position du rayon visuel, tracez sur le même papier une seconde ligne d'un rouge faible, ou de quelqu'autre couleur, qui passe par le milieu de la première, en la coupant à angle droit, et qui soit plus longue que la petite diagonale des bases du rhomboïde. Ayant placé ensuite celui-ci sur le papier, de manière qu'il couvre à la fois les deux lignes, faites-le tourner doucement jusqu'à ce que l'image de la partie de la ligne colorée qui est en contact avec lui paraisse simple, et qu'en même temps elle coïncide sur une seule direction, avec le prolongement de la ligne hors du rhomboïde. Cette coïncidence prouvera que le rayon visuel est dans le plan indiqué.

(2) Les directions sous lesquelles les deux images coïncident, varient à mesure que le rayon visuel, placé hors de la coupe principale, change lui-même de position. Nous nous bornons ici aux faits qui servent de limites à tous les autres.

(3) Pour vous assurer que l'une ou l'autre des images est vue sans déplacement, ayant tracé sur un papier une ligne d'une couleur faible, plus longue que la grande diagonale du rhomboïde, puis, ayant marqué d'un

Manière d'observer les variations de la distance radiale.

1331. Les expériences que nous allons citer, et que chacun peut répéter facilement, ont un double objet, savoir : de répandre un nouveau jour sur ce que nous avons dit de la marche des rayons qui traversent un rhomboïde de spath d'Islande, et de conduire à des résultats dont on sentira dans la suite l'utilité.

Ayant marqué un papier blanc d'un point d'encre, on découpe dans une carte mince une bande étroite terminée d'un côté en angle aigu, et l'on marque d'un second point le sommet de cet angle. On place ensuite sur le papier un rhomboïde, de manière qu'en regardant au travers, on voie la double image du premier point, puis tenant la bande de carte, entre deux doigts, par l'extrémité opposée à l'angle aigu, on la passe entre le rhomboïde et le papier. De cette manière, on est le maître, en faisant jouer la carte, de varier les positions respectives et les distances des deux points d'encre.

On conçoit qu'en général ces deux points, vus à travers le rhomboïde, doivent donner quatre images distinctes. Mais en rapprochant ou en éloignant le point mobile de celui qui est fixé, et en maintenant l'œil dans une position constante, on remarquera qu'il y a un terme où au lieu de quatre images, on n'en voit plus que trois. Dans ce cas, deux des premières images se réunissent en une seule d'une teinte plus foncée.

Si en même temps l'œil est dans le plan *abne* (*fig. 101*) il faudra, pour que cet effet ait lieu, que les deux points soient sur la diagonale *bn*.

point d'encre le milieu de cette ligne, faites-la coïncider avec la grande diagonale, ou avec une ligne qui lui soit parallèle, de manière qu'elle la dépasse de chaque côté. Le rayon visuel étant sur le plan de la coupe principale menée par le point noir, vous jugerez que l'une ou l'autre des images de ce point est vue à sa vraie place, lorsque l'image de la ligne colorée sera vue sur la même direction que les parties extérieures de cette ligne.

Si l'œil s'écarte ensuite de la position où il voyait deux images se confondre, celles-ci se sépareront, et cela d'autant plus que la position de l'œil changera davantage; et il faudra, pour les voir de nouveau coïncider, augmenter la distance entre les deux points, si le rayon visuel, en variant son inclinaison, s'est rapproché du point e , et diminuer cette distance, si le rayon visuel s'est incliné en sens opposé vers le point a . Nous supposons toujours que ce rayon ne sorte pas du plan $abne$, auquel cas il est nécessaire, pour ramener les quatre images à n'en faire plus que trois, de laisser toujours les deux points sur la direction de la diagonale bn .

1332. Il n'en sera pas de même si le rayon visuel sort du plan $abne$. Voici ce que nous avons observé à cet égard : soit bn (*fig.* 105) la même diagonale que *fig.* 101, et soient p, r les deux points visibles. Concevons que le rayon visuel étant d'abord incliné vers e , et situé dans le plan $abne$ (*fig.* 101), l'œil fasse un mouvement circulaire en allant de e vers h ; l'observateur ne pourra voir coïncider deux des images qu'en plaçant les points p, r (*fig.* 105) sur une direction inclinée à la diagonale. Supposons que le point p reste fixe; il faudra placer le point r à la diagonale, comme en r' ; tandis que le rayon visuel s'approchera de plus en plus d'un plan qui couperait à angle droit la section principale, la distance nécessaire entre le point r' et la diagonale bn augmentera : elle sera la plus grande possible, lorsque le rayon visuel se trouvera dans le plan dont nous venons de parler. Au-delà de ce plan, en allant de h vers a (*fig.* 101), il faudra diminuer la distance, en laissant toujours le point r' (*fig.* 105) sur une oblique qui diverge du côté de n , par rapport à la diagonale. La distance deviendra nulle, lorsque le rayon visuel tombera de nouveau, mais en sens contraire, dans le plan $abne$ (*fig.* 101). Si ce rayon continue sa révolution en allant de a vers d , les mêmes effets auront lieu dans un ordre opposé, c'est-à-dire que, pour obtenir la coïncidence des images, il faudra placer le point r de l'autre côté de la diagonale, comme en r'' (*fig.* 105.)

1333. Maintenant soit st (*fig.* 106) un rayon de lumière qui

tombe, suivant une direction quelconque, sur la base supérieure du rhomboïde. Soit tr le rayon ordinaire et tp le rayon extraordinaire, auquel cas pr sera la distance radiale; soient pp' , rr' les rayons émergens qui, d'après ce qui a été dit, seront parallèles à st . Au lieu du rayon st , supposons deux points visibles, l'un en r' et l'autre en p' , qui envoient des rayons vers le rhomboïde dans toutes sortes de directions. Il est évident que parmi tous ces rayons, celui qui suivra la direction $r'r$ se divisera au point d'émergence, de manière que rt sera encore le rayon réfracté ordinaire; car, à cause du parallélisme des rayons st , $r'r$ considérés successivement comme rayons incidens, le rayon réfracté rt fera exactement la même fonction à l'égard de l'un et de l'autre. Par une raison semblable, le rayon qui suivra la direction $p'p$ se décomposera dans le rhomboïde, de manière que le rayon extraordinaire sera encore pt .

La proposition sera toujours vraie, quelles que soient les positions des points visibles le long des lignes $r'r$, $p'p$; d'où il suit que si l'on suppose l'un en r et l'autre en p , pts et rts seront les routes des rayons qui arriveront en s , et tout se passera encore comme dans l'hypothèse du rayon incident st . Les choses étant dans cet état, supposons un œil placé en s ; cet œil verra deux des quatre images données par les deux points se confondre sur la direction st . Donc toutes les fois que cette réunion a lieu, la distance pr entre les deux points est la distance radiale, relativement à un rayon incident qui aurait la direction sous laquelle l'œil voit l'image unique formée par la réunion dont on a parlé.

Explication de la Différence entre les distances des deux images par rapport à l'œil.

1334. Les observations relatives aux variations de la distance radiale, que nous venons d'exposer, peuvent servir à expliquer un fait remarquable que nous avons cité, et qui consiste en ce que l'image produite par le rayon extraordinaire est toujours plus enfoncée que l'autre en dessous de la base supérieure du rhomboïde.

Pour concevoir la raison de cette différence, remarquons d'abord que les rayons, à l'aide desquels on voit l'image d'un point situé derrière un milieu diaphane, forment un cône dont la base est contiguë à la surface du milieu la plus voisine de l'œil. Au-dessus de cette surface, ils se replient vers l'œil, par l'effet de la réfraction, en formant un cône tronqué, dont la petite base se confond avec la base du premier cône, et dont l'autre base, qui est plus dilatée, a un diamètre égal à celui de la prunelle par laquelle les rayons entrent dans l'œil.

1335. Quelque opinion que l'on adopte sur la distance précisée à laquelle on aperçoit l'image vue par réfraction (1314), il est certain que, toutes choses égales d'ailleurs, cette distance est plus grande, lorsque les deux diamètres des bases du cône tronqué diffèrent moins entre eux, ce qui fait que le sommet du même cône prolongé par l'imagination derrière la surface réfringente, est plus éloigné de cette surface.

1336. Cela posé, concevons que an (fig. 107) représente toujours le même rhomboïde, et que p étant un point visible situé sur la base inférieure, $pkosr$ soit le cône brisé, à l'aide duquel l'œil aperçoit en p' l'image ordinaire du point p . Nous supposons d'abord cet œil situé de manière que le rayon visuel se trouve dans le plan de la section principale. Tous les rayons extraordinaires qui répondent aux rayons ordinaires, dont le cône $pkosr$ est l'assemblage, sont perdus pour l'œil, d'après ce qui a été dit plus haut. Mais il y a un second cône (1) formé par d'autres rayons extraordinaires, à l'aide duquel l'œil voit l'image extraordinaire du point p , et de même tous les rayons correspondans sont perdus pour l'œil.

Prenons dans le cône kpo les deux rayons pk , po , qui aboutissent à l'extrémité du diamètre situé perpendiculairement à la diagonale ae , et rétablissons pour un instant les deux rayons ordinaires qui leur correspondent : il est facile de voir que ces derniers rayons doivent se trouver aux extrémités n , l de deux

(1) Nous n'avons point représenté ici ce second cône, pour ne pas trop compliquer la figure.

lignes obliques par rapport à la diagonale ae , puisque, dans ce cas, les distances radiales divergent à l'égard de cette diagonale, ainsi qu'il a été dit plus haut (1332). Donc si l'œil était placé de manière à recevoir ces mêmes rayons qui sont perdus pour lui, leur distance nl étant plus grande que la distance ko , le point de concours imaginaire de ces rayons, derrière la surface $adeh$, serait plus éloigné que celui des rayons ordinaires kr , os .

Concluons de là que les lois suivant lesquelles se réfractent les rayons extraordinaires tendent en général à rendre la distance entre ces rayons, pris de deux côtés opposés, plus grande que celle entre les rayons ordinaires, pris d'après la même condition.

Or, cette augmentation de distance que nous venons de trouver, en comparant ensemble les rayons ordinaires qui composent le cône $pkosr$ et les rayons extraordinaires correspondans, devant toujours avoir lieu, proportion gardée, pour les autres rayons extraordinaires qui sont à portée de l'œil, et lui font voir l'image extraordinaire, il en résulte que la réfraction extraordinaire tend à élargir la plus petite base du cône tronqué, plus que ne fait la réfraction ordinaire. Donc, si l'on suppose ce cône prolongé derrière la surface réfringente, le point de son axe, relativement auquel toutes les directions se compensent, doit se trouver plus reculé par rapport à l'œil et à la surface réfringente, que le point correspondant du cône formé par les rayons ordinaires. Donc le lieu apparent de l'image extraordinaire sera aussi plus éloigné que celui de l'image ordinaire.

1337. Si l'on conçoit que le rayon visuel soit incliné en sens contraire vers le point a , on aura des conclusions analogues, en appliquant le raisonnement que nous venons de faire.

Si le rayon visuel sort de la section principale et se rejette de côté, de manière que, par exemple, il se rapproche du point h , alors $k'o'$ (*fig.* 108) étant la base inférieure du cône tronqué, les lignes $k'n'$, $o'l'$, s'inclineront dans le même sens. Mais la ligne $o'l'$ s'écartera davantage que la ligne $k'n'$ de la direction parallèle à ae ; d'où il suit que l'on aura encore $n'l'$ plus grande

que $k'o'$, quoique dans un moindre rapport que quand le rayon visuel coïncidait avec la section principale. L'image extraordinaire sera donc vue aussi, dans ce cas, plus loin que l'image ordinaire; mais la différence des distances sera moins sensible que dans le premier cas; ce qui nous a paru conforme à l'observation.

Marche de la Lumière à travers deux Rhomboïdes superposés.

1338. Concevons à présent qu'un rayon de lumière traverse deux rhomboïdes situés l'un au-dessus de l'autre. Si les sections principales coïncident dans un même plan, ou sont respectivement parallèles, soit que leurs bords latéraux ab , en (*fig.* 102) s'inclinent dans le même sens, ou en sens contraire, comme on le voit (*fig.* 103), chacun des rayons ordinaire et extraordinaire qui seront sortis du premier rhomboïde ne se décomposera pas en passant dans le second, mais s'y réfractera suivant la même loi que dans le premier.

1339. Si les deux rhomboïdes sont tellement disposés que leurs sections principales se croisent à angle droit, alors chacun des rayons sortis du premier rhomboïde restera encore simple, en pénétrant dans le second; mais ces rayons changeront de fonction, c'est-à-dire, que celui qui était le rayon ordinaire dans le premier rhomboïde se dirigera dans le second comme rayon extraordinaire, et réciproquement.

1340. Mais, dans toutes les positions intermédiaires, c'est-à-dire dans celles où les sections principales seront inclinées entre elles, chacun des rayons sortis du premier rhomboïde se partagera de nouveau dans le second en un rayon ordinaire et un rayon extraordinaire, qui se dirigeront conformément à l'incidence du rayon dont ils seront les sous-divisions. Ces résultats intéressans sont dus à Huyghens (1).

(1) *Christ. Hugenii Opera reliqua*, Amstelod. 1728, *Tractatus de Lumine*, p. 67 et suiv.

1341. Il est à remarquer que les rayons extraordinaires ont cela de commun avec les rayons ordinaires, qu'en repassant du rhomboïde dans l'air par une face parallèle à celle par laquelle ils étaient entrés, ils prennent une direction qui est elle-même parallèle à celle du rayon incident

1342. Les changemens que les rayons subissent dans leurs fonctions, lorsqu'on emploie deux rhomboïdes, en occasionnent d'analogues dans la duplication des images, ainsi que l'on peut s'en convaincre au moyen de l'expérience suivante, qui n'a besoin que d'être exposée.

Après avoir mis les deux rhomboïdes en contact, par une de leurs bases, posez-les sur un papier marqué d'un point d'encre. Si leurs faces homologues sont respectivement parallèles, l'œil ne verra que deux images d'un même point, comme s'il n'y avait qu'un seul rhomboïde; seulement elles seront plus écartées l'une de l'autre. Les choses étant dans cet état, faites tourner doucement le rhomboïde supérieur au-dessus de l'inférieur; bientôt vous verrez naître deux nouvelles images, qui d'abord seront très faibles, et ensuite augmenteront peu à peu d'intensité, tandis que les deux premières images, après s'être affaiblies par degrés, finiront par disparaître; ce qui arrivera avant que le rhomboïde mobile ait fait un quart de révolution: passé ce terme, si vous continuez de le faire tourner, les mêmes effets auront lieu dans un ordre inverse; c'est-à-dire, que les deux premières images reparaitront, et que leur teinte, d'abord légère, se renforcera peu à peu, tandis que les deux autres diminueront d'intensité, jusqu'à ce qu'elles deviennent nulles vers la fin de la demi-révolution du rhomboïde mobile (1).

Alors les coupes principales étant tournées en sens contraire, mais toujours sur un même plan, comme le représente la figure 103, l'œil ne verra plus que deux images, mais qui seront beau-

(1) Tous ces différens effets sont sujets à des exceptions lorsque le rayon visuel est très oblique et prend certaines positions; car alors on ne voit que deux images dans le cas où l'on devrait en voir quatre et réciproquement. C'est ce dont on concevra la raison d'après ce que nous dirons plus bas, au sujet de la lumière polarisée.

coup plus rapprochées que dans le premier cas; il n'en verrait même qu'une seule, si les deux rhomboïdes étaient exactement de même hauteur. Si vous achevez la révolution du rhomboïde supérieur, les effets précédens reparaitront, en suivant une marche rétrograde.

1343. Nous n'avons considéré jusqu'ici que les résultats d'observations qui s'offrent comme d'eux-mêmes à un œil un peu attentif. Nous allons maintenant exposer les opinions entre lesquelles les physiciens se sont partagés sur la détermination de la loi à laquelle est soumise le phénomène, en réservant pour la dernière celle d'Huygens, qui, étant une fois bien connue, a fait disparaître toutes les autres.

Théorie de Newton.

1344. Newton, qui avait créé le système de l'émission, était par là même celui de tous les physiciens aux yeux duquel l'hypothèse des ondulations devait faire le plus de tort à la loi qu'Huygens en avait déduite. Les ayant regardées comme inséparables l'une de l'autre, il confondit dans un même arrêt celle qui aurait dû fixer son attention avec celle qui lui paraissait n'en mériter aucune. Il en chercha donc une autre, et crut reconnaître la véritable à deux caractères qu'il avait déduits de ses observations. L'un consistait en ce que, sous toutes les inclinaisons du rayon incident, la longueur de la distance radiale était constante, et l'autre en ce qu'elle était constamment parallèle à la petite diagonale de la base du rhomboïde. Or, nous avons prouvé, par des observations décisives, que c'est tout le contraire qui a lieu: d'où il résulte que Newton a pris des quantités variables pour des quantités constantes.

Il paraît que cet illustre savant ayant fait ses expériences avec des rhomboïdes d'une hauteur peu considérable, et n'ayant pu mesurer avec assez de précision les distances et les positions des rayons de lumière qu'il introduisait immédiatement dans ces corps, aura été entraîné par l'extrême simplicité de la loi qui semblait s'offrir à son observation.

Théories de La Hire et de Buffon.

1345. Nous avons vu que quand le rayon $s't'$ (*fig.* 102) tombait sur la base d'un rhomboïde de spath d'Islande sous un angle d'environ 74^{d} , le rayon extraordinaire $t'f'$ qui en provenait, suivait la même direction, en sorte que l'image qu'il faisait naître était vue sans déplacement. Ayant mené $t'p$ perpendiculaire sur $s't'$, si l'on suppose un plan qui passe par la première de ces lignes, et dont la section sur la base du rhomboïde fasse un angle droit avec la diagonale ae , il en sera de ce plan comme des plans ordinaires par rapport aux rayons qui subissent la loi de la réfraction commune, puisque les rayons qui passent sans inflexion sont toujours perpendiculaires à ces plans.

La Hire, qui avait mesuré les angles d'incidence et de réfraction du rayon extraordinaire, relativement à un plan situé comme celui dont nous venons de parler, avait trouvé que le rapport entre les sinus était à peu près celui de 3 à 2, comme quand la lumière passe de l'air dans le verre; et ce rapport lui ayant paru constant, il en avait conclu que la réfraction du rayon extraordinaire devait être assimilée à celle des rayons ordinaires, excepté que le plan auquel elle se rapportait avait une position différente.

1346. Mais le calcul démontre ce qu'on aurait pour ainsi dire deviné d'avance, savoir, que les rapports qui résultent de cette hypothèse de La Hire entre les diverses distances radiales, ne varient pas dans le même ordre que ceux qui sont donnés par les observations immédiates que nous avons citées. D'ailleurs, le plan auquel se rapporte la seconde réfraction dans la même hypothèse, est purement imaginaire, et tout-à-fait étranger à la structure cristalline du rhomboïde. Il aurait du moins avec elle une relation apparente, s'il était perpendiculaire à l'arête en , dont la direction ne s'écarte que d'environ 2^{d} du parallélisme avec le rayon $s't'$. Il est probable que cette petite divergence aura échappé à

(1) Mém. de l'Acad. des Sciences, 1710.

La Hire. Bartholin était tombé dans la même méprise, et Huygens, en parlant de cette divergence, dit qu'elle mérite d'être remarquée, pour qu'on n'entreprenne pas un travail inutile, en cherchant la cause de la réfraction extraordinaire dans un parallélisme qui n'existe pas (1).

1347. Plusieurs des physiiciens qui ont aussi adopté l'idée de rapprocher les deux réfractions dans un même genre de lois, entre autres le célèbre Buffon (2), ont pensé qu'un rhomboïde de chaux carbonatée était composé de couches entre croisées de deux densités diverses. Pour que cette hypothèse s'accordât avec l'observation, il fallait que, parmi ces couches, les unes s'étendissent parallèlement à la base du rhomboïde, et les autres parallèlement au plan qui passe par tp (fig. 102.). Lorsqu'un faisceau de lumière tombait sur la surface du rhomboïde, les rayons dont il était l'assemblage rencontraient, les uns des molécules de la matière la plus dense, et les autres des molécules de celle qui était plus rare : d'où résultaient deux réfractions particulières, dont chacune était soumise aux lois ordinaires.

Mais cette hypothèse a contre elle un fait qu'il est très facile de vérifier; car si l'on regarde à travers le rhomboïde un point visible, en plaçant l'œil de manière que le rayon visuel soit perpendiculaire à la base de ce rhomboïde, l'image ordinaire du point dont il s'agit sera vue sans déplacement; c'est-à-dire qu'elle paraîtra située sur le prolongement du rayon visuel qui, dans ce cas, fera la fonction d'un rayon incident. Or, dans l'hypothèse dont nous avons parlé, le rayon qui, en partant du point visible, apporterait à l'œil l'image de ce point, subirait continuellement des inflexions à mesure qu'il rencontrerait obliquement les diverses couches parallèles au plan qui passe par tp ; d'où il suit que l'image du point visible ne pourrait être aperçue à sa vraie place.

(1) *Opera reliqua*. Amstelod., t. I, p. 45.

(2) *Hist. natur. des Minéraux*, t. VII, p. 157 et suiv.

Théorie d'Huygens.

1348. Dans le récit que nous avons fait de tout ce qui concerne la découverte de la véritable loi à laquelle est soumise la réfraction extraordinaire, nous nous sommes bornés à dire qu'Huygens, auquel on en est redevable, l'avait fait dépendre du système des ondulations, d'après l'hypothèse de deux ondes de figure différente. Nous revenons ici sur cette circonstance pour exposer la manière dont ce célèbre physicien avait adapté l'hypothèse dont il s'agit à l'explication des phénomènes. Des deux figures qu'il attribuait aux ondes, l'une, qui était sphérique, appartenait à celles qui produisaient la réfraction ordinaire; l'autre, qui se rapportait à un ellipsoïde, distinguait celles qui donnaient naissance à la réfraction extraordinaire. Huyghens supposait que la face du rhomboïde qui recevait le rayon incident coupait en deux parties égales l'ellipsoïde qui déterminait cette seconde réfraction, en sorte que la moitié inférieure de l'onde s'étendait seule dans le rhomboïde; et tel était l'art avec lequel il avait combiné la position du grand axe de l'ellipsoïde, le rapport entre cet axe et le plus petit, et les autres dimensions du même solide, qu'en prenant pour données les nombres qui représentaient ces différentes lignes, il parvenait à déterminer la direction du rayon extraordinaire, pourvu que celle du rayon incident fût connue, et l'accord entre les résultats de la théorie et ceux que donnait l'observation, l'avait convaincu que sa construction représentait la loi de la nature.

M. Wollaston, qui le premier entreprit de vérifier cet accord, le trouva si satisfaisant, qu'il en tira la conséquence que les principes d'Huygens méritaient de fixer l'attention des physiciens. M. Malus ayant dégagé la loi adoptée par ce savant, d'une construction qui ne servait qu'à la déguiser, la plaça dans une formule analytique qui la montrait telle qu'elle était, et dont les nombreuses applications achevèrent de prouver qu'elle avait tous les caractères de la véritable loi. Une propriété remarquable de la même loi, qui cependant ne lui appartenait pas exclusivement,

ainsi qu'on le verra bientôt, consistait en ce que sous deux inclinaisons égales en sens contraire du rayon incident, la somme des deux distances radiales était une quantité constante.

Mais quelque intéressans que soient les résultats de ces différentes recherches, ils n'offrent encore qu'une expression géométrique de cette loi, et il serait à désirer qu'on en donnât l'explication, en l'envisageant sous le rapport de la Physique. Les recherches importantes de M. de Laplace sur ce sujet ont posé des points de ralliement sur la route qui conduit à ce but. Ce savant célèbre a reconnu que la loi d'Huygens satisfait au principe de la moindre action, et a conclu de ce caractère et de quelques autres du même genre, qu'elle se rapporte, ainsi que la réfraction ordinaire, à des forces dont l'action n'est sensible qu'à des distances imperceptibles (1). Ce que Newton a fait pour celle-ci permet d'entrevoir ce qui reste à faire pour l'autre.

1349. La découverte d'Huygens n'était pas encore connue, ou n'avait pas été appréciée, lorsque nous avons proposé une détermination de la loi qui en a été le sujet, qui nous avait d'abord paru exacte, mais que nous avons fini par ne donner que pour approximative (2). La comparaison qui en a été faite depuis avec celle à laquelle Huygens était parvenu, a prouvé qu'effectivement elle la touchait de près (3). C'est ce qui nous a engagés à la replacer ici, parce qu'elle offre un moyen très simple et très facile, soit de rendre sensible à l'œil la marche du rayon extraordinaire lorsqu'il coïncide avec la section principale du rhomboïde, soit de la vérifier à l'aide de l'expérience. Voici en quoi consiste cette détermination (4).

(1) Nouveau Bulletin des Sciences de la Société philomatique. 1807, t. I, p. 363 et suiv. Mémoires de Physique et de Chimie de la société d'Arcueil, t. II, p. 111 et suiv.

(2) Voyez la deuxième édition de ce Traité, t. II, p. 347 et suiv.

(3) Malus, Théorie de la double Réfraction, p. 293.

(4) Pour construire la section principale, on tracera à volonté une ligne an , (fig 109), qui sera l'axe du rhomboïde, puis, ayant divisé cette ligne en trois parties égales, on fera passer par les points de division o , r , deux autres lignes os , gr , perpendiculaires sur an , dont les parties os , gr , soient égales

1350. Nous avons vu (1323) que quand le rayon incident st (fig. 101) était perpendiculaire sur $adeh$, auquel cas le rayon ordinaire continuait sa route dans le rhomboïde, le rayon extraordinaire se rejetait vers le petit angle solide b . Supposons que la ligne ax (fig. 110) abaissée de l'angle a perpendiculairement sur la diagonale bn , représente le rayon ordinaire: dans ce cas, si l'on prend xy égale au tiers de bx , et que l'on mène ay , cette dernière ligne représentera le rayon extraordinaire relatif à l'incidence perpendiculaire sur ae .

Soit maintenant st un rayon incident oblique sur ae , et tl le rayon réfracté ordinaire, dont il est facile de déterminer la position d'après le rapport 5 à 3 entre les sinus. On demande la position du rayon extraordinaire tf .

Par le pied de la ligne ax , menez xo , qui fasse avec ax un angle de 60^d ; puis, par le pied du rayon ordinaire tl , menez lm parallèle à xo . Prenez sur lm la partie lu égale à xz . La ligne tf , menée par le sommet du rayon ordinaire et par le point u , sera la direction du rayon extraordinaire relatif à l'incidence suivant st .

Si l'on suppose que l'incidence ait lieu en sens contraire, suivant une direction $s't'$, alors le rayon ordinaire étant représenté par $t'l'$, le rayon extraordinaire $t'f'$ sera encore situé entre le précédent et l'angle b , et l'on aura la distance radiale par une construction semblable à celle que nous avons indiquée relativement au rayon incident st (1).

1351. On voit par là que lu ou $t'u'$ est une constante; mais

à ao ou à nr , et les parties opposées bo , er doubles des premières. Le quadrilatère $aconb$ sera la section principale proposée.

Le rhomboïde du spath d'Islande est, parmi tous les rhomboïdes possibles dans lesquels la diagonale ae est supposée être constante, celui qui jouit de cette propriété que la surface de sa section principale est un *maximum*. Dans ce cas le rapport entre les deux diagonales de chaque rhombe est celui de $\sqrt{3}$ à $\sqrt{2}$ que nous avons adopté.

(1) Nous avons donné une formule générale qui exprime ce résultat, dans les Mémoires de l'Académie des Sciences; 1788, p. 45. Voyez aussi le Traité de Minéralogie, t. II, p. 45.

L'amplitude lf ou $l'f'$ est nécessairement une variable. Si l'on suppose que les deux incidences $st, s't'$ soient égales en sens contraire, on aura $f'l'$ plus petite que fl , de manière que leur somme sera double de la distance radiale xy relative à l'incidence perpendiculaire. Cette somme est donc elle-même une quantité constante. Huygens avait déduit ce même résultat des propriétés de l'ellipse dont il attribuait la figure aux ondes de lumière, qui produisaient, selon lui, la réfraction ordinaire. Mais dans la théorie que nous proposons, ce résultat se trouve ramené aux propriétés des lignes droites, et il est même démontré qu'il a toujours lieu, quelle que soit la valeur des angles bxo, xxy , pourvu que l'on prenne lu ou $l'u$ égale à zx . Parmi tous les cas possibles, nous avons choisi celui qui nous a paru s'adapter le mieux à l'observation, et il est remarquable que ce cas soit celui où la ligne ox fait avec ax un angle de 60^d , tandis qu'elle fait avec ao un angle qui est à très peu près de $101^d \frac{1}{2}$, c'est-à-dire, égal au grand angle du rhombe primitif (1).

(1) Concevons que l'on applique $l'l'$ sur tl , en renversant la base $f'l'$ du triangle $l'l'f'$, de manière que le point f' tombe sur le point c , de l'autre côté du rayon tl , et le point u' sur le point p . Si l'on mène lp et up , cette dernière ligne sera évidemment parallèle à bn , à cause de l'égalité des angles $ulf'plc$, et de celle des lignes lu, lp . De plus, la ligne fc sera égale à la somme des deux distances $lf + l'f'$. Or, si l'on suppose que le rayon tl change d'inclinaison en restant fixe par son extrémité l , les lignes tc, tf , dans l'hypothèse de lu, lp constantes, resteront fixes elles-mêmes par leurs points p, u , tandis que leurs extrémités supérieure et inférieure feront un mouvement le long des lignes ae, bn . Donc, dans tous les cas, on aura $tp : tc :: up : fc$.

Mais il est aisé de voir qu'à cause des parallèles ac, up, bn , le rapport $\frac{up}{tc}$

est constant : donc aussi le rapport $\frac{up}{fc}$ sera constant ; et puisque up est constante, fc le sera pareillement. Or, plus le rayon tl approche d'être parallèle à la perpendiculaire tm , plus aussi tf approche d'être égale à xy . Donc si l'on suppose que la direction tl diffère infiniment peu de la perpendiculaire, on pourra faire la ligne fc ou la somme des deux lignes $fl, f'l'$ égale à $2xy$. Donc, puisque cette somme est constante, elle sera le double de xy dans tous les cas. On voit que cette démonstration est indépendante de la position de la ligne ox , ou de l'angle qu'elle fait avec la diagonale bn .

*Idee de Newton sur la Cause physique de la
double Réfraction.*

1352. Il ne nous reste plus qu'à donner un aperçu de la cause physique d'où dépend le phénomène. Quoique celle qu'a imaginée Newton paraisse singulière au premier abord, plus on l'étudie et plus on trouve qu'elle gagne à être examinée de près, et comparée avec les faits observés.

Ce grand géomètre supposait que les molécules de la lumière avaient deux espèces de pôles, sur lesquels la matière de la chaux carbonatée exerçait une action particulière, dont le centre était placé dans la région du petit angle solide. D'après cette idée, il considérait chaque rayon simple comme un prisme quadrangulaire infiniment délié, dans lequel tous les pôles dont nous venons de parler étaient rangés sur deux pans opposés, que nous appellerons *pans de réfraction extraordinaire*. Lorsque le rayon, en pénétrant le rhomboïde, par exemple en allant de la base supérieure *adeh* vers l'inférieure *beng* (fig. 101), présentait l'un de ces mêmes pans à l'angle solide *b*, la force dont il s'agit l'attirait à elle, tandis que quand il présentait à l'angle *b* l'un des deux autres pans que l'on peut appeler *pans de réfraction ordinaire*, la matière du rhomboïde n'avait sur lui d'autre action que celle qui lui était commune avec les milieux ordinaires.

Cela posé, parmi tous les rayons simples dont est formé un faisceau de lumière qui tombe sur la surface du rhomboïde, les uns auront leurs pans de réfraction ordinaire, et les autres leurs pans de réfraction extraordinaire tournés vers le petit angle solide. Le faisceau se divisera donc en deux parties, dont l'une ne subira que la réfraction ordinaire, tandis que l'autre, attirée par la force qui réside dans le petit angle solide, sera soumise à la réfraction extraordinaire.

1353. Cette hypothèse acquiert un nouveau degré de vraisemblance lorsqu'on l'applique au phénomène des quatre images produites par la superposition de deux rhomboïdes (1342), et aux variations que subissent ces images dans leur intensité, à

mesure que s'opère la révolution du rhomboïde supérieur. Ces effets indiquent que le faisceau de rayons extraordinaires, dans lequel tous les pans de réfraction du même nom étaient d'abord exactement tournés vers la région d'où émane la force qui agit sur eux, se sous-divise peu à peu, à mesure que, pendant la rotation du rhomboïde, cette région change de position, en sorte que les molécules lumineuses échappent les unes après les autres à la force attractive, pour subir la réfraction ordinaire. Le contraire arrive par rapport aux rayons de l'autre faisceau, qui avaient d'abord leurs pans de réfraction extraordinaire situés à angle droit sur la région d'où émane la force qui produit cette réfraction; car ces pans, se trouvant peu à peu dans une position plus favorable à l'égard de la force dont il s'agit, subissent son action les uns après les autres; et le faisceau finit par lui être soumis tout entier. On croit voir une affinité dont l'intensité augmente ou diminue suivant que les corpuscules sur lesquels elle agit sont plus ou moins en prise à son énergie, de manière que le nombre des corpuscules attirés s'accroît ou diminue lui-même par des quantités proportionnelles.

Généralité des effets de la Réfraction observés d'abord dans les Rhomboïdes superposés de Spath d'Islande.

1354. Les différens corps dans lesquels on avait retrouvé la propriété de doubler les images, furent pendant long-temps employés solitairement aux expériences dans lesquelles ils la manifestaient. Les phénomènes que présentent deux rhomboïdes calcaires dont on combine les actions, semblaient annoncer un de ces caractères propres à faire ressortir entre toutes les autres substances celle qui en portait l'empreinte, lorsque M. Malus découvrit que loin d'être particuliers au spath d'Islande, ils s'étendaient à tous les corps doués de la double réfraction (1). Il n'est pas même nécessaire, pour l'observer, d'associer deux cristaux de même espèce.

(1) Théorie de la double réfraction, n° 47, p. 219.

Ainsi l'un pourrait appartenir au plomb carbonaté ou à la baryte sulfatée, et l'autre au quartz ou au zircon. Ces substances se comportent entre elles comme deux rhomboïdes de spath d'Islande.

1355. Pour vérifier, par l'expérience, la propriété dont il s'agit, on peut regarder la flamme d'une bougie à travers deux prismes des mêmes substances, posés l'un sur l'autre. On verra, en général, quatre images de cette flamme. Mais si l'on fait tourner lentement un des prismes autour du rayon visuel, pris pour axe, les quatre images se réduiront à deux toutes les fois que les faces contiguës seront parallèles ou perpendiculaires entre elles. Les deux images qui disparaissent ne se confondent pas avec les premières; on les voit s'éteindre peu à peu, tandis que les deux autres augmentent d'intensité. Les rayons ordinaire et extraordinaire qui sortent de l'un des deux corps pour passer dans l'autre, conservent leurs fonctions ou les échangent sous les mêmes conditions que dans l'expérience faite avec deux rhomboïdes de spath d'Islande.

1356. Le soufre se trouve ici dans un cas particulier. Nous avons reconnu que les morceaux de ce combustible, taillés suivant deux plans parallèles entre eux, et placés sur un papier marqué d'un point ou d'une ligne, exerçaient sur la lumière réfractée la même action que le spath d'Islande. Il en résulte que l'on peut varier l'expérience, en combinant avec un rhomboïde du même spath un morceau de soufre taillé comme je viens de le dire. Ayant superposé ces deux corps n'importe dans quel ordre, si l'on fait tourner doucement celui qui est en dessus, on verra successivement deux ou quatre images d'un même point, dans les mêmes circonstances que celles qui dépendent du concours des deux rhomboïdes calcaires.

Des deux espèces de Réfraction nommées l'une *attractive* et l'autre *répulsive*.

1357. Nous avons vu que quand un rayon de lumière qui traverse un rhomboïde de spath d'Islande est situé dans le plan de la coupe principale, le rayon extraordinaire qui en provient

se rejette plus que le rayon ordinaire vers l'angle aigu de cette coupe, en faisant un angle plus ouvert avec la perpendiculaire menée du point d'incidence sur la surface réfringente. M. Biot, ayant comparé les positions des deux rayons relativement à la même perpendiculaire dans les diverses substances minérales, douées de la double réfraction, a découvert que tantôt elles s'assimilent à celles qu'on observe dans le spath d'Islande, et tantôt ont lieu en sens inverse; en sorte que le rayon extraordinaire s'écarte moins de la perpendiculaire que le rayon ordinaire. M. Biot a donné le nom d'*attractive* à cette dernière espèce de réfraction; et, parmi les corps qui la subissent, il cite le quartz et la baryte sulfatée; la première espèce est celle qu'il appelle *répulsive*, et que lui ont offert, entre autres substances, l'émeraude dite béryl et la tourmaline.

Il cite des expériences à l'aide desquelles on peut reconnaître celle des deux réfractions qui existent dans une substance donnée, et déterminer ainsi, dans tous les cas, l'effet d'une distinction qui a le double avantage de répandre un nouveau jour sur la marche des phénomènes, et d'ajouter à leur théorie un nouveau degré de précision.

Des Limites relatives à la double Réfraction, qui existent dans la structure des Cristaux.

1358. Tout cristal transparent, doué de la double réfraction, quelle que soit la substance à laquelle il se rapporte, peut être coupé d'une multitude de diverses manières, par deux plans inclinés l'un sur l'autre, et parallèles à des faces secondaires qui seraient susceptibles d'être produites par deux lois différentes de décroissement, ou parallèles l'une à une face primitive, et l'autre à une face secondaire. Parmi toutes les combinaisons binaires qui naissent de cette sous-division à l'égard d'une même substance, il en est une qui jouit de cette propriété que les images des objets vus par réfraction à travers les deux faces qui la donnent, sont sensiblement simples.

1359. Dans le même cas, il arrive toujours que l'une des deux

faces dont il s'agit est perpendiculaire à l'axe du cristal, ou coïncide avec cet axe, en sorte que les résultats des observations se rapportent à deux limites prises dans le mécanisme de la structure. La limite relative à chaque cas particulier dépend de l'espèce à laquelle appartient le cristal que l'on a entre les mains.

1360. Il est rare que les deux faces réfringentes désignées n'existent pas naturellement sur quelques-unes des variétés produites immédiatement par la cristallisation; en sorte que les positions et les inclinaisons mutuelles des mêmes faces sont déterminées d'avance par la théorie. Les variétés dont il s'agit offrent ainsi comme les types naturels des solides destinés à l'observation des deux espèces de réfraction.

1361. Pour citer des exemples, nous donnerons la préférence aux cristaux qui dérivent du rhomboïde primitif de la chaux carbonatée, parce que les effets des faces réfringentes dont nous avons parlé, s'y présentent avec des caractères qui les font ressortir parmi ceux que l'on observe dans les autres substances.

Preignons le prisme hexaèdre *hd* (*fig. 111*), déjà représenté *fig. 5* pl. 1, t. I, et dont nous avons extrait, à l'aide de la division mécanique, le rhomboïde primitif, et bornons-nous à une seule coupe *splu*, laquelle sera parallèle à la face correspondante du rhomboïde. Si l'on regarde une épingle à travers le trapèze *splu*, et le pan *abr* opposé à celui qui est adjacent à ce trapèze (1), l'image de l'épingle sera rejetée très haut par la réfraction qui sera double; en sorte que les deux images seront à une distance que nous avons estimée par aperçu à peu près égale à 25 centimètres, environ 2 pouces. L'angle réfringent est de 45^{d} .

Supposons ensuite que l'on ait coupé le rhomboïde primitif représenté (*fig. 112*) par un plan *mnr* (*fig. 113*) perpendiculaire à l'axe, et que l'on regarde l'épingle à travers ce plan, de manière que le rayon visuel lui soit perpendiculaire, et que son prolon-

(1) Nous substituons ici le pan dont il s'agit à une face qui coïncide avec l'axe du cristal, ce qui ne change rien à l'observation, puisque cette face est censée lui être parallèle. Nous en userons de même dans les cas suivans.

gement passe par l'épingle, l'image alors sera simple ; mais si le rayon visuel s'écarte de sa position, en s'inclinant d'un côté ou de l'autre, l'œil verra deux images.

L'effet sera le même, si le rhomboïde a été coupé par un second plan (*fig. 114*) parallèle au premier ; c'est-à-dire que l'image sera simple ou double sous les mêmes conditions que dans le cas précédent, relativement à la direction du rayon visuel.

1362. Lorsqu'on se sert du premier rhomboïde, *fig. 113*, et que l'image est simple, le rayon réfracté qui est entré dans ce rhomboïde, perpendiculairement au plan *mur*, faisant des angles égaux avec les trois faces *gmnbx*, *grnbx* et *amrgo*, et avec celles qui leur sont parallèles, n'est pas plus sollicité à se rejeter d'un côté que de l'autre ; en sorte qu'il reste sur la direction de l'axe ; et repassant dans l'air par une des faces inférieures, se réfracte suivant la loi ordinaire.

1363. Comparons maintenant les effets qui viennent d'être décrits avec leurs analogues dans un cristal de quartz. La forme ordinaire de ce minéral est un prisme hexaèdre régulier (*fig. 115*), terminé par deux pyramides droites du même nombre de faces. Trois de ces faces, prises alternativement vers chaque sommet, telles que *cbd*, *fbg*, *abh*, et celles qui leur sont parallèles dans le sommet inférieur, appartiennent à un rhomboïde qui est la forme primitive ; en sorte que si l'on regarde une épingle à travers la face *P* prise pour exemple, et le pan *hgry* situé du côté opposé, les deux faces réfringentes feront respectivement la même fonction que les faces *psul*, *abrk*, sur le cristal de chaux carbonatée que nous avons considéré précédemment. On verra deux images de l'épingle comme à travers ces dernières faces, excepté qu'elles seront beaucoup moins écartées l'une de l'autre (1). L'angle réfringent, dans ce cas, est de $38^{\text{d}} 20'$.

Si l'on continue de prendre la face *P* pour une des faces réfrin-

(1) L'effet serait le même si l'on employait, comme faces réfringentes, les triangles *dbf*, *abc*, qui alternent avec les précédents, en les combinant avec les pans qui leur correspondent du côté opposé. La structure du cristal se prête à cette substitution.

gentes, et que l'on substitue au pan *hgry* une face artificielle *lmnory* perpendiculaire à l'axe, l'image sera simple, et cela même sous toutes les directions du rayon visuel, en quoi cette observation différera de celle qui lui correspond, lorsqu'on se sert d'un cristal de chaux carbonatée.

1364. Nous croyons devoir prévenir ici une cause d'illusion qui existe dans certains cristaux de quartz, et qui se retrouve dans plusieurs de ceux qui appartiennent à d'autres substances. Elle dépend des petits défauts de continuité connus sous le nom de *glaces*, et des autres accidens qui interceptent les rayons ou dérangent leur marche, et dont l'effet, dans ce dernier cas, est quelquefois de faire paraître la réfraction double lorsqu'elle est simple. Mais les fausses images produites par cette cause sont beaucoup plus faibles que les véritables. On les reconnaît encore à ce qu'elles changent de position à l'égard de ces dernières, en se montrant tantôt au-dessus, tantôt au-dessous d'elles, à mesure que l'on incline la pierre dans un sens ou dans l'autre, et il y a tel degré d'inclinaison qui les fait disparaître entièrement. Mais le cristal qui a servi aux observations précédentes est entièrement exempt de ces imperfections; sa transparence égale celle de l'eau la plus limpide, et rien n'altère l'unité de l'image à travers deux faces dont l'une est perpendiculaire à l'axe.

Les autres substances dont nous allons parler sont dans le même cas que le quartz; l'image qui était simple lorsque le rayon visuel avait une direction perpendiculaire à l'une des faces réfringentes, ne cesse point de l'être au jugement de l'œil exercé et attentif, sous toutes les inclinaisons du même rayon; nous nous bornons ici à énoncer le fait, nous réservant à exposer, vers la fin de cet article, les réflexions qu'il tend à faire naître, lorsqu'on le compare à lui-même, en prenant pour termes de comparaison d'une part un cristal de chaux carbonatée, et de l'autre des cristaux choisis parmi ceux d'une espèce différente.

1365. L'exemple suivant nous sera fourni par l'émeraude, et nous prendrons, pour type du sujet des observations, un cristal de la variété que nous nommons *annulaire*, et que représente la

figure 117. Sa forme primitive est le prisme hexaèdre régulier qui résulterait du prolongement des faces P, M, M, etc. Mais ce prisme est ici modifié par des facettes secondaires t, t' , qui remplacent les arêtes du contour de la base. La réfraction suit la même marche que dans le quartz; l'image est simple à travers une des facettes secondaires telle que t , et la base $ursxyz$ opposée à P. Elle est double à travers la même face, et le pan $onsr$ situé du côté opposé. Dans le premier cas, l'angle réfringent est de 30^d , et dans le deuxième, il est de 60^d . Mais l'émeraude est, parmi les substances minérales que nous avons soumises à l'observation, celle qui donne le *minimum* de double réfraction. Les deux images ne commencent à être distinctes que quand l'épingle est éloignée du cristal d'environ 5 décimètres (1 pied $\frac{1}{2}$). Nous avons employé à nos observations des cristaux diaphanes d'émeraude dite *beryll*, qui venaient de Sibérie, et des morceaux taillés d'une transparence parfaite.

1366. La substance à laquelle nous allons passer, et qui est la baryte sulfatée, a pour forme primitive un prisme droit rhomboïdal Aa' (fig. 118) dans lequel la plus grande inclinaison des pans M, M est de $101^d 32'$.

Le cas où l'image est double existe naturellement dans une variété que nous nommons *apophane*, et que représente la fig. 119. Les angles solides obtus A, A' (fig. 118) des bases y sont remplacés par des facettes secondaires d, d' (fig. 119), d'une figure triangulaire. En regardant l'épingle à travers une de ces facettes telle que d et la base opposée à P, auquel cas l'angle réfringent est de $39^d 11'$, on voit très distinctement deux images parallèles à la grande diagonale E, E' (fig. 118). On les verrait également dans une direction parallèle à la petite diagonale A, A', si on les regardait à travers une facette qui interceptât l'un des angles solides E, E', et la base opposée à P. On connaît une autre variété de baryte sulfatée, dont la forme se prête à cette observation.

À l'égard des faces réfringentes qui donnent les images simples, il y a ici une distinction à faire, fondée sur ce que, dans ce cas, une des faces dont il s'agit peut coïncider avec le plan qui passe par les grandes diagonales EE' et ee' , ou avec celui qui passe par les petites diagonales AA' et aa' . Il se présente donc ici

deux observations, dans chacune desquelles le plan mené par une des diagonales se combine avec une des faces latérales M, M.

1367. L'une de ces observations peut être faite à l'aide de la variété que nous nommons *rétrécie*, et qui offre deux facettes telles que *s* (*fig.* 120), parallèles au plan qui coïncide avec la grande diagonale E E' (*fig.* 118). On peut employer à la seconde observation une autre variété appelée *raccourcie*, dans laquelle la facette *k* (*fig.* 121) et son opposée sont au contraire situées parallèlement à la petite diagonale. Or, c'est la première variété qui donne l'image simple, lorsqu'on regarde à travers un des pans M (*fig.* 120) et la facette opposée à *s*, c'est-à-dire parallèle au plan qui passe par les grandes diagonales; l'angle réfringent est alors de $50^{\text{d}} 46'$. Si l'on avait commencé par se servir de l'autre variété, la réfraction aurait été double, et l'on en aurait conclu que, pour la voir simple, il fallait substituer au plan dont nous venons de parler l'un de ceux qui coïncident avec les faces *k* (*fig.* 121).

Il est aisé de se procurer des corps à l'aide desquels on puisse vérifier les observations précédentes, en profitant de la grande facilité avec laquelle les masses lamelleuses de baryte sulfatée se prêtent à la division mécanique pour en extraire le prisme rhomboïdal qui offre la forme primitive; après quoi on fera naître sur ce prisme des facettes artificielles qui aient la même relation avec ce prisme que celles qui existent sur les cristaux naturels.

1368. Nous terminerons cet article par des observations relatives aux substances douées de la double réfraction, dont la forme primitive est un octaèdre dans lequel la base commune des deux pyramides dont il est l'assemblage est, suivant les espèces, un carré, un rectangle ou un rhombe. Il arrive souvent que ces deux pyramides sont séparées par un prisme intermédiaire, produit en vertu d'une loi de décroissement, ou que l'octaèdre lui-même, par une suite de l'allongement qu'il a subi dans un certain sens, se présente sous une forme prismatique. Or, l'une et l'autre de ces circonstances offrent l'avantage de simplifier et de faciliter les applications de la méthode, en substituant à l'octaèdre le prisme qui en dérive.

1369. Nous prendrons pour exemple les cristaux de topaze dont la forme primitive, représentée (*fig. 122*), se rapporte au second cas, c'est-à-dire que le quadrilatère $efgh$, qui fait la fonction de base, est un rectangle. L'inclinaison de M sur M' est de $122^{\text{d}} 42'$, et celle de P sur P' est de $88^{\text{d}} 2'$. Les faces de cet octaèdre existent sur plusieurs variétés, parmi celles qui sont secondaires; et dans tous les cristaux que nous avons observés jusqu'ici, la partie moyenne, abstraction faite de quatre pans additionnels, présente la forme d'un prisme droit rhomboïdal (*fig. 123*), dans lequel l'inclinaison mutuelle des pans $acxo$, $bcxy$ est de $124^{\text{d}} 22'$ (1). La division mécanique des cristaux a lieu avec une grande facilité dans le sens de deux joints naturels très nets et très éclatans, situés parallèlement aux bases du prisme. Maintenant, tel est le rapport de position qui existe entre ce même prisme et l'octaèdre, que les diagonales menées l'une de a en b , et l'autre de c en d sont parallèles, la première au côté fg (*fig. 122*) du rectangle $efgu$, et la seconde au côté ef .

1370. Cela posé, il est facile de déterminer, relativement au prisme, les positions des faces réfringentes qui doivent être employées aux observations. On fera naître d'abord, à la place de l'angle solide c (*fig. 124*), une face triangulaire fgn , dont le côté fg soit parallèle à la diagonale comprise entre les points a , b , et dont l'inclinaison sur la base soit de $51^{\text{d}} \frac{1}{3}$, et l'on remplacera l'arête dn située du côté opposé, par une face rectangulaire $hluk$, située parallèlement à la même diagonale. Si l'on regarde une épingle à travers ces deux faces, son image sera très sensiblement doublée. Dans ce cas, l'angle réfringent est de $28^{\text{d}} \frac{2}{3}$. Si ensuite on regarde la même épingle à travers la face fgn et la base $onxz$, elle paraîtra simple.

1371. Il est aisé de retrouver, dans la structure de l'octaèdre,

(1) Nous avons exposé, dans l'article de la Cristallographie relatif à l'octaèdre, le double point de vue sous lequel la structure des cristaux de topaze peut être considérée et qui permet d'adopter à volonté, comme forme primitive, soit l'octaèdre rectangulaire (*fig. 122*), soit le prisme rhomboïdal (*fig. 123*), en laissant subsister l'unité des molécules,

les analogues des faces réfringentes qui existent dans celle du prisme. A la face triangulaire *fgn* répond le triangle *fs_g* (fig. 122); à la face *dluk* (fig. 124) répond le plan qui, en partant du sommet *s* (fig. 122) de l'octaèdre, passe par l'axe perpendiculairement aux côtés *ef*, *hg*; et à la base *ahbc* (fig. 124), répond le rectangle *efgh*, qui sous-divise l'octaèdre en deux pyramides. C'est surtout dans les topazes incolores du Brésil, dites *topazes blanches*, que le poli naturel du joint qui coïncide avec ce rectangle est si vif et si égal, qu'on le prendrait pour le poli de l'art (1).

1372. On peut obtenir, dans des sens différens de ceux que nous avons indiqués, la face réfringente dont l'effet se combine avec celui de la limite. La seule condition essentielle est que cette dernière soit toujours une des deux faces employées à l'observation de la réfraction. On peut aussi produire arbitrairement dans un cristal des faces artificielles inclinées d'un nombre quelconque de degrés sur celle qui répond à la limite, et dont la position est constante. On aura des effets analogues à ceux que produiraient les faces naturelles auxquelles on substitue celles dont nous venons de parler; mais nous avons cru devoir ramener les positions des faces réfringentes à des types choisis parmi les résultats de la

(1) Nous nous sommes bornés au cas le plus ordinaire, qui est celui dans lequel la forme primitive donnée par la théorie est celle d'un prisme droit à bases rhombes, ou peut être ramenée à cette dernière. La face réfringente parallèle à l'axe est alors située dans le sens d'une des diagonales de la base, ou, ce qui revient au même, elle coïncide avec une face produite en vertu d'un décroissement par une rangée sur une des arêtes longitudinales. Mais dans certaines espèces, et entre autres dans l'épidote, la forme primitive est un prisme, qui a pour bases des parallélogrammes obliques dont les côtés sont inégaux, et qui n'a pas un aspect symétrique propre à fournir par lui-même une indication sur la position de la face réfringente dont il s'agit; et alors il ne serait pas impossible que cette face fût le résultat d'un décroissement par deux ou par trois rangées sur une des arêtes longitudinales de ce prisme. Nous nous proposons de faire des recherches particulières relativement à cette hypothèse à laquelle la théorie ne s'oppose pas, et qui permettrait également de déterminer la position proposée. Seulement, il pourrait arriver que cette détermination exigeât une ou deux observations de plus que dans le cas où le prisme est rhomboïdal.

crystallisation, parce que la marche de l'observation en est plus simple et plus conforme au mécanisme de la structure.

1373. Dans la méthode que nous venons d'exposer, nous avons fait dépendre la détermination de l'axe de double réfraction de la condition que l'œil voie les images des objets sensiblement simples à travers deux faces inclinées entre elles, dont l'une soit perpendiculaire ou parallèle à l'axe du cristal qui est le sujet de l'observation. La ligne qui tombe perpendiculairement sur cette dernière face, est l'axe de double réfraction; et l'on nomme *section principale* le plan qui passe par cet axe perpendiculairement à la même face. De plus, nous avons dit que les images restaient sensiblement simples, sous toutes les directions du rayon visuel, à moins que le cristal n'appartînt à la chaux carbonatée.

1374. La méthode employée par les physiciens pour déterminer l'axe de double réfraction diffère de la nôtre, 1°. en ce qu'au lieu de la face inclinée à celle qui est parallèle ou perpendiculaire à l'axe du cristal, on en suppose une autre située parallèlement à cette dernière; 2°. en ce qu'un rayon dirigé vers les deux faces dont il s'agit ne reste simple, en entrant par celle qui se présente à lui, qu'autant qu'il lui est perpendiculaire. Il paraîtrait en résulter que l'œil ne pourrait voir les images simples à travers les deux faces réfringentes dans le cas du parallélisme dont nous venons de parler, qu'autant que le rayon visuel leur serait perpendiculaire. A plus forte raison serait-il nécessaire, dans le cas de l'inclinaison, qu'il eût la même direction relativement à celle qui serait parallèle ou perpendiculaire à l'axe du cristal. Or, nous avons vu que notre méthode n'exigeait pas que cette condition fût remplie, si ce n'est à l'égard d'un cristal de chaux carbonatée.

1375. On concilierait tout, en admettant que, dans le cas où les images paraissent simples, le rayon réfracté qui les donne se sous-divise réellement en pénétrant le cristal, mais d'une si petite quantité, qu'elle ne pourrait être saisie que par des observations très précises; mais cela n'empêcherait pas que nous n'eussions rempli notre but en faisant dépendre la détermination de

l'axe de double réfraction d'une distinction qui s'offre comme d'elle-même entre deux réfractions, dont l'une est simple au jugement de l'œil, et l'autre évidemment double.

1376. Nous ne devons pas omettre un autre genre d'observations qui est lié au sujet que nous traitons ici. Nous avons dit que jusqu'alors la chaux carbonatée et le soufre étaient les seules substances qui présentassent deux images du même objet vu à travers deux de leurs faces parallèles (1). Cependant on a indiqué la même propriété dans diverses autres substances, et on l'a même fait entrer comme élément dans la détermination de l'axe de double réfraction relatif à quelques-unes, entre autres à la baryte sulfatée. On parlait de l'observation qu'un rayon incident qui tombait sur un des pans M, restait simple en pénétrant le prisme, lorsqu'il était perpendiculaire au même pan, et se sous-divisait lorsqu'il lui était incliné. M. Bernhardt, dans un mémoire qu'il a publié sur ce sujet, admet, dans tous les corps qui doublent les images, un axe de réfraction auquel se rapportent les phénomènes. Il dit qu'on peut en général apercevoir la double réfraction à travers deux faces parallèles entre elles; qu'elle est simple seulement dans les cas où ces faces sont en même temps parallèles à l'axes et dans celui où elles lui sont perpendiculaires (2). Parmi plusieurs conditions propres à assurer le succès des expériences, il en est une qu'il regarde comme nécessaire à l'égard de certaines substances, et en particulier à l'égard des cristaux de quartz, c'est qu'ils aient plusieurs pouces d'épaisseur; mais il cite une observation faite avec ces mêmes cristaux, et qui n'est pas à son avantage. Il dit que la double réfraction à travers deux faces parallèles et opposées sur les deux pyramides, telles que *cbd* et *msn* (fig. 115), est un peu plus forte que quand on regarde les objets à travers une face d'une pyramide, telle que *cbd* et le pan opposé *hgry*. Nous avons répété ces deux observations, en nous servant d'un cristal d'une belle transparence et d'une forme très prononcée. La première a donné des images qu'il nous était impossible de ne

(1) Traité élémentaire de Physique, deuxième édition, t. II, n° 1179.

(2) Journal de Gehlen, t. IV, p. 230 et suiv.

pas juger simples, tandis que, dans la seconde, elles étaient doubles et écartées l'une de l'autre d'une quantité très sensible. A la vérité le cristal n'avait qu'environ 13 millimètres (près de 6 lignes) d'épaisseur, et la distance entre les deux faces qui avaient servi à la première observation n'était que de 2 centimètres (environ 9 lignes). Mais si nous supposons, par la pensée, que ce cristal ait pris tout-à-coup un accroissement considérable, l'écartement entre les images, dans la seconde observation, augmentera à proportion, et il sera impossible que la double réfraction qui, avant l'accroissement, était encore nulle dans la première observation, puisse jamais atteindre le degré auquel elle sera parvenue dans la seconde; à plus forte raison ne pourra-t-elle le surpasser: une pareille marche mettrait les lois de la lumière en contradiction avec elles-mêmes.

1377. Nous ajouterons que, dans le grand nombre d'expériences que nous avons faites avec des cristaux de diverses substances, auxquels rien ne manquait de ce qui pouvait conduire à des résultats décisifs, jamais les images vues à travers deux faces parallèles, sous toutes les inclinaisons du rayon visuel, n'ont offert le moindre indice d'une double réfraction susceptible d'être saisie par l'œil. Maintenant, si nous raisonnons dans l'hypothèse où son effet aurait été assez peu sensible pour nous échapper, il faudra en conclure qu'il y a un passage brusque entre la même propriété, considérée successivement dans le spath d'Islande où elle agit avec tant d'énergie, et tant d'autres minéraux où elle se fait pour ainsi dire chercher; ce qui est le contraire de ce qu'on observe dans d'autres phénomènes, où les propriétés physiques marchent en allant d'une substance à l'autre par une gradation de nuances. On serait plutôt porté à croire que la chaux carbonatée, par une suite de la nature et de la forme de ses molécules, occupe un rang à part dans la série des corps doués de la double réfraction.

Au reste, nous proposons ces réflexions avec toute la réserve convenable, et nous y attachons d'autant moins d'importance, qu'elles sont étrangères à notre objet principal, qui a été d'indiquer des moyens également simples et faciles pour déterminer dans tous les cas la position de l'axe de double réfraction.

1378. Nous avons vu qu'il y avait pour chaque cristal doué de la double réfraction une limite qui la donnait simple, et qui dépendait de la position respective des faces réfringentes, soit entre elles, soit à l'égard de l'axe. Mais il existe des formes primitives dans lesquelles l'effet de la double réfraction est nul, de quelque manière que les faces à travers lesquelles on regarde les objets soient situées l'une à l'égard de l'autre, et sous toutes les directions du rayon visuel. Ces formes sont celles qui, par une suite du caractère de symétrie et de régularité dont les a marquées la cristallisation, peuvent être regardées elles-mêmes comme les limites des autres du même genre. Elles sont au nombre de trois, savoir : le cube, l'octaèdre régulier, et le dodécaèdre dont la surface est composée de 12 rhombes égaux et semblables, tous inclinés entre eux de 120^{d} . La forme du tétraèdre régulier, à raison de son aspect symétrique, doit être réunie aux trois précédentes; mais nous ne connaissons aucun minéral transparent qui la présente. Parmi les substances auxquelles appartiennent les autres, et qui se prêtent, au moins dans certains cas, à l'observation dont nous avons parlé, nous citerons, pour le cube, la magnésie boratée et la soude muriatée dite *sel gemme*; pour l'octaèdre régulier, le diamant et la chaux fluatée; et, pour le dodécaèdre à plans rhombes, le grenat.

1379. Chacune des formes dont il s'agit est commune à des minéraux de différentes espèces (1), et il y a tout lieu de croire que la propriété de donner des images simples est générale pour toutes; mais il n'est pas prouvé qu'elle ne soit pas susceptible d'exister aussi dans quelques-unes des formes qui ne sont pas des limites. Nous avons déjà fait quelques observations qui ne paraissent laisser aucun doute à cet égard. Mais avant de les publier, nous nous proposons d'y mettre le dernier degré de précision

(1) Nous avons donné, dans la *Cristallographie*, à l'article qui a pour titre, *des formes communes à différentes espèces*, la solution de la difficulté qui paraît naître de l'adoption d'une même forme dans des substances de diverse nature, relativement à la distinction des espèces minérales.

et de les étendre à d'autres substances qui nous ont déjà offert quelques indices de la même propriété.

Sous-division des Corps naturels, déduite de la double Réfraction.

1380. Les effets de la double réfraction que nous ont offerts plusieurs des corps cités dans l'article précédent, peuvent déjà faire juger de la latitude que parcourt cette propriété en allant d'une espèce à l'autre. Nous allons en citer de nouveaux exemples qui, joints aux premiers, serviront à donner une idée de la gradation que suit cette propriété considérée dans l'ensemble des corps naturels. La substance qui paraît la posséder au plus haut degré est le zircon, vulgairement appelé *jargon de Ceylan*. Ayant détaché de l'un de ses cristaux le prisme à base carrée qui en faisait partie, nous avons fait naître une facette artificielle à la place d'une des arêtes au contour de sa base supérieure. Les images des barreaux d'une fenêtre vus à travers cette facette et le pan situé du côté opposé ont été fortement doublées à la distance de 2 mètres (6 pieds). L'angle réfringent n'était que de 21^{d} .

1381. La pierre précieuse dite *péridot* (chrysolite des Allemands) est, après le zircon, une de celles sur lesquelles la même propriété agit avec le plus d'énergie. Sa forme primitive est un prisme à base rectangle, qui, dans le cristal employé à nos observations, était terminé par une pyramide droite quadrangulaire. L'une des deux faces réfringentes était une face de pyramide qui naissait sur un des grands côtés de la base; l'autre était le pan opposé. L'écartement des images des mêmes barreaux a été à peu près le même que dans l'expérience faite avec le zircon; mais nous étions placés à la distance de 3 mètres, et l'angle réfringent était de $38^{\text{d}} 20'$.

1382. Vient ensuite la variété de pyroxène dite *diopside*, qui a pour forme primitive un prisme rhomboïdal oblique, représenté *fig. 125*, dans lequel l'inclinaison mutuelle des pans M, M est de $87^{\text{d}} 42'$, et celle de la base P sur l'arête adjacente H est de $106^{\text{d}} 6'$. Nous avons regardé les mêmes barreaux à travers

une facette triangulaire artificielle *ofl* (*fig.* 126), qui interceptait l'angle solide *b* au contour de la base, et à travers une face naturelle *stux*, qui remplaçait l'arête *df*, située du côté opposé, parallèlement à une autre que la cristallisation avait produite à la place de l'arête antérieure *H*, ainsi que l'exigeait la symétrie. Les images ont présenté à peu près le même aspect à une égale distance. L'angle réfringent était de 36^{d} à peu près.

1383. En suivant la gradation, on arrive à la topaze et au quartz, que nous avons déjà cités, et dont la réfraction est sensiblement moins forte que celle des substances précédentes. Nous avons parlé aussi de celle de l'émeraude, qui est peut-être la plus faible de toutes, et dont celle du corindon est voisine. La forme primitive de celui-ci est un rhomboïde un peu aigu, dans lequel l'inclinaison de deux faces situées vers un même sommet est de $86^{\text{d}} 38'$. Ici nous étions obligés de prendre une épingle pour objet de la vision. Les deux faces réfringentes avaient les mêmes positions respectives que les faces *P* et *hgry* (*fig.* 115) du cristal de quartz employé à l'une des observations que nous avons citées plus haut. Mais il fallait écarter l'épingle de toute la longueur du bras pour apercevoir la distinction des images.

1384. La lumière, en traversant les portions de cristaux comprises entre les deux faces réfringentes, se décompose, comme dans l'expérience du prisme, en rayons de diverses couleurs qui donnent aux images un aspect irisé. Lorsque la double réfraction est très forte, comme dans le zircon, on peut employer, comme objet, la flamme d'une bougie. La lumière qui en émane avive les couleurs que la distance entre les images fait mieux ressortir, et l'expérience devient susceptible d'être vue avec intérêt, même par ceux à qui la Physique est étrangère.

De la Diffraction de la Lumière.

Grimaldi a remarqué le premier que les rayons lumineux qui passent près des extrémités des corps subissent des inflexions qui les écartent de leur route directe, et il a même observé les diverses circonstances relatives à ce phénomène, tel que nous allons

le décrire. Nous nous bornerons ici aux expériences principales à l'aide desquelles on peut le produire.

1385. Si l'on introduit un faisceau de lumière dans une chambre obscure par un très petit trou, et qu'ayant exposé à cette lumière un corps d'une forme délicate, tel qu'un fil de fer, on reçoive l'ombre de celui-ci sur un carton blanc ou sur un verre légèrement dépoli, derrière lequel on place l'œil, on remarque que l'ombre de ce corps est beaucoup plus large qu'elle n'aurait dû l'être si les rayons avaient été raser ses extrémités. On remarque de plus, que l'ombre est bordée à l'extérieur de franges de diverses nuances de couleurs et de différentes largeurs, et l'on voit dans son intérieur des franges, les unes brillantes, les autres obscures, qui la partagent en intervalles égaux, et dont les premières sont colorées comme celles qui se montrent à l'extérieur.

Ce phénomène, auquel Newton avait donné le nom d'*inflexion de la lumière*, que l'on a changé depuis en celui de *diffraction de la lumière*, a été attribué pendant long-temps à une force répulsive que le corps mince exerçait sur la lumière, et en vertu de laquelle les rayons subissaient des inflexions plus ou moins sensibles, suivant qu'ils passaient plus ou moins près du corps dont il s'agit.

Newton a fait un grand nombre d'expériences sur le même sujet, qui, entre autres défauts, ont celui de donner des résultats incomplets, par une suite de ce que les franges colorées qui occupent l'intérieur des ombres lui avaient échappé. Il semble avoir annoncé lui-même qu'il ne regardait pas comme évidentes les conséquences auxquelles paraissaient conduire les mêmes résultats, en plaçant l'exposé qu'il en avait fait dans ses questions sur l'Optique, et il paraît les avoir eu en vue, lorsqu'il demande si l'on ne peut pas dire que les corps agissent sur la lumière, à une certaine distance, de manière à en infléchir les rayons par une force d'autant plus grande que cette distance est plus petite.

1386. Cette cause de la diffraction, que Newton présumait être la véritable, avait été généralement adoptée par les physiciens.

lorsque l'Académie royale des Sciences, ayant proposé pour sujet du prix de Physique qu'elle donne chaque année, l'explication du même phénomène, couronna le mémoire dans lequel M. Fresnel, ingénieur des Ponts et Chaussées, également distingué par ses connaissances en Physique et en Géométrie, avait déduit cette explication du système des ondulations.

1387. Le savant auteur du mémoire oppose d'abord, à celle qui est fondée sur l'hypothèse de l'émission, un résultat de ses propres observations, qui tend à la rendre inadmissible. Car, pour que les faits fussent d'accord avec elle, il faudrait que la nature du corps près duquel passerait la lumière et la figure de ses bords eussent une influence marquée sur la dilatation du faisceau composé de cette lumière. Mais des expériences variées et des mesures précises prouvent au contraire que cette influence est nulle; et, pour nous borner à un seul fait qui est très simple, on observe que les bandes diffractées ont précisément le même éclat et la même disposition, soit qu'elles aient été produites sur le dos d'un rasoir ou sur son tranchant.

1388. Maintenant, pour nous faire une idée de la manière dont M. Fresnel explique la diffraction, rappelons-nous que, dans une onde dont toutes les molécules ne sont sollicitées que par leurs propres forces ou par celles des ondes voisines, les pressions latérales se détruisent mutuellement, en sorte qu'il n'y a de mouvement que dans les directions perpendiculaires à la surface. Mais si une portion de quelque onde se trouve interceptée ou arrêtée dans sa marche par l'interposition d'un corps étranger, on conçoit que l'équilibre étant rompu entre les pressions transversales, il doit en résulter dans les divers points de l'onde une disposition à envoyer des rayons suivant de nouvelles directions.

1389. C'est de ce dérangement qu'a subi le système des actions primitives que proviennent, ainsi que nous le verrons bientôt, les franges, les unes colorées, les autres obscures, qui se forment à l'extérieur du corps interposé, ou qui, semblables aux premières, naissent dans l'intérieur de son ombre. La production de celles-ci nécessite le concours de deux ondes parties des deux

côtés du corps interposé, et dont les rayons, en se croisant; exercent leur influence les uns sur les autres. C'est en cela que consiste le principe des interférences, découvert par M. Thomas Young, et qu'il a consigné dans les Transactions philosophiques de la Société royale de Londres, pour l'année 1817. Il en a confirmé l'existence par une expérience très remarquable, dans laquelle il arrêta, au moyen d'un écran opaque, la portion de lumière qui venait de raser, ou qui était sur le point de raser un seul des deux bords du corps interposé, et à l'instant la totalité des bandes lumineuses qui sont formées dans l'ombre intérieure disparaissait, quoique les rayons qui passaient près du bord opposé continuassent leur route.

1390. M. Fresnel, après avoir déterminé par des formules qu'il manie avec beaucoup d'adresse, la vitesse des vibrations produites dans les molécules, d'un nombre quelconque d'ondes lumineuses de même longueur, et qui se propagent suivant une même direction, combine les mêmes formules avec le principe d'Huygens et avec celui des interférences, pour soumettre au calcul les diverses circonstances du phénomène de la diffraction.

1391. Parmi les divers résultats qu'il a obtenus, nous citerons celui qui l'a conduit à expliquer la différence entre les franges lumineuses et les franges obscures dont nous avons parlé, d'après les rapports entre les vibrations des rayons lumineux qui concourent en un même point. Tantôt ce rapport est tel, que les actions des rayons s'entre-détruisent, et ces rayons se trouvant alors en *distordance*, suivant l'expression de l'auteur, la lumière s'éteint dans les points où ils concourent, et de là les franges obscures. Tantôt le rapport laisse subsister l'effet des vibrations, et l'accord qui en résulte donne naissance aux franges lumineuses et colorées. L'auteur prouve que les portions de courbes produites par les inflexions de ces dernières franges sont des arcs d'hyperbole.

1392. En même temps que le système des ondulations fournit l'explication d'un phénomène qui échappe à la théorie fondée sur le système de l'émission, il se prête également à celle de la réflexion et à celle de la réfraction, comme le fait voir M. Fresnel,

en associant aux résultats qu'il a obtenus les principes d'Young et d'Huygens. Ainsi, à ne considérer que les faits contenus dans les mémoires du même savant, l'avantage serait plutôt du côté d'Huygens que de Newton. Mais, pour juger auquel des deux il doit rester, il faut comparer leurs systèmes sous tous les rapports susceptibles d'offrir des motifs de préférence en faveur de l'un ou de l'autre, et c'est ce que nous allons essayer de faire avec toute l'impartialité qu'exige une discussion d'un aussi grand intérêt.

1333. Nous observerons d'abord que le système des ondulations présente aussi des difficultés dont une des plus embarrassantes a pour elle une autorité d'autant plus importante, qu'elle a été émise avec cette droiture qui sied si bien aux hommes de génie, par l'auteur même du système dont il s'agit. Parmi les divers phénomènes que présentent les rhomboïdes de spath d'Islande, un des plus remarquables, que nous avons cité plus haut, est celui qui a lieu dans l'expérience où deux de ces rhomboïdes étant superposés, les deux rayons qui les traversent et qui restaient simples lorsque les coupes principales étaient parallèles ou faisaient entre elles un angle droit, se sous-divisent chacun en deux nouveaux rayons, dans tous les cas où les deux coupes sont inclinées l'une sur l'autre. Huygens ne conçoit pas comment deux ondes de lumière acquièrent, en traversant un premier rhomboïde, une forme et une disposition en vertu desquelles chacune d'elles puisse mettre en mouvement dans le second rhomboïde deux portions différentes de matières susceptibles de donner deux réfractions, lorsque ce rhomboïde est tourné dans un certain sens, et n'en faire mouvoir qu'une seule lorsqu'il est tourné dans un autre sens. Huygens finit par avouer qu'il n'a rien pu trouver qui l'ait satisfait sur la manière dont les choses se passent dans cette expérience (1).

1394. M. Malus va plus loin, et cet habile physicien, qui a mis autant de justesse que de sagacité dans l'étude des diverses

(1) *Quo autem pacto id fiat, nihil reperire potui quod mihi satisfaceret.* Christ. Eugenio Opera reliqua. Amstelod., 1728, p. 68 et 69.

actions de la lumière, regarde comme étant bien plus contraires encore à l'hypothèse des ondulations, ses expériences dans lesquelles un rayon de lumière, réfléchi successivement par deux glaces sous le même angle d'incidence, reste simple ou se sous-divise, suivant les positions respectives que l'on donne à ces glaces; « ce qui ne peut avoir lieu, ajoute M. Malus, dans le » système des ondulations; » d'où il conclut non-seulement que la lumière est une substance soumise aux forces qui animent les autres corps, mais de plus que la forme et la disposition de ses molécules ont une grande influence sur les phénomènes (1).

1395. Après tout, la difficulté qui naîtrait d'un très petit nombre de faits que la science, en reculant ses limites, pourra faire rentrer un jour dans le système de l'émission, serait loin de suffire pour faire donner à ce système une exclusion contre laquelle réclameraient tant d'autres phénomènes dont il fournit des explications si simples et si heureuses. Mais il y a mieux, c'est que la discussion présente ne porte que sur la cause physique de ces phénomènes, et que tout s'y passe comme si le système de l'émission était le véritable, en sorte que, suivant la remarque d'Euler, les rayons, dans l'un et l'autre, nous sont représentés par des lignes droites tant qu'ils restent dans le même milieu transparent, et ne s'infléchissent pour subir la réfraction qu'au passage d'un milieu dans un autre (2).

1396. Ainsi la ligne droite qui caractérise l'émission est à la fois l'élément de toutes les constructions géométriques que nous traçons, et de tous les calculs que nous employons dans la solution des problèmes relatifs à l'Optique et à la Dioptrique; il semble que la Physique n'ait fait ici autre chose que de prendre la forme de la Géométrie pour s'accorder avec elle-même. De là il résulte qu'en nous occupant de ces sujets, nous nous sommes tellement accoutumés à voir par la pensée ce que nos yeux eux-mêmes semblent nous dire à l'aspect des corps lumineux, savoir, qu'ils

(1) Théorie de la double Réfraction, p. 238 et 239.

(2) Lettres à une Princesse d'Allemagne, t. I, p. 137.

nous envoient directement des rayons émanés de leur substance qu'il faudrait des preuves aussi nombreuses qu'évidentes pour nous forcer de substituer dans nos idées à leurs mouvemens rectilignes les ondes d'une matière subtile ébranlée par les agitations des mêmes corps.

De la Lumière polarisée.

Polarisation dans laquelle la Lumière conserve sa blancheur, et Notion de cette propriété.

1397. En réfléchissant sur les circonstances des phénomènes produits par la double réfraction qui ont été décrits précédemment, on remarque une différence sensible entre la lumière qui a déjà traversé un corps doué de cette propriété, et celle qui, après avoir parcouru l'espace, arrive sous une direction oblique à la surface d'un des mêmes corps, dans lequel la partie de ses rayons qui a échappé à la réflexion est réfractée. Celle-ci, quelle que soit sa direction, se sous-divise toujours en deux faisceaux, qui subissent, l'un la réfraction ordinaire, l'autre la réfraction extraordinaire; l'autre, en poursuivant sa marche, reste simple lorsqu'elle est dans le plan de la section principale ou dans un plan perpendiculaire à ce dernier, et elle se sous-divise dans tous les autres plans.

1398. M. Malus a découvert une analogie très remarquable entre la lumière qui a subi une réflexion partielle à la surface d'un corps, et celle qui sort d'un corps doué de la double réfraction. Cette analogie se rapporte à deux faits que nous allons faire connaître successivement. Le premier consiste en ce que la lumière réfléchie dont nous venons de parler, lorsque sa réflexion s'est faite sous un certain degré d'obliquité, et qu'elle entre ensuite dans un corps à double réfraction, y subit les mêmes modifications que si elle avait déjà passé à travers un premier corps doué de la même propriété, dont la section principale coïncidât avec le plan suivant lequel elle s'était d'abord réfléchie. Pour mieux faire concevoir cette corrélation, supposons que *ab* (*fig. 127*)

soit la projection verticale d'une glace non-étamée, et que nm représente un rayon de lumière incidente, qui rencontre cette glace sous un angle nmb d'environ 35^{d} . Il se réfléchira, en faisant avec la glace l'angle de réflexion oma égal au premier. Supposons maintenant que l'on présente au rayon mo un corps doué de la double réfraction dont la section principale gk/h soit sur le prolongement du plan amo suivant lequel s'est faite la réflexion du rayon nm . Le rayon mo passera dans le corps à double réfraction sans se sous-diviser, en prenant une direction telle que or , qui se rapportera à la réfraction ordinaire. Si au contraire la section principale de ce même corps était perpendiculaire au plan amo , le rayon mo resterait de même simple, en le pénétrant, avec la différence qu'il y subirait la réfraction extraordinaire. Dans toutes les positions respectives intermédiaires entre les deux précédentes, le rayon mo se sous-divisera en deux rayons qui subiront les deux espèces de réfraction (1). La quantité de rayons partiels ordinaires provenant de cette sous-division ira en diminuant, tandis que la quantité de rayons extraordinaires augmentera, jusqu'à ce que la première s'évanouisse.

1399. Nous sommes maintenant en état d'expliquer ce qu'on doit entendre par *lumière polarisée*. Nous raisonnerons dans l'hypothèse admise par Newton, savoir, que les molécules de la lumière ont des pôles sur lesquels agissent celles des corps doués de la double réfraction, que traversent les rayons de ce fluide. Parmi ces corps, nous choisirons comme exemple le rhomboïde du spath d'Islande. Nous avons vu que chacun des deux faisceaux émanés de la lumière directe à laquelle on a présenté un de ces rhomboïdes, n'était plus susceptible, après en être sorti, de se sous-diviser, en traversant un nouveau rhomboïde dont la section principale était parallèle ou perpendiculaire à celle du premier. Or, cette propriété dérive de ce qu'en vertu de l'action que le premier rhomboïde exerçait sur les molécules de chaque fais-

(1) Nous nous conformons ici au langage reçu, d'après lequel on désigne souvent par le mot de *rayon* un faisceau de lumière qui est un assemblage de rayons.

ceau, elles tournaient toutes à la fois dans le même sens les pôles analogues à cette action, d'où résultait, dans tous les rayons dont le faisceau était l'assemblage, une tendance générale et permanente à ne subir qu'une seule réfraction, en passant dans un second rhomboïde, pourvu que la section principale de celui-ci fût dans une des positions d'où dépend l'action de ses molécules sur les pôles des molécules lumineuses. Or, l'effet de la glace qui reçoit les rayons sous un angle de $35^{\text{d}} 25'$ est absolument le même, par rapport à ces rayons, que celui qu'a produit le premier rhomboïde à l'égard du faisceau qui, en le traversant, a subi la réfraction ordinaire. Tous ces rayons ont leurs pôles homologues tournés dans le même sens; tous sont disposés de la même manière, d'où il suit que le faisceau qui en est l'assemblage reste simple, en pénétrant le rhomboïde dont le quadrilatère *ghkl* représente la coupe principale. C'est l'uniformité de leur disposition, dépendante de l'angle sous lequel ils ont été réfléchis par la glace, qui est le caractère distinctif de la lumière polarisée.

Dans toutes les incidences qui précèdent celle dont il s'agit ici, il y a toujours un certain nombre de rayons déjà polarisés, mêlés à ceux qui ne le sont pas encore, et qui va en croissant à mesure que l'incidence se rapproche de la limite à laquelle répond la polarisation complète du faisceau. Il en est encore de ce dernier comme de celui qui, ayant passé d'un rhomboïde de spath d'Islande dans un autre, arrive par degrés de l'état de réfraction ordinaire à celui de réfraction extraordinaire, ou réciproquement, à mesure que, pendant le mouvement d'un des deux rhomboïdes, les deux sections principales approchent d'être perpendiculaires entre elles.

1400. D'après ce qui précède, on voit que la propriété dont jouit un rayon polarisé, de se trouver en prise ou d'échapper tout entier aux forces réfringentes des cristaux, dépend uniquement du sens dans lequel les molécules lumineuses tournent leurs pôles, relativement aux centres d'action de ces forces, en sorte que le même rayon doit se comporter différemment à l'égard d'un corps cristallisé, qu'il rencontre d'ailleurs sous une incidence constante, suivant qu'il se présente à sa surface par

tel ou tel côté. Il importe donc de connaître le sens dans lequel il a été polarisé, pour être en état de déterminer d'avance son mode d'action sur une substance diaphane dont la position est donnée. Or, lorsqu'un rayon a été réfléchi par une lame de verre sous l'angle de 35^{d} environ, les forces réfléchissantes ayant déterminé ses molécules à tourner dans le plan même de réflexion les pôles qui sont analogues à leur action, on dit alors que le rayon a été polarisé dans le sens de ce plan, que l'on appelle aussi pour cette raison le *plan de polarisation*.

1401. M. Malus a fait la remarque que toutes les fois qu'on produit par un moyen quelconque un rayon polarisé dans un certain sens, on obtient nécessairement un second rayon polarisé dans un sens perpendiculaire au premier (1). Ainsi, lorsqu'un rayon de lumière traverse un rhomboïde de spath d'Islande, en se divisant, le rayon ordinaire est polarisé dans le sens de la coupe principale, et le rayon extraordinaire l'est dans un plan perpendiculaire à cette coupe. Lorsqu'un rayon lumineux tombe sur une lame de verre sous l'angle de $35^{\text{d}} 25'$, toute la lumière réfléchie est polarisée dans le plan de réflexion, et celle qui traverse la glace l'est en grande partie dans un plan perpendiculaire au premier.

Détermination approximative du Maximum de Polarisation relatif à une Substance donnée.

1402. L'angle sous lequel la polarisation est complète varie d'une substance à l'autre. En général, il décroît à mesure que la force de la réfraction augmente. M. Brewster a découvert, dans cette dépendance mutuelle de la lumière réfléchie et complètement polarisée avec la lumière réfractée, une tendance générale vers une limite dont elle ne s'écarte que d'une petite quantité. Elle consiste en ce que le rayon réfracté est, à peu de chose près, perpendiculaire au rayon réfléchi. Il en résulte que le rapport

(1) Voyez les Mémoires de l'Institut, année 1810, 2^e partie.

entre le cosinus et le sinus de l'angle d'incidence du rayon polarisé sur la surface réfléchissante est égal au rapport entre le sinus de l'angle que fait ce même rayon avec la verticale et le sinus de réfraction, d'où il suit que, connaissant ce dernier rapport qui est constant, on en déduit la mesure de l'angle qui répond à la polarisation (1).

Nouvelle expérience dans laquelle la Lumière reste blanche en se polarisant.

1403. Revenons maintenant au second fait découvert par M. Malus, et, pour en avoir une idée, substituons au corps doué de la double réfraction, employé dans l'expérience précédente, une seconde glace qui réfléchisse, sous le même angle d'incidence, les rayons renvoyés par la première. Le plan de réflexion relatif à cette incidence s'assimile alors, autant que le permet la nature du corps qui reçoit la lumière, à la section principale de celui dont il a pris la place.

Soit toujours ab (fig. 128) la projection horizontale de la pre-

(1) Soit xz (fig. 129) la surface réfléchissante, bcn l'angle d'incidence de la lumière polarisée, et fer , l'angle de réflexion. Du point c , pris pour centre, et d'un intervalle quelconque cb pris pour rayon, décrivons une circonférence de cercle hbd . La perpendiculaire bn menée sur la surface xz sera le sinus de l'angle d'incidence, et la ligne cn en sera le cosinus. De plus, si nous menons la verticale ch , le sinus ba de l'angle bck relatif à cette verticale sera égal au cosinus cn déjà désigné. Soit cd le rayon réfracté, et dg le sinus de réfraction. D'après l'observation faite par M. Brewster, l'angle red est droit, ou à peu près. Donc l'angle def , ou son égal edg , est le complément de l'angle fer , ou, ce qui revient au même, de l'angle bcn . Donc, l'angle deg qui, à son tour, est le complément de edg , est égal à l'angle bcn . De là il résulte que le sinus de réfraction dg est égal au sinus d'incidence bn ; d'ailleurs le sinus ab de l'incidence relative à la réfraction est égal au cosinus cn donné par la réflexion, d'où l'on déduit le rapport proposé. Ainsi, lorsque la surface xz est celle de l'eau, le rapport entre ba et dg est celui de 4 à 3, d'où il suit que cn est à bn dans le même rapport. On en conclut, à l'aide du calcul, que l'angle $bcn = 36^{\text{d}} 52'$. M. Malus, qui a déterminé cet angle par l'observation, l'a trouvé de $37^{\text{d}} 15'$, c'est-à-dire plus fort de $23'$ que le précédent.

mière glace. Soit yz celle de la seconde, que nous supposons d'abord être parallèle à l'autre. Soit de plus mt le rayon réfléchi par celle-ci; il se réfléchira de nouveau sur la glace yz , suivant une direction tx , située dans le plan mty , et qui fera avec yz un angle de 35^d , en sorte qu'il n'y aura aucune différence entre l'effet de cette réflexion et celui de la première. Concevons maintenant que la glace yz tourne autour du rayon mt , de manière que celui-ci conserve à son égard la même inclinaison. Au terme où la position du plan de réflexion mty sera devenue perpendiculaire à celle qu'il avait dans le premier instant, ou, ce qui revient au même, à celle du plan bmn , toute la lumière que la glace réfléchissait aura disparu. A mesure qu'en partant de sa première position elle parcourt tous les intermédiaires compris entre cette position et la seconde, la quantité de rayons partiels contenue dans le rayon réfléchi tz va en diminuant, en sorte qu'elle finit par s'évanouir.

1404. Il ne sera pas inutile de comparer la marche de ce dernier phénomène avec celle du précédent, pour en saisir les rapports et les différences. Dans le premier cas, à mesure que la section principale $hklg$ (*fig. 127*) s'incline vers le plan de réflexion amo , le faisceau or cède à la réfraction extraordinaire une partie de ses rayons, qui va toujours en augmentant, jusqu'à ce que le faisceau entier se trouve soumis à la même réfraction, en sorte qu'il n'y a de changé que l'aspect sous lequel se présente le phénomène. Dans le second cas, la quantité de rayons que conserve la lumière réfléchie subit les mêmes variations, à mesure que les deux plans de réflexion s'inclinent l'un sur l'autre; mais la partie qui s'en détache disparaît en pénétrant la glace, où elle subit la réfraction ordinaire, en sorte que le phénomène finit par être, à l'égard de l'œil, comme s'il n'avait pas existé.

Nous n'avons considéré, dans les deux faits qui précèdent, que ce qui se passe pendant la rotation de la section $hklg$ (*fig. 127*), ou du plan de réflexion yx (*fig. 128*), depuis l'origine du mouvement jusqu'au terme qui en est éloigné de 90^d . Nous reviendrons bientôt sur le même sujet, et nous exposerons avec détail la manière dont les mêmes effets se répètent successivement en

sens contraire, ou suivant le même ordre, dans les autres parties de la circonférence.

Description et usage d'un appareil simple et facile à manier, destiné aux expériences sur la Lumière polarisée.

1405. Les faits dont nous venons de parler, et tous les autres qui doivent suivre, occupent un des premiers rangs parmi ceux qui sont si remarquables, qu'il faut les avoir vus pour en concevoir une juste idée; mais, d'une autre part, ils sont de nature à ne pouvoir être observés que solitairement. C'était pour nous un motif encore plus puissant de nous conformer ici à notre usage ordinaire, en indiquant, à ceux qui étudient la physique de la lumière, un appareil simple et peu dispendieux, à l'aide duquel il leur fût facile de faire eux-mêmes les expériences relatives aux phénomènes dont il s'agit. Nous sommes redevables de celui dont nous nous servons à l'amitié de M. Fauquet, qui en a doublé le prix en voulant bien l'exécuter lui-même. C'est une nouvelle preuve de l'avantage qu'a son auteur de réunir à des connaissances variées le talent d'un habile artiste, dont il fait hommage aux sciences qu'il cultive, en le dirigeant vers ces moyens ingénieux d'observation, qui rendent sensible à l'œil la marche des phénomènes, et aident l'esprit à en mieux saisir la théorie.

1406. On distingue, dans l'appareil dont nous venons de parler, une partie fixe qui est commune à toutes les expériences, et différentes pièces dont l'usage est limité, et que l'on met en place, suivant que le besoin l'exige. La partie fixe que représente la figure 130 a pour base une tablette de bois ayant la figure d'un rectangle, dont le grand côté est d'environ 23 centimètres (8 pouces $\frac{1}{2}$), et le petit côté de 8^{cent}, 5 (3 pouces). Cette tablette est garnie, vers une de ses extrémités, d'une glace GINI, non-étamée et noircie en dessous. Au-delà de cette glace s'élève, à égale distance entre les grands côtés de la tablette, une plaque de bois PZYX taillée en trapèze, qui sert de support à un cylindre

creux OF de carton ou de fer-blanc, dont la longueur est de 15 centimètres (5 pouces $\frac{1}{2}$), et le diamètre de 4^{cent} , 5 (1 pouce 8 lignes). L'angle que forment entre eux les grands côtés PZ, XY du trapèze est de $35^{\text{d}} 25'$, d'où il suit que l'axe du cylindre fait le même angle avec le plan de la tablette. Le bas de ce cylindre est occupé par un bout de tuyau fait en carton, et d'environ trois centimètres de longueur, qui n'y entre que jusqu'à une distance de trois ou quatre millimètres de son extrémité. Là il est arrêté par une espèce de collier fixé sur sa circonférence, et fait d'une lame de carton qui a été taillée en forme d'octogone régulier, et percée d'une ouverture circulaire, ainsi qu'en le voit fig. 131, par laquelle passe le bout de tuyau dont nous avons parlé. Le tout est disposé de manière que l'on peut imprimer à la lame octogonale et au bout de tuyau qui adhère à son ouverture, un mouvement commun de rotation autour de l'axe du cylindre. Nous indiquerons bientôt l'usage de ce tuyau.

1407. Parmi les pièces mobiles que nous avons annoncées, nous décrirons d'abord celle que représente la figure 132. Sa partie principale est un assemblage de deux prismes octogones réguliers, faits en carton, dont chacun est terminé seulement d'un côté par une base, et ouvert du côté opposé. Telle est la manière dont ils sont assortis, que l'un sert d'étui à l'autre, ce qui donne la facilité de les séparer, pour placer dans l'intérieur un rhomboïde de spath d'Islande, ainsi que nous le dirons. On a pratiqué une large ouverture circulaire *or* à chacune des bases. Celle de ces ouvertures que désigne la lettre *o* communique avec la cavité d'un tuyau *gh* qui adhère par le haut à sa circonférence, et dans lequel on introduit du côté opposé la partie supérieure du cylindre OF (fig. 130), de manière que l'on peut faire mouvoir le tuyau autour de l'axe de ce cylindre. L'autre ouverture, dont la fonction est de transmettre à l'œil les rayons qui ont passé à travers le rhomboïde, est bordée d'une naissance de tuyau *mn*, destinée à intercepter toute autre lumière que celle qui arrive de l'intérieur.

La boîte que nous venons de décrire est remplacée dans une grande partie des expériences par une espèce de cage (fig. 130 bis)

pour l'usage est tout différent. Pour mieux en faire concevoir la construction, supposons six lames rectangulaires de bois, égales et semblables deux à deux, et réunies par leurs bords sous la forme d'un parallélépipède rectangle *hy* (*fig. 133*), dans lequel les côtés *B, C* de la base soient entre eux à très peu près comme 7 est à 6. Quant à la hauteur *G*, qui est arbitraire, M. Fauquet a pris le parti le plus simple, qui est de la faire égale au côté *B*, d'où il suit que le pan *slhp* est un carré. Maintenant, prenons sur chacun des côtés *sy, pu*, une partie *ns* ou *pm* qui en soit $\frac{1}{6}$; puis, ayant tracé les lignes *gn, om*, coupons le parallélépipède par un plan *gnmo* qui coïncide avec elles. Le solide alors sera semblable à celui que représente séparément la figure 134, et dont il est aisé de faire le rapprochement avec celui dont il dérive. Pour assortir ce solide à sa destination, il faut garnir intérieurement le pan *gnmo* d'une glace non étamée et noircie en dessous, et laisser le pan *lsph* à jour. D'après les dimensions indiquées, l'angle que forme cette glace avec le pan *hlgo* est de 55^{d} . Pour terminer l'exécution de la pièce dont ce solide n'offre qu'une partie, on pratique dans le pan *gkh* (*fig. 135*) une ouverture circulaire *x*, à laquelle on adapte un tuyau par une de ses extrémités, près de laquelle il est garni d'un collet de figure octogone, semblable à celui dont nous avons parlé plus haut. Lorsqu'on veut faire usage de la pièce dont il s'agit, on introduit le haut du cylindre dans la partie inférieure du tuyau, après quoi on peut, à volonté, faire tourner celui-ci soit dans un sens, soit dans l'autre, de manière qu'il entraîne dans son mouvement l'octogone *hg* et le solide *nh*, auquel il adhère.

Une troisième pièce qu'il nous suffira d'indiquer, consiste dans un prolongement que l'on ajoute au cylindre qui est dans l'appareil, et à l'aide duquel l'axe de celui-ci, qui n'était que de 15 centimètres, environ 5 pouces $\frac{1}{2}$, s'accroît jusqu'à environ 40 centimètres (15 pouces). On ne se sert de ce prolongement que dans une seule expérience, que nous citerons bientôt.

1408. M. Fauquet a joint aux différentes pièces que nous venons de décrire, un certain nombre de diaphragmes, dont l'usage facilite et abrège les expériences. Ce sont des cercles de carton

qui, à l'exception d'un seul, dont nous parlerons plus bas, ont tous le même diamètre, et dont telle est la mesure que l'on peut les introduire dans la cavité du cylindre, de manière qu'ils y fassent l'office de cloisons transversales. Les uns sont percés à l'endroit de leur centre d'un trou d'environ 2 millimètres (près d'une ligne) de diamètre, dont l'image est transmise à l'œil au moyen de la lumière à laquelle il donne passage. Les autres ont été évidés jusqu'à une petite distance de leur circonférence, et ce qui en reste sert de cadre à une lame circulaire d'une substance diaphane, dont l'action modifie la lumière qui la traverse. Tous ces diaphragmes se remplacent l'un l'autre à un endroit voisin de la base inférieure du cylindre. Nous avons dit qu'il y avait en cet endroit un bout de tube engagé par le haut dans la lame octogonale que représente la figure 131. C'est au fond de ce tuyau que l'on place les diaphragmes, dont les bords reposent sur une bande circulaire de carton attachée à ce même fond. Le diaphragme étant placé, on emploie, pour le maintenir dans une position fixe, un second bout de tuyau que l'on introduit dans le premier, jusqu'à ce que son bord inférieur agisse par pression sur ce même diaphragme.

La description précédente excède les bornes que nous aurions dû nous prescrire, si nous ne nous étions proposé que de faire concevoir l'usage de l'appareil qui en est le sujet; mais elle aura rempli notre but, si nous n'y avons omis aucun des détails nécessaires pour en diriger l'exécution.

149. Pour vérifier, à l'aide de l'expérience, le premier des faits découverts par M. Malus, on placera un rhomboïde de spath d'Islande dans la boîte octogonale (*fig. 132*), et on l'y fixera de manière que la diagonale oblique de la face opposée à celle qui sera en contact avec le fond de la boîte soit parallèle à une ligne menée par le centre de l'octogone *es* (*fig. 131*), et par les milieux de deux côtés parallèles, tels que *ek*, *ys*. On marquera de deux indices les points qui répondent à ces milieux. On mettra ensuite la boîte sur l'appareil, comme nous l'avons dit; puis on garnira la circonférence inférieure du cylindre d'un diaphragme percé à son centre. On fera tourner la boîte jusqu'à ce que la ligne me-

née par les deux indices dont nous avons parlé ait pris une position verticale; on sera sûr alors que la section principale du rhomboïde coïncide elle-même avec un plan vertical. Maintenant, si l'on dispose l'appareil de manière que la glace soit tournée vers la lumière, les rayons incidens qui font avec elle un angle de 35^{d} sous lequel ils sont polarisés, après s'être réfléchis en sens contraire de la même quantité, passeront par le trou du diaphragme, en se dirigeant dans le sens de l'axe du cylindre, et, arrivés au rhomboïde, le traverseront suivant le plan de sa section principale. En regardant alors par l'ouverture F (fig. 132), on verra, dans la région de la coupe principale du rhomboïde, une image simple du trou du diaphragme, sous l'aspect d'un petit cercle de lumière blanche. Supposons que, dans cet état de choses, l'angle obtus de la coupe principale soit tourné vers le haut. Si l'on fait prendre à la boîte octogone un mouvement lent de rotation, soit d'un côté, soit de l'autre, on verra paraître une seconde image, en dessous de la première. Elle sera d'abord très faible, mais bientôt elle acquerra une intensité qui augmentera de plus en plus, à mesure que l'arc de rotation s'accroîtra lui-même, et qui atteindra son *maximum* au terme où cet arc étant de 90^{d} , la section principale sera devenue perpendiculaire au plan de réflexion de la lumière reçue par la glace. Pendant le même temps, la première image perdra continuellement de sa force, et elle finira par s'évanouir au terme où l'intensité de la première aura pris tout son accroissement.

Il est facile de s'assurer que celle-ci est produite par la réfraction ordinaire, en observant la seconde à sa naissance. On remarquera qu'elle coïncide alors avec un point plus rapproché de l'angle aigu de la coupe principale du rhomboïde que celui auquel répond la première image, et qu'elle s'éloigne davantage de l'œil par sa position. Ces caractères étant ceux qui dérivent de la réfraction extraordinaire, on en conclut la distinction entre les deux images.

Si l'on continue le mouvement de rotation au-delà du terme dont nous avons parlé, les mêmes effets se répèteront en sens contraire. On verra la première image renaître, et devenir tou-

jours plus sensible à mesure que la seconde s'affaiblira par degrés; en sorte qu'elle finira par être nulle, au terme où la rotation ayant parcouru une demi-circonférence, le *maximum* d'intensité aura passé à la première. On conçoit d'avance ce qui doit arriver, en vertu du mouvement dans les deux arcs de 90^{d} qui mesurent le reste de la circonférence. Il résultera de ce mouvement deux successions d'effets semblables à ceux qui ont eu lieu dans les deux arcs correspondant, à partir de l'origine du mouvement.

1410. Pour vérifier l'autre fait, on substitue au prisme octogone la pièce représentée (*fig. 130 bis*), qui renferme une seconde glace dont l'effet se combine avec celui de la première. Nous avons dit plus haut que cette glace, qui est indiquée par le rectangle *gnmo* (*fig. 134*), était inclinée de 55^{d} sur le rectangle *gohl*. Supposons maintenant que, du centre *z* de ce dernier rectangle, on élève une droite qui lui soit perpendiculaire; elle fera avec le plan de la glace un angle de 35^{d} égal au complément de 55^{d} . Si l'on fait tourner le rectangle *gohl* autour de la droite dont il s'agit, de manière qu'elle fasse toujours un angle droit avec lui, la glace qui tournera en même temps continuera aussi de faire un angle de 35^{d} avec la même droite. Or, celle-ci est sur le prolongement de l'arc du cylindre, d'où il suit qu'elle coïncide avec le rayon qui, après deux réflexions sur la première glace, est reçue sous le même angle par la seconde glace. Donc, en faisant tourner celle-ci, on obtiendra le résultat dont il s'agit. Maintenant, il suit de la comparaison que nous avons faite des variations que subit la lumière réfléchie par cette seconde glace, avec celles qui avaient eu lieu à l'égard de la lumière réfractée dans le rhomboïde, que le phénomène offert par la première est composé d'une partie que l'expérience rend sensible, et d'une autre que la réfraction dans la glace dérobe à l'observateur. On voit de plus que la première n'est qu'une répétition de ce qui a lieu à l'égard de la lumière qui, dans le rhomboïde, était soumise à la réfraction ordinaire. Il en résulte que si l'on fait faire à la seconde glace une révolution autour de l'axe du tube, il y aura deux points éloignés l'un de l'autre de 180^{d} , où l'image de l'ouverture faite au diaphragme, vue dans cette même glace, aura atteint son *maximum* d'inten-

sité, et deux autres points situés entre les précédens, à la distance de 90^{d} , où elle aura disparu. Les deux *maxima* répondront aux termes où les plans des deux glaces seront parallèles entre eux, et les points de zéro à ceux où ils seront perpendiculaires l'un sur l'autre. En allant de l'un de ces derniers points vers un des termes où l'intensité est à son *maximum*, on verra l'image renaître, et sa force suivre une progression croissante, jusqu'à ce qu'elle soit parvenue au terme dont nous venons de parler.

Polarisation dans laquelle la lumière blanche se sous-divise en deux rayons teints de couleurs complémentaires l'un de l'autre.

1411. Dans les expériences que nous venons de citer, la lumière, soit réfractée, soit réfléchi, qui fait naître les phénomènes ne se décompose pas, et ne fait que se sous-diviser dans certains cas, en sorte que les images qu'elle produit sont constamment blanches. M. Arago a découvert une modification du même fluide, en vertu de laquelle les mêmes images se montrent ornées de diverses couleurs, et les résultats qu'elle a offerts à cet habile astronome sont d'autant plus dignes d'attention, qu'ils ont ouvert aux expériences sur la lumière polarisée un nouveau champ qui s'agrandit de jour en jour (1).

1412. M. Arago est parvenu, par une suite d'expériences dans lesquelles l'intensité des couleurs allait en croissant, au terme qui répondait à son *maximum*, et qui avait lieu, comme dans les cas précédens, lorsque l'incidence de la lumière se faisait sous un angle de 35^{d} . C'est à ce terme que se rapporte l'expérience que nous allons d'abord exposer. L'appareil et la manière d'opérer sont les mêmes que dans celles de M. Malus, dont nous avons parlé plus haut, où la lumière réfléchi, sous l'angle cité, subit, en pénétrant un corps doué de la double réfraction, par exemple, un

(1) Mémoire de la Classe des Sciences physiques et mathématiques de l'Institut, année 1811, p. 1 et suiv.

rhomboïde de spath d'Islande, les mêmes modifications que si elle avait déjà passé par un autre corps qui partageât la même propriété. Mais M. Arago introduit dans son expérience un nouveau corps qui fait prendre au phénomène un nouvel aspect, savoir, une lame de mica ou de chaux sulfatée d'une petite épaisseur γ , qu'il applique sur la surface inférieure du rhomboïde.

Les choses étant dans cet état, si l'on fait passer la lumière réfléchie à travers le trou du diaphragme qui termine le cylindre, comme dans l'expérience de M. Malus, et si l'on regarde cette ouverture à travers le rhomboïde situé de manière que sa section principale soit parallèle au plan de réflexion, la lame de mica agira diversement sur les rayons de diverses couleurs, de manière qu'une partie conservera sa polarisation primitive, tandis que le reste sera de nouveau polarisé dans un sens différent. Il en résulte qu'au lieu d'une seule image blanche, on en voit deux situées l'une au-dessus de l'autre, et qui sont teintées de couleurs complémentaires.

Dans la plus grande partie des expériences, l'image supérieure était d'un rouge violet, et l'inférieure d'un vert bleuâtre appelé *vert céladon*; et il est remarquable que, de ces deux couleurs, la dernière soit à très peu près celle qui occupe le milieu du spectre solaire, et la première un mélange des deux couleurs extrêmes sur le même spectre. Si ensuite on fait tourner les deux corps vers la droite ou vers la gauche, les deux images s'affaiblissent en passant par différentes teintes toujours complémentaires l'une de l'autre; et, au terme où l'arc de rotation est de 45^{d} , les deux images deviennent blanches; au-delà de ce terme, les couleurs reparaissent dans l'ordre inverse de celui qui a précédé la blancheur, et quand le mouvement de rotation a parcouru 90^{d} , elles se retrouvent les mêmes que dans le premier instant. Les mêmes effets se répètent aux mêmes intervalles pendant que l'on continue le mouvement, en sorte que, dans la rotation totale, il y a quatre points éloignés l'un de l'autre de 90^{d} où les couleurs des deux images sont à leur *maximum*, et quatre autres points situés à égale distance des précédents où elles sont remplacées par la blancheur.

On voit, ainsi que le remarque M. Arago, que les rayons qui ont passé à travers la lame de mica ou de chaux sulfatée, sont distingués de ceux de la lumière directe, par la coloration des deux faisceaux qui résultent de leur sous-division, et dont les teintes sont complémentaires l'une de l'autre, et de ceux de la lumière déjà polarisée par son passage à travers un premier rhomboïde, en ce qu'ils donnent constamment deux images en traversant celui de l'expérience.

1413. Il y a pour les lames soumises à l'expérience, un degré de ténuité au-delà duquel leurs effets disparaissent, et un degré d'épaisseur en-deçà duquel on ne les observe pas encore, en sorte que la gradation du phénomène est comprise entre deux limites plus ou moins rapprochées suivant la diversité des substances que l'on soumet à l'expérience.

De plus, l'espèce de couleur que présente une lame de mica ou de chaux sulfatée, dans une position et sous une inclinaison déterminée, dépend de l'épaisseur de cette lame, en sorte qu'en la divisant dans un sens parallèle à ses grandes faces, en lames toujours plus minces, on voit les couleurs changer à mesure que l'on présente successivement à la lumière ces dernières lames.

1414. L'angle de 35^{d} coïncide avec la limite où la lumière réfléchie est complètement polarisée. Mais, dans toutes les incidences plus grandes ou plus petites, il y a toujours une partie des rayons qui ont subi naturellement la même modification, et c'est en observant la gradation croissante de cette dernière partie, que M. Arago a été conduit au terme où la polarisation est totale. On peut vérifier ce que nous venons de dire à l'aide d'une expérience fort simple. On pose sur une table voisine de la fenêtre, dans une direction parallèle au plan de celle-ci, un fragment détaché d'un bâton de gomme laque, ou un petit étui d'un brun foncé qui ait un certain degré de poli, et l'on se place du côté opposé, vis-à-vis de la même fenêtre. On voit alors une bande de lumière blanche sur la partie supérieure de la convexité du corps dont nous avons parlé. On regarde cette lumière à travers la lame de mica ou de gypse appliquée au rhomboïde de spath d'Islande, et on observe que la bande de lumière blanche se sous-divise en deux, qui offrent

des couleurs complémentaires l'une de l'autre. Ces couleurs augmentent ou diminuent d'intensité à mesure que l'œil s'élève ou s'abaisse, et que les rayons, en tombant plus ou moins obliquement sur le corps qui les reçoit, se rapprochent ou s'écartent de la direction qui coïncide avec l'angle auquel répond le *maximum* de polarisation.

1415. Nous avons vu que le second fait découvert par M. Malus différait du premier, en ce que, dans l'expérience destinée à le faire naître, on substituait une seconde glace au rhomboïde de spath d'Islande. On peut, à l'aide de la même substitution, transformer l'expérience de M. Arago, que nous avons exposée plus haut, en une autre qui offrira l'analogie de la seconde de M. Malus, toujours avec la différence qui résulte du passage de la lumière blanche à la lumière colorée. Mais, avant d'en décrire le résultat, nous ne devons pas omettre une observation qui concerne la manière de la faire.

Supposons que les plans de réfraction relatifs aux deux glaces soient perpendiculaires l'un sur l'autre. Si l'on remplace par une lame de chaux sulfatée ou de mica le diaphragme percé de la petite ouverture qui, dans l'expérience de M. Malus, transmettait la lumière réfléchie par la première glace, et que l'on fasse tourner lentement la lame autour de son centre à l'aide du moyen que nous avons indiqué, il y aura un terme où l'on verra souvent paraître sur la surface de cette lame diverses couleurs plus ou moins vives, distribuées comme les pièces de rapport qui composent un compartiment. Cet effet, qui est très agréable, provient de l'inégalité d'épaisseur des différentes parties de la lame qui transmet la lumière. Quelquefois l'espace occupé par une des couleurs a la figure d'un triangle ou d'un trapèze, et si l'on observe la lame au même endroit, on y voit la figure dont nous venons de parler se dessiner par une interruption de niveau.

1416. Ces différentes couleurs n'arrivent que successivement à leur *maximum* d'intensité, suivant que les parties qui les offrent sont plus ou moins épaisses, en sorte que si l'on en adopte une comme sujet de l'expérience, il faut choisir dans la rotation de la lame le point auquel répond le *maximum* qui lui est particu-

lier. Supposons que cette couleur soit le vert. Si l'on continue de faire tourner la glace, et qu'on suive de l'œil l'image produite par cette même couleur, on la verra s'affaiblir par degrés, jusqu'à ce que l'arc de rotation, à partir du *maximum*, étant de 45^{d} , elle disparaisse. Au-delà de ce terme, on verra l'image d'un rouge violet, dont la couleur est la complémentaire du vert, prendre naissance, et se renforcer graduellement, jusqu'à ce que le mouvement de rotation ait parcouru 90^{d} , depuis le *maximum* du rouge violet, et 45^{d} depuis son zéro, et à ce terme l'image violette sera parvenue elle-même à son *maximum*. La glace continuant de tourner, les mêmes effets se renouveleront en sens contraire, de manière que dans la rotation totale, il y aura deux points éloignés l'un de l'autre de 180^{d} , où l'image verte aura atteint son *maximum* d'intensité, et deux autres points éloignés chacun de 90^{d} des précédens, auquel répondra le *maximum* de l'image violette. Il y aura de même quatre points de zéro, situés à des distances égales des *maxima*.

1417. Parmi les différentes lames obtenues par la sous-division d'un fragment de mica ou de gypse cristallisé, on en trouve qui donnent une couleur uniforme, et que l'on peut employer de préférence pour simplifier l'expérience. On peut aussi placer en-dessus d'une lame diversement colorée un diaphragme percé d'une petite ouverture en son milieu, et à l'aide de ce moyen, on isolera la couleur qui répondra à cette ouverture, et les effets en deviendront plus nets et plus faciles à saisir.

1418. Si au lieu de faire tourner la lame soumise à l'expérience jusqu'au terme où la couleur est parvenue à son *maximum* d'intensité, on arrête son mouvement à l'un des termes situés en-deçà, où cette couleur est moins vive, et si ensuite on fait marcher la glace supérieure, les choses se passeront comme dans le cas où le point de départ coïncide avec le *maximum* d'intensité, en sorte que la différence consistera en ce que les images seront en général plus faibles, et il y aura de même pour chaque degré inférieur d'intensité primitive, un *maximum* relatif qui se montrera et disparaîtra aux mêmes distances respectives, que dans le cas de l'intensité absolue.

Supposons enfin qu'en faisant tourner la lame, on l'ait amenée à l'un des points de zéro, en sorte que l'image ait disparu; si ensuite on imprime à la glace un mouvement de rotation, l'image restera nulle, et toute la lumière incidente continuera de se rétracter en pénétrant la glace.

Diverses Expériences sur la Lumière polarisée.

1419. M. Biot, en variant la manière de soumettre le même appareil à l'expérience, et en se servant d'une lame de gypse, a obtenu un nouveau résultat, auquel il a donné un grand développement, en le considérant sous le rapport de la théorie. Pour mieux concevoir en quoi il consiste, rappelons-nous que lorsque la rotation de la lame est parvenue au terme où la couleur verte produite par la réflexion sur la seconde glace a atteint son *maximum*, on laisse cette lame dans sa position, et l'on fait tourner la glace, ce qui produit successivement deux images, dont les couleurs sont complémentaires l'une de l'autre. Pour avoir le résultat de M. Biot, il faut au contraire conserver à la seconde glace la position sous laquelle son plan de réflexion est perpendiculaire à celui de la première glace, et continuer la rotation de la lame. Alors la couleur de l'image reste constante; seulement elle s'affaiblit par degrés jusqu'à une distance de 45^d du point de départ, où elle disparaît entièrement, après quoi elle renaît, et augmente d'intensité jusqu'à ce que la rotation ait parcouru un nouvel arc de 45^d, et ainsi de suite.

1420. Nous avons désiré de savoir ce qui arriverait, si l'expérience poursuivait sa marche en s'assimilant aux autres qui ont été citées précédemment, et dans lesquelles la glace supérieure passe successivement par toutes les positions respectives intermédiaires entre les deux qui sont les limites des autres, et voici ce que l'observation nous a appris. La couleur de l'image que nous avons vu être constante, dans le cas précédent, étant le vert, nous avons fait d'abord tourner la glace supérieure d'un petit nombre de degrés, et l'ayant laissée dans cette position, nous avons imprimé à la lame de gypse un mouvement de rotation,

jusqu'à ce qu'elle eût parcouru toute la circonférence. Nous avons vu alors les deux couleurs complémentaires se succéder quatre fois l'une à l'autre, mais la couleur d'un rouge violet était plus faible que la verte. Un nouveau mouvement de la glace, à peu près égal au premier, suivi du même mouvement de la lame dans toute la circonférence, a fait reparaître la même succession de couleurs, mais de manière que l'intensité du rouge violet s'était accrue, et que celle du vert avait diminué. Le mouvement de la glace ayant été continué jusqu'à 45^d du terme de départ, les deux images qui se succédaient pendant la rotation de la glace étaient à peu près égales en intensité; au-delà, le rouge violet était devenu prédominant, et toujours de plus en plus; et lorsque les deux plans de réflexion avaient fini par coïncider, l'image vue dans la glace était parvenue à son *maximum* d'intensité. Nous avons laissé alors les deux plans de réflexion dans les mêmes positions respectives, et pendant une nouvelle rotation de la lame, l'image a conservé constamment la même couleur, comme dans le cas où les deux plans de réflexion étaient perpendiculaires l'un sur l'autre.

1421. Une lame de mica, substituée à la lame de gypse, a offert des effets analogues. Nous avons aussi essayé une substance minérale connue des minéralogistes sous le nom de *stilbite*, et en divisant un de ses cristaux, nous en avons détaché une lame mince, dont les faces étaient parallèles aux deux pans de la forme primitive, qui ont un aspect nacré. La couleur de cette lame qui, vue dans la glace supérieure, était d'abord d'un bleu foncé, dont la complémentaire est le jaune-orangé, a subi les mêmes variations que celles qui avaient eu lieu sur une lame de gypse ou de mica.

On a vu, par ce qui précède, que l'uniformité de l'image réfléchie par la glace supérieure mettait déjà une différence sensible entre les résultats des deux genres d'expériences faites avec la même appareil. Le retour des deux images renouvelé quatre fois, lorsque les deux plans de réflexion sont inclinés l'un sur l'autre, nous a paru indiquer entre les mêmes résultats une nouvelle distinction qui méritait d'entrer dans leur comparaison.

1422. Le résultat que nous allons maintenant exposer offre la réunion de deux phénomènes qui se montrent séparément dans les expériences précédentes. L'un consiste dans la couleur produite par des rayons déjà polarisés, qui se sont réfractés en traversant une lame de chaux sulfatée. L'autre dépend de la couleur qui émane de la réflexion immédiate des rayons, sous l'angle favorable à la polarisation. Pour obtenir le premier phénomène, nous avons pris un diaphragme garni d'une lame de la substance dont nous venons de parler, et nous l'avons placé dans la partie inférieure du cylindre, de manière que l'image de la lame vue dans la glace mobile paraissait d'un vert intense. Nous avons ensuite marqué de deux points les extrémités de celui de ses diamètres qui était situé parallèlement au bord NL (*fig.* 130) de la tablette. Nous avons couvert la glace GINL d'un morceau de carton noir, et nous avons placé le diaphragme sur ce carton, de manière que le diamètre indiqué se trouvât de nouveau parallèle au même bord de la tablette. La réflexion de la lumière sur la lame de chaux sulfatée pouvait alors être assimilée à celle qui dans le cas précédent avait eu lieu sur la glace GINL, parce que l'angle qui répond à la polarisation complète est à peu près le même à l'égard des deux substances. L'image a reparu dans la glace avec la même couleur; c'est le contraire de ce qui arrive dans le phénomène des anneaux colorés, où la couleur produite par la réfraction est la complémentaire de celle qui provient de la réflexion.

1423. L'expérience suivante donne naissance à un résultat auquel M. Arago est aussi parvenu le premier en suivant une marche un peu différente. Elle consiste à présenter une lame de mica sous différens degrés d'obliquité à la lumière polarisée; les rayons dans ce cas ayant successivement différentes épaisseurs à traverser, la couleur de cette lame subit des changemens analogues à ceux qu'offre dans le même cas la couche d'air qui produit le phénomène des anneaux colorés.

La lame destinée pour l'expérience, dont la forme est circulaire, s'insère dans une petite monture faite d'une espèce d'anneau de cuivre, où l'on a la liberté de la faire mouvoir autour de son

centre, pour lui donner la position convenable. Cet anneau est situé entre deux pivots de cuivre ; de manière qu'on peut lui imprimer, dans un sens ou dans l'autre, un mouvement de rotation autour d'un axe horizontal qui répond à l'un des diamètres de la lame, d'où il suit que pendant le même mouvement, elle reste perpendiculaire au plan de réflexion des rayons sur la glace. On dispose d'abord cette lame parallèlement à la base du cylindre et de manière que l'image, vue dans la glace, montre dans toute son intensité la couleur qui lui est propre. On fait ensuite tourner la lame vers le haut ou vers le bas ; et l'on observe les couleurs auxquelles elle passe successivement. La série de ces couleurs varie d'une lame à l'autre, parce que l'épaisseur elle-même est différente.

1424. Le gypse, dont l'analogie avec le mica se soutient dans toutes les autres expériences, y déroge dans celle que nous venons d'exposer, en ce que les couleurs de ses lames paraissent constantes sous tous les degrés d'inclinaison. Seulement leur teinte subit de légères variations lorsque l'inclinaison est considérable. Ce que nous disons ici suppose que les couleurs soient vives et bien décidées. Car dans le cas où elles sont faibles, ce qui provient souvent de la ténuité des parties qui les réfléchissent, elles éprouvent des changemens quelquefois assez sensibles, en passant, par exemple, du rouge violet au vert, ou réciproquement. C'est lorsque l'on compare les lames des deux substances dans la circonstance où elles ont atteint leur *maximum* d'intensité, que la fixité des couleurs du gypse contraste avec la succession de teintes fugitives que présente le mica, à mesure que l'inclinaison varie.

1425. Les observations faites par M. Arago, sur des substances distinguées par leur nature de la chaux sulfatée et du mica, lui ont fourni de nouvelles applications de son importante découverte. Il a obtenu des résultats analogues à ceux qu'avaient offerts ces deux substances, en employant une lame de cristal de roche, dont l'épaisseur était de plus de six millimètres (environ 3 lignes), en sorte qu'elle excédait de beaucoup la limite à laquelle s'arrête la propriété de décomposer la lumière blanche en couleurs complémentaires l'une de l'autre, lorsqu'on se sert des substances

déjà citées. Il a soumis aux mêmes expériences des plaques de flint-glass, et les phénomènes qu'elles ont fait naître l'ont conduit à cette conséquence remarquable, qu'il existe des corps qui n'ayant pas la double réfraction, se comportent par rapport aux rayons polarisés, comme s'ils étaient doués de cette propriété (1).

1426. C'est en partant des résultats que nous venons d'exposer, que des physiciens d'un mérite distingué ont étendu si loin nos connaissances sur la physique de la lumière. Mais aucun n'a autant contribué à leur accroissement, et n'a travaillé avec plus de constance que M. Biot, pour mettre en évidence la fécondité des lois auxquelles est soumise la lumière polarisée. Il a ramené ces lois à une propriété physique des molécules lumineuses, qui lui a donné comme la clé d'une théorie très ingénieuse de la polarisation qu'il appelle *mobile*, et qui est fondée sur les principes suivans. Lorsqu'un rayon blanc polarisé tombe perpendiculairement sur la surface d'une lame de mica, de chaux sulfatée ou de cristal de roche, toutes les molécules lumineuses dont il est l'assemblage pénètrent d'abord jusqu'à une petite profondeur, sans éprouver aucune déviation sensible dans la direction de leurs axes de polarisation; mais arrivées à cette limite, qui est différente pour celles de diverses couleurs, elles commencent toutes à osciller autour de leur centre de gravité, comme le balancier d'une montre. Ces oscillations sont de même étendue pour les molécules de toutes les couleurs; mais leurs vitesses sont inégales. Les molécules violettes tournent plus vite que les bleues, celles-ci plus vite sont les vertes, et ainsi de suite jusqu'aux molécules rouges qui que les plus lentes.

Or, les oscillations successives des molécules diversement colorées, devant se répéter dans l'épaisseur de la lame à des distances de la surface qui varient dans le même ordre que celles où elles ont pris naissance, il en résulte que ces distances sont plus grandes ou plus petites pour les molécules de telle couleur, que pour celles d'une couleur différente; en sorte qu'à leur émergence du cristal, lorsque le mouvement oscillatoire aura cessé, une partie des mo-

(1) Mémoire cité plus haut, p. 134.

lécules sera polarisée dans un sens, tandis que la portion complémentaire le sera dans un sens différent. M. Biot explique, d'après cette diversité de polarisation des rayons émergens, celle des couleurs que présentent les différentes lames que l'on retire d'une même substance, à l'aide de la division mécanique, suivant que leur épaisseur est plus grande ou plus petite. Il compare les différentes épaisseurs dont il s'agit à celles des lames minces qui transmettent les diverses couleurs dans le phénomène des anneaux colorés, et trouve qu'elles sont en rapport les unes avec les autres, excepté que ce rapport est beaucoup plus grand dans le phénomène de la lumière polarisée.

1427. M. Biot a remarqué que quand les rayons réfractés dans une plaque de cristal de roche la traversaient perpendiculairement à l'axe, ils subissaient des modifications différentes de celles qui dépendent des forces polarisantes générales. Il explique cette différence à l'aide d'une nouvelle hypothèse qui consiste en ce que les molécules, dans le cas dont il s'agit, au lieu de faire seulement des oscillations, comme dans les phénomènes ordinaires, ont un mouvement continu de rotation autour de leurs centres. Il a retrouvé des indices du même mouvement dans des substances qui non-seulement n'offraient aucune structure cristalline, mais même étaient parfaitement fluides.

Les détails dans lesquels nous serions obligés d'entrer, pour donner une juste idée des principes de M. Biot et des applications qu'il en a faites à divers phénomènes, nous entraîneraient au-delà des bornes que nous prescrit la nature d'un ouvrage élémentaire. Mais les personnes qui auront celui-ci entre les mains, et qui cultivent la physique de la lumière, seront bien dédommagées de cette privation, si c'en est une, par la lecture du bel et important ouvrage où le célèbre auteur de la théorie dont il s'agit l'a exposée lui-même avec tout le développement convenable (1).

(1) Recherches sur la Lumière. Paris, 1816.

De la Vision à l'aide d'un seul Verre terminé par des Surfaces curvilignes.

Nous commencerons par l'espèce de verre qui est d'une utilité plus générale; savoir, celle à laquelle on a donné le nom de *verre lenticulaire*, ou simplement celui de *lentille*, à cause de sa forme, qui représente deux segmens de sphère, appliqués l'un à l'autre par leurs faces planes.

Idée des Caustiques par réfraction.

1428. Nous avons déjà vu (1040) que parmi les rayons qui tombent sur la surface d'un verre lenticulaire, dans des directions parallèles à l'axe, ceux qui sont voisins de cet axe, après avoir subi deux réfractions, l'une en pénétrant le verre, l'autre en repassant dans l'air, concourent à peu près dans un point commun que l'on appelle *le foyer* des rayons parallèles.

Concevons maintenant qu'il y ait un point radieux (*fig. 136*), situé à l'endroit de ce même foyer. Parmi les rayons que ce point envoie vers la lentille dans toutes les directions imaginables, ceux qui s'écartent peu de l'axe, tels que *rg*, *ri*, sortiront du côté opposé, parallèlement au même axe, suivant des directions *mp*, *uz*. Mais les rayons plus éloignés de *rx*, tels que *rb*, *rf*, étant plus divergens que les rayons *rg*, *ri*, et par là moins disposés à s'infléchir de la quantité nécessaire pour qu'ils deviennent parallèles à l'axe, en repassant dans l'air, sortiront suivant les directions *es*, *ln*, qui divergeront soit entre elles, soit par rapport à l'axe, de manière cependant que cette divergence sera moindre que celle des rayons incidens.

Il suit de là que si l'on prolonge les rayons émergens *zu*, *se*, *yg*, leurs prolongemens iront se couper aux points *v*, *a*, *c*, etc., plus éloignés de la lentille que le point *r*, de manière que leurs intersections formeront une caustique, comme dans le cas de la réflexion sur la surface des miroirs concaves ou convexes. On donne

aux courbes du genre de celle qui nous occupe ici le nom de *caustiques par réfraction*.

Effets d'une Lentille, lorsque l'Objet est en-deçà du Foyer des Rayons parallèles.

1429. Si l'on suppose que le point radieux soit situé entre le foyer des rayons parallèles et la lentille, alors les rayons qui tomberont sur le petit espace *gi* étant plus divergens que quand ils partaient de ce même foyer, il en résulte qu'à leur retour dans l'air ils continueront de diverger, au lieu d'être parallèles, et en même temps la divergence de tous les autres augmentera.

1430. Au lieu d'un simple point radieux, concevons un objet *AB* (*fig. 137*) d'une certaine étendue, et placé de même en deçà du foyer des rayons parallèles. Soit *O* la position de l'œil. En nous bornant encore ici à considérer la marche des rayons qui partent des extrémités *A, B* de l'objet, nous pourrons toujours supposer deux cônes de lumière *cAe, fBh*, tellement situés qu'après s'être repliés d'abord en pénétrant dans la lentille, puis en rentrant dans l'air, ils aillent passer par la prunelle de l'œil *O*. Dans ce cas, les rayons tels que *Ae, Ae*, qui divergent sensiblement en partant du point *A*, n'auront plus, après leur émergence suivant les directions *ky, pu*, que le petit degré de divergence qui s'accorde avec la conformation de l'œil, en sorte que tous les cônes envoyés par les différens points de l'objet iront en peindre l'image sur la rétine.

Si l'on prolonge du côté opposé à l'œil les rayons *yk, up*, et tous les autres qu'il faut se représenter comme étant compris entre ceux-ci, on pourra appliquer à tous ces rayons ce que nous avons dit des rayons *yq, sc, zu* (*fig. 136*), c'est-à-dire que les intersections de leurs prolongemens ne coïncideront pas en un point commun. Mais comme ceux qui composent le cône parti du point *A* (*fig. 137*) sont très rapprochés, les points de concours des prolongemens dont il s'agit seront resserrés dans un très petit espace, en sorte qu'ici, comme dans d'autres cas analogues, dont

nous avons déjà parlé (1037), les directions des différens rayons sont censées concourir vers un point unique, qui est comme leur centre d'action.

1431. Dans toutes les circonstances semblables à celles dont il s'agit ici, on voit l'objet droit et en même temps amplifié; car l'œil l'aperçoit sous l'angle $\angle Oz$ sensiblement plus ouvert que $\angle AOB$, sous lequel il le verrait à la vue simple.

1432. Dans les mêmes circonstances, la clarté de l'objet paraît augmentée. Car soit r (fig. 138) un des points de l'objet, que nous supposerons être le point du milieu, et soit hi le diamètre de la prunelle, tous les rayons compris dans l'angle prs passeront par l'ouverture de la prunelle, suivant les directions qh , li , et les autres intermédiaires. Or, si l'on prolonge rp et rs vers l'œil, et qu'on supprime la lentille, les rayons renfermés dans l'angle prs se répandront sur tout l'espace gk qui est plus grand que le diamètre de la prunelle; d'où il suit que la prunelle recevra plus de rayons par l'intermédiaire de la lentille, que dans la vision simple; et quoiqu'il y ait un certain nombre de rayons qui soient interceptés dans leur trajet à travers la lentille, cette perte étant plus que compensée par l'effet de la réfraction, il en résultera toujours un accroissement de lumière.

Enfin, le point de concours des rayons qui apportent à l'œil l'image de chaque point de l'objet, est plus éloigné que dans la vision ordinaire; car le rayon réfracté sl , par exemple, en repassant dans l'air, s'écartera de la perpendiculaire au point l suivant une direction li , de manière que son prolongement lz passera à la droite du point s : d'où il suit que les rayons il , hq concourront en un point z plus éloigné de l'œil que le point correspondant r de l'objet.

1433. A l'égard du jugement que nous portons des dimensions et de la distance de l'image, tout le monde sait qu'elle paraît effectivement plus grande que l'objet, et qu'en même temps on est porté à la juger plus près, quoique les rayons qui la dessinent au fond de l'œil soient dirigés comme s'ils partaient d'un objet fictif plus éloigné de l'œil que le véritable. Mais ce n'est ici qu'un jugement en quelque sorte précipité, dans lequel nous sommes d'a-

bord entraînés par l'augmentation de grandeur, et auquel contribue encore l'augmentation de clarté. Prenez une longue aiguille, et faites-la passer doucement sous une lentille, dans une direction transversale et à une distance convenable du verre; comparez attentivement la position de l'image avec celle de l'objet, et vous remarquerez que l'image est sensiblement plus éloignée, surtout si la lentille a une certaine étendue. Vous saisirez encore mieux la différence, en faisant aller et revenir l'aiguille parallèlement à elle-même; car il est des momens où l'on a encore besoin de se défendre de l'illusion qui tend à nous faire juger que ce qui nous paraît plus grand s'est rapproché de nous.

Cas où l'Objet est au-delà du Foyer des Rayons parallèles.

1434. Revenons à la considération d'un simple point radieux r (*fig.* 136), et supposons que ce point, en partant du foyer des rayons parallèles, s'écarte peu à peu de la lentille; dans ce cas, les rayons qui tomberont sur le petit espace gi étant moins divergens que dans le cas où le foyer des rayons parallèles était leur point de départ, seront par là même déterminés à converger, soit entre eux, soit avec l'axe, derrière la lentille: en même temps la divergence des rayons es , gy plus éloignés de l'axe diminuera, et il y aura un terme où tous les rayons émergens se rejeteront vers l'axe, comme on le voit (*fig.* 139). Dans ce dernier cas, parmi les rayons situés d'un même côté de l'axe, chacun sera coupé par le suivant, et l'on pourra concevoir une caustique qui passe par tous les points d'intersection.

1435. Substituons de nouveau à un simple point un objet AB (*fig.* 140) d'une certaine longueur, en le supposant toujours placé au-delà du foyer des rayons parallèles, et ne considérons, pour plus de simplicité, que ce qui a lieu par rapport au point R du milieu et aux deux points extrêmes A , B . Le point R est encore ici le sommet commun d'une infinité de cônes qui tombent à différens endroits de la surface de la lentille. Or, parmi tous ces cônes, celui dont l'axe Rt est perpendiculaire à la surface réfrin-

gente mtn , est composé de rayons qui concourent sensiblement en un point commun r derrière la lentille, en sorte qu'il se forme un foyer en cet endroit (1).

De même il part de chaque extrémité, par exemple de A , une infinité de cônes plus ou moins obliques, dont les bases correspondent à différens endroits de la surface mtn . Or, parmi tous ces cônes, il y en a un dont les rayons concourent aussi à peu près en un même point derrière la lentille: c'est celui dont l'axe Ac est tellement situé qu'après s'être réfracté suivant ch , il rencontre la surface mxn à l'endroit où la tangente au point d'incidence h sur l'arc concave, est parallèle à la tangente au point d'incidence c sur l'axe convexe. Dans ce même cas, le rayon réfracté ch passe par le milieu de la lentille (2). On conçoit qu'il y aura toujours un cône envoyé par le point A , qui satisfera à ces conditions, car si l'on suppose que la ligne xt , qui fait partie de l'axe du cône envoyé par le point R , restant fixe par son milieu, qui coïncide avec

(1) Nous avons prouvé (note du n° 1039) que la formule qui donne dans ce cas l'expression dans la distance du foyer à la lentille est $z = \frac{mab}{(1-m)2b - ma}$, quantité dans laquelle a représente le rayon de la sphéricité que l'on suppose le même pour les deux surfaces, b la distance du point radieux à la lentille, et $\frac{1}{m}$ le rapport entre les sinus. Or, dans le cas d'une lentille de verre, $m = \frac{20}{31}$; donc $z = \frac{10ab}{11b - 10a}$.

(2) Soit mn (fig. 141) une lentille dont les deux arcs mxn , mtn , que nous supposons de différentes courbures, pour plus grande généralité, aient leurs centres en b et en l . Sur l'axe bl prenons un point o tellement situé, que bo soit à ol comme le demi-diamètre de l'arc mxn est à celui de l'arc mtn . Par ce même point menons une droite ch qui traverse la lentille dans une direction quelconque, et menons ensuite les deux demi-diamètres bh , lc . Dans les triangles boh , loc , on a $bo : ol :: bh : lc$. De plus, $col = hob$. Donc ces triangles sont semblables; donc $ocl = ohb$. Donc si nous considérons la ligne ch comme rayon incident, relativement aux arcs mxn , mtn , ce rayon étant également incliné sur les lignes lc , bh , perpendiculaires aux surfaces réfringentes, les réfractions suivant les lignes ca , ho' seront égales, d'où il suit que ces lignes sont parallèles. Le point o , dont la position est évidemment invariable, d'après ce qui précède, se nomme centre de la lentille.

le centre de la lentille, tourne autour de ce centre, de manière que son extrémité t parcourt l'arc tm , et que son prolongement se réfracte continuellement dans l'espace situé entre tm et RA , ce prolongement aboutira successivement à différens points placés entre R et A , et il finira par coïncider avec le point A . Or, il est évident qu'à ce terme la ligne xt aura la position hw , d'où il suit que si l'on considère maintenant Ac comme rayon incident, le rayon réfracté sera ch .

On voit aussi que le rayon Ac , en repassant dans l'air après sa réfraction en h , prendra une direction ha parallèle à celle qu'il avait d'abord; et si l'on suppose que la lentille n'ait qu'une petite épaisseur, on pourra considérer le rayon ha comme étant sensiblement sur la direction du rayon Ac , et ne formant avec lui qu'une même ligne.

Il suit de là que le cône auquel appartient l'axe Ac est, parmi tous ceux qu'envoie le point A , celui qui approche le plus de se trouver dans les mêmes circonstances que le cône du milieu, dont l'axe est la ligne Rt : or, ce cône sera aussi celui dont les rayons concourront sensiblement derrière la lentille en un point commun a .

1436. On pourra appliquer le même raisonnement à tous les cônes partis des autres points de l'objet AB , d'où l'on voit que les rayons de tous ces différens cônes auront leurs foyers à peu près sur une ligne bra parallèle à la ligne ARB . Or, partout où il y a un foyer, il se forme une image du point radiex auquel appartient ce foyer; et de là vient que si l'on expose derrière la lentille un carton à la distance convenable, on verra l'image se peindre sur ce carton. On conçoit pourquoi, dans le même cas, l'image est renversée, puisque les seuls cônes dont les rayons soient ramassés, pour ainsi dire, de manière à produire des foyers, s'entrecoupent au milieu de la lentille. C'est sur ce principe qu'est fondée la construction de la chambre obscure, dont nous donnerons dans la suite la description.

Il est aisé de juger que la lentille de l'expérience que nous venons de citer est à peu près, à l'égard du carton qui présente l'image de l'objet, ce qu'est le cristallin par rapport à la mem-

brane qui tapisse le fond de l'œil, et qui reçoit pareillement les images des objets. Seulement cette lentille agit seule pour produire l'image que l'on voit sur le carton, au lieu que les différentes humeurs de l'œil concourent avec le cristallin à la représentation des objets sur la rétine.

1437. Les choses étant dans le même état, au lieu de supposer à l'endroit de l'image *ab* un carton sur lequel l'œil aperçoit cette image, comme sur un tableau, à l'aide des rayons qui se réfléchissent de ses différens points, supprimons le carton, et concevons que l'œil aille se placer lui-même derrière la lentille, pour voir immédiatement l'image de l'objet *AB* (1). Il est d'abord évident qu'il ne pourra plus la voir par l'intermède des rayons *fb*, *ha*, etc., qui avaient servi à la lui rendre présente lorsqu'elle était peinte sur le carton, puisque les axes des cônes auxquels appartiennent ces rayons continuent de diverger, au lieu qu'il serait nécessaire qu'ils convergeassent vers cet œil.

Aussi la simple observation de l'espèce de changement de scène qui a lieu dans ce cas, suffit-elle pour indiquer que les rayons eux-mêmes ont changé de route; car on voit alors communément deux images de l'objet; de plus, chaque image n'est vue que d'un seul œil, et cela de manière que celle qui est située vers la gauche se peint dans l'œil droit et réciproquement, c'est ce dont on peut s'assurer en fermant et en ouvrant chaque œil tour à tour. Enfin, quoique les rayons qui, dans ce cas, arrivent de chaque point de l'image à l'un ou à l'autre organe, continuent de se croiser entre la lentille et cet organe, ainsi que nous le verrons plus bas, nous ne rapportons plus alors cette image à sa vraie place, c'est-à-dire, aux endroits où se croisent les rayons, mais elle nous paraît être derrière la lentille, à peu près comme celle qui a lieu lorsque l'objet est situé en deçà du foyer des rayons parallèles, excepté que dans le cas présent, elle est renversée et plus petite que l'objet. Nous parlerons bientôt d'un cas

(1) L'œil doit être situé dans ce cas, au-delà du foyer des rayons parallèles qui est de son côté.

particulier, dans lequel les deux images se réduisent à une seule, que l'on voit alors des deux yeux.

1438. Il s'agit maintenant de prouver que parmi les divers cônes qui, des différens points d'un objet AB (*fig.* 142) se dirigent vers la lentille, il y en aura toujours qui seront repliés par la réfraction, de manière à produire les effets qui viennent d'être décrits. Supposons les deux yeux situés en o et o' . Du point B il part un faisceau eBu , dont les rayons extrêmes Be , Bu se réfractent dans la lentille suivant es et uz ; et comme le rayon émergent qui sort par s est plus éloigné de l'axe que celui qui sort par z , il s'inclinera vers ce dernier; en sorte que les deux rayons, après s'être croisés en b , se dirigeront vers l'œil, et tendront à lui faire apercevoir dans ce même point ou à peu près, l'image du point B . Par un raisonnement semblable, on prouvera que le faisceau Ad tend à produire le même effet sur l'œil o , par rapport à l'image qui se forme en a du point A , et ainsi de tous les points intermédiaires de l'image ab . Ce qui vient d'être dit de cette image s'applique, de soi-même, à l'image $a'b'$ que l'œil o' aperçoit par l'intermède des faisceaux Ag et Bf , et l'on conçoit sans peine comment les deux images sont l'une et l'autre renversées et plus petites que l'objet.

La circonstance dont il s'agit ici est analogue à celle qui a lieu lorsqu'à l'aide d'un miroir concave (1290) on aperçoit l'image double, soit derrière le miroir, soit par devant, par ce que l'œil, qui est accoutumé à rapprocher et à identifier, pour ainsi dire, les deux images dans les cas ordinaires, où elles coïncident presque exactement, les reçoit ici sous des positions tellement séparées, qu'il ne se prête plus à l'illusion qui les lui ferait juger réunies en une seule.

1439. Mais il peut arriver que les yeux, en variant leurs mouvemens, parviennent à une position sous laquelle les quatre faisceaux se croisent deux à deux aux endroits où leurs rayons ont eux-mêmes leurs intersections, auquel cas, les points a , a' d'une part, et les points b , b' de l'autre se confondront, ainsi que le représente la *fig.* 143, et alors il n'y aura plus qu'une seule image, qui sera vue des deux yeux à la fois.

Le premier phénomène, savoir, celui qui produit les deux images représentées *fig. 142*, a cela de singulier, que les lieux où l'on rapporte ces images ne sont pas situés entre la lentille et l'objet; et voici comment on peut expliquer jusqu'à un certain point cette singularité. On ne voit chacune des images dont il s'agit que d'un œil, comme nous l'avons dit, d'où il suit qu'il n'y a qu'un des axes optiques qui soit dirigé vers chaque image; et ainsi il manque une des conditions qui sont communément nécessaires pour nous aider à bien juger de la position des objets (1221) et qui le deviennent surtout lorsque la vision se fait par l'intermédiaire d'un verre qui tire l'œil, en quelque sorte, de son état ordinaire. Ajoutons que, dans le cas présent, la position du véritable objet, au-delà du verre, nous porte à juger que l'image est située du même côté.

1440. Si l'on présente un verre terne en deçà de la lentille, à l'endroit où se forment des cônes partis des différens points de l'objet, on apercevra les deux images sur ce verre même, comme s'il était nécessaire de donner un fond à cette peinture, tracée en quelque sorte au milieu de l'air, pour distraire l'œil de l'illusion où le jette la présence de la lentille; et ce qui prouve que, dans ce cas, ce sont les prolongemens mêmes des rayons reçus par ce tableau qui, en pénétrant le verre vont copier au fond de l'œil les traits du dessin, et non pas de nouveaux rayons réfléchis par la surface postérieure du verre, c'est que s'il n'y a qu'une seule image, elle se montre ou disparaît suivant que l'on ferme l'un ou l'autre œil, comme cela aurait lieu sans l'interposition du verre terne. Voilà déjà un moyen de rapporter l'image à sa vraie place.

1441. Mais voici une expérience qui produit le même effet sans intermédiaire. Vous placez une lentille dans une position verticale, à une telle distance d'un objet très sensible, par exemple, d'une boule de métal attachée au haut d'un fil de fer vertical, que vous puissiez voir deux images de cette boule à travers la lentille; vous écartez les yeux ensuite par degrés, et en même temps les deux images se rapprochent et deviennent toujours plus petites. Enfin, il y a un terme où elles concourent

en une seule, et alors les deux axes optiques se trouvant dirigés sur cette image unique, vous la voyez très distinctement en dedans de la lentille. Ce cas est celui que présente la *fig. 143*.

Maintenant si, en continuant de fixer l'image, vous rapprochez peu à peu les yeux de la lentille, vous voyez toujours l'image simple, quoique vous repassiez par des points où auparavant vous l'aviez vue double, et de plus, elle vient elle-même comme au-devant de vous. Il nous est arrivé quelquefois, en pareille circonstance, d'amener cette image à la proximité de sept ou huit centimètres de l'œil, ce dont il était facile de juger en avançant le doigt de manière qu'il se trouvât à côté de l'image; et pour parvenir de nouveau à la voir double, nous étions obligés de recommencer l'expérience, après avoir regardé d'autres objets, comme pour effacer la dernière impression, et faire naître l'illusion dont elle avait pris la place.

Moyen de remédier au défaut de la Vue chez les Presbytes.

1442. Les yeux naturellement le mieux conformés subissent avec l'âge différentes altérations : leurs humeurs se dessèchent et diminuent de volume; la cornée et le cristallin s'aplatissent, la lumière y est moins infléchié par la réfraction : et, par une suite nécessaire, les sommets des pinceaux qui se forment dans l'œil ne tombent plus sur le fond de cet organe, mais tendent à aboutir au-delà. L'image alors, au lieu d'être composée de points distincts, n'est plus qu'un assemblage confus de petits cercles qui anticipent les uns sur les autres. On conçoit, d'après cela, pourquoi ceux dont la vue commence ainsi à baisser par l'effet de l'âge, et auxquels on a donné le nom de *presbytes*, parviennent à lire encore assez distinctement, en plaçant le livre plus loin de leurs yeux; car de cette manière les cônes de lumière envoyés par les différens points de l'écriture ayant des axes plus longs, tandis que leur base reste égale au cercle de la prunelle, il en résulte qu'en général les rayons divergent moins en allant vers l'œil, que dans le cas où le livre serait plus près, et

cette divergence les rend plus propres à converger, en vertu de leur réfraction dans les humeurs de l'œil, ce qui peut rapprocher assez leur point de concours, pour le faire correspondre sur la rétine. Mais lorsque le vice de l'œil, venant à augmenter, prive le vieillard de cette dernière ressource, il y supplée au moyen de verres légèrement convexes, appelés *lunettes*, dont l'effet est de diminuer la divergence des rayons qui, dans ce cas, arrivent à l'œil comme s'ils partaient d'un point plus éloigné; en sorte que quand les verres ont le degré de convexité assorti à l'état de l'œil, les rayons concourent au fond de cet organe.

Usage des Lentilles pour exciter la Combustion.

1443. Lorsque l'on présente une lentille aux rayons solaires, de manière que son axe coïncide avec leur direction, ces rayons, après s'être réfractés deux fois, l'une en traversant le verre, l'autre en repassant dans l'air, vont se rassembler dans un certain espace situé sur l'axe, et que l'on appelle *le foyer* de la lentille. Les corps exposés à l'activité de ce foyer y subissent des altérations analogues à celles que produit le foyer du miroir concave (1188). La lentille, dans ce cas, prend le nom de *verre ardent*. Tschirnausen et Hartzocker ont construit de ces lentilles qui avaient 13 décimètres (4 pieds) de diamètre.

Plus la lentille a d'étendue, et plus le foyer renferme de rayons. Mais ce foyer est proprement un assemblage d'une infinité de foyers, dont la dispersion sur différens points de l'axe fait perdre aux rayons une grande partie de leur activité. On les détermine à produire des effets beaucoup plus puissans, en les faisant passer par une seconde lentille plus petite, et d'une forme très convexe. Cette lentille réunit ainsi à l'avantage qui résulte d'une plus grande abondance de rayons, celui de les resserrer dans un espace plus étroit, où leur action s'exerce avec beaucoup plus d'énergie.

Effets des Verres Biconcaves.

1444. Lorsqu'on a bien saisi les effets des verres lenticulaires, il est facile de concevoir ceux des verres biconcaves, qui ont en général des propriétés contraires. Ainsi ces derniers verres font voir les objets plus petits qu'ils ne le sont réellement, parce que les deux côtés de l'angle visuel, qui mesure la grandeur apparente de l'objet, perdant une partie de leur convergence en traversant le verre, cet angle devient plus petit qu'il ne le serait à la vue simple.

1445. Les mêmes verres diminuent la clarté des objets, parce que chaque pinceau de lumière se dilate par l'effet de la réfraction; d'où il suit qu'il arrive moins de rayons à la prunelle que si le pinceau eût conservé le degré de dilatation qu'il avait en partant de l'objet.

1446. Enfin, si l'on suppose que les rayons qui entrent dans l'œil soient prolongés du côté opposé, leur point de concours sera plus près de l'œil que dans le cas de la vision ordinaire. C'est encore une suite de la dilatation des pinceaux, qui rend les rayons plus divergens vers l'œil, ou, ce qui revient au même, plus convergens dans le sens opposé, que si le verre n'existait pas.

Il est vrai que quand nous regardons un objet au moyen d'un verre biconcave, notre premier mouvement est de le juger plus éloigné qu'à la vue simple, parce que nous le voyons plus petit; mais un coup-d'œil plus attentif redresse bientôt ce faux jugement; car si l'on fait une expérience semblable à celle que nous avons indiquée (1435), en parlant du verre lenticulaire, c'est-à-dire, si l'on fait aller et revenir, derrière le verre biconcave, un objet délié et d'une certaine longueur, et que l'on compare la distance apparente de la partie vue par réfraction, avec celle de l'autre partie qui dépasse le verre et que l'on voit à l'œil nu, il sera facile d'apercevoir que la première distance est plus petite que l'autre.

*Moyen de remédier au défaut de la Vue chez
les Myopes.*

1447. On appelle *Myopes* ceux qui , par un défaut naturel, ont la cornée et le cristallin trop convexes. Cette figure , qui augmente la quantité de la réfraction , tend à rendre plus convergens les rayons des pinceaux qui se forment dans l'œil , en sorte que le point de concours des mêmes rayons est situé en deçà de la rétine. Aussi les myopes ne voient-ils distinctement que les objets voisins, qui envoient vers l'œil des rayons plus divergens , et par là moins disposés à converger, par l'effet de la réfraction dans le cristallin et les humeurs de l'œil. Cette imperfection étant opposée à celle qui affecte l'œil des presbytes , on y remédie par l'usage d'un verre légèrement concave , qui , augmentant la divergence des rayons que reçoit l'œil , allonge les pinceaux qui se forment dans cet organe , et détermine leurs sommets à tomber exactement sur la rétine.

1448. Les myopes semblent affectionner les petits objets : la plupart écrivent très fin , et préfèrent de lire les ouvrages imprimés en petit caractère , parce qu'en adoptant des dimensions assorties à la portée étroite de leur vue , ils se ménagent la faculté d'embrasser un plus grand nombre d'objets d'un seul regard. Ils ont aussi l'habitude de fermer en partie les paupières (1), lorsqu'ils veulent voir distinctement des objets trop éloignés pour eux. On a cité deux avantages de ce mouvement naturel. D'une part, il détermine la paupière à se contracter et à donner accès à une plus petite quantité de lumière. Or , les myopes ne voient confusément les objets situés à une certaine distance , qu'en conséquence de ce que les cônes qui se forment dans leurs yeux ont, comme nous l'avons dit , leur sommet en deçà de la rétine, en sorte que les prolongemens des rayons dont ces cônes sont les assemblages donnent naissance à de nouveaux cônes , dont la base rencontrant le fond de l'œil , y dessine un petit cercle, au lieu

(1) C'est ce qu'on appelle communément *cligner*.

d'un simple point. Donc, lorsque le nombre des rayons qui s'introduisent dans l'œil est diminué, le petit cercle dont il s'agit est plus rétréci, et la vision en devient moins confuse. D'une autre part, les paupières, en se fermant, exercent sur l'organe une pression qui en diminue la convexité, et le ramène en partie vers la forme la plus favorable à la netteté de la vision.

Microscope simple.

1449. Lorsqu'on veut observer de très petits objets, comme les étamines et les pistils des fleurs, les parties d'un insecte, on se sert communément d'une petite lentille dont la distance focale est fort courte, ou d'un globule de verre; c'est ce que l'on appelle *microscope simple*. Supposons d'abord que l'on emploie une lentille *mn* (fig. 144); il est facile de concevoir que si cette lentille est mince, et que l'œil soit appliqué en *o*, tout près de sa surface, l'angle *aob*, sous lequel cet œil verra l'objet *ab* que l'on suppose très petit, sera à peu près le même qu'à la vue simple; car les rayons *ao*, *bo* passeront très près du milieu *c* de la lentille, et par conséquent ils sortiront sensiblement parallèles aux directions qu'ils avaient en partant de l'objet, en sorte que leurs inclinaisons mutuelles ne seront presque point dérangées par l'effet de la lentille. Il suit de là que le microscope simple fait voir les objets à peu près sous la même grandeur apparente que s'ils étaient vus immédiatement à la même proximité de l'œil. Or, voici ce que l'on gagne à se servir d'une lentille.

1450. Un petit objet placé très près de l'œil nu, n'y produit qu'une image confuse, parce que les rayons qui composent les cônes de lumière envoyés par les différens points de cet objet, étant très sensiblement divergens, ne peuvent se replier assez dans les humeurs de l'œil, pour que les sommets des cônes intérieurs aboutissent à la rétine. Les points de concours tendent à se former plus loin, et l'on peut dire qu'à cet égard tous les hommes sont presbytes. On s'en convaincra facilement en regardant un petit objet très voisin de l'œil; l'image de cet objet paraîtra très amplifiée, parce que l'œil étant, pour ainsi dire, en deçà des limites dans lesquelles est

renfermé le champ de ses observations ordinaires, juge de la grandeur réelle par la grandeur apparente, comme lorsqu'il est au-delà des mêmes limites, c'est à-dire, lorsque l'objet est très éloigné de lui; mais en même temps l'image prendra la forme d'une espèce de brouillard, par la raison que nous avons exposée.

Si, dans la même circonstance, on regarde l'objet à travers un papier percé d'un trou d'épingle, l'image paraîtra beaucoup plus nette, parce que ce trou ne laissera passer qu'une petite portion des rayons qui appartiennent à chaque cône, en sorte que les petits cercles que formeront sur le fond de l'œil les cônes intérieurs, étant presque réduits à de simples points, leurs impressions seront beaucoup plus distinctes.

1451 Maintenant voici ce que fait le microscope simple; il diminue sensiblement la divergence des rayons qui composent les cônes partis de l'objet, et les fait parvenir à l'œil sous le même degré d'inclinaison que s'ils venaient d'un objet situé à une distance ordinaire. En conséquence, la vision de cet objet deviendra distincte, et en même tems l'image prendra un nouveau degré de clarté, parce que, dans ce cas, la réfraction rassemble et condense les rayons, de manière qu'il en arrive davantage à la prunelle qu'elle n'en recevrait sans l'interposition du verre (1441): de plus, l'angle visuel restant le même, l'objet sera vu sous la même grandeur apparente. Ainsi l'on sait qu'en général, un homme doué d'une bonne vue aperçoit distinctement un objet à la distance d'environ 22 centimètres (8 pouces); mais si l'objet est très petit, l'angle sous lequel on le voit à cette distance rétrécit tellement l'image au fond de l'œil, que la vision n'a plus assez de netteté. Le microscope assimile l'image à celle d'un objet d'une grandeur très sensible, qui serait placé à cette distance ordinaire de 22 centimètres, où la vision immédiate est distincte. Il laisse à l'œil l'avantage de l'augmentation de grandeur, et fait disparaître l'inconvénient qui naît de la trop grande proximité de l'objet.

On dispose la lentille de manière que l'objet coïncide sensiblement avec son foyer, parce qu'alors les rayons de chaque pin-

beau extérieur arrivent à l'œil ou parallèles, ou très peu divergens, ce qui est la condition requise pour la netteté de la vision, en supposant l'œil bien conformé.

1452. Dans la même hypothèse, le diamètre apparent de l'objet, vu à travers la lentille, est à celui qui aurait lieu à la distance où l'œil aperçoit distinctement les objets ordinaires, comme l'angle sous lequel cet œil voit l'objet placé au foyer de la lentille, est à celui sous lequel il le verrait à la distance dont nous avons parlé. Or, les deux angles sous-tendent des cordes égales qui mesurent l'une et l'autre le diamètre réel de l'objet, de manière que chacun d'eux forme avec sa corde un triangle dont celle-ci est la base. Donc ces angles sont entre eux à peu près en raison inverse des hauteurs des triangles auxquels ils appartiennent. Or, la hauteur du triangle le plus court est la distance focale de la lentille, et la hauteur du plus long triangle est la distance relative à la vision distincte; d'où il suit que le diamètre de l'objet paraît amplifié dans le rapport de cette dernière distance à la distance focale de la lentille. Par exemple, si nous supposons toujours que la distance relative à la vision distincte des objets d'une grandeur sensible soit de 22 centimètres, et que la distance focale de la lentille soit de 2^{millim.},5, le diamètre de l'objet paraîtra augmenté dans le rapport de 88 à l'unité.

1453. On peut substituer à une lentille un globe de verre, que l'on forme aisément en faisant fondre un petit fragment de cette substance à la flamme d'une mèche à alcool, pour éviter le mélange de matière fuligineuse qui troublerait la transparence du verre. On fait aussi des microscopes simples par un procédé très facile, en perçant une plaque mince de métal d'un petit trou, et en faisant couler dans ce trou une goutte d'eau suspendue à une tête d'épingle, de manière que la goutte prenne une forme bien arrondie; mais ces sortes de gouttes produisent moins d'effet que les globules de verre, parce que leur puissance réfractive est plus petite.

De la Vision aidée par les Instrumens composés de plusieurs Verres.

Il nous reste à faire connaître les ressources que l'art a su tirer de la combinaison des verres, soit entre eux, soit avec les miroirs, pour créer ces instrumens qui sont devenus si féconds en découvertes entre les mains des astronomes, des naturalistes, et de toute cette classe d'observateurs qu'on a désignés sous le nom de *savans aux yeux de lynx*.

Les effets des télescopes et des microscopes dépendent, en général, de ce qu'un premier verre fait naître dans l'espace compris entre lui et le suivant, une image que celui-ci transporte à son tour derrière un nouveau verre, et ainsi de suite, de manière que la dernière image devient comme l'objet immédiat de la vision; et toute la théorie relative à ce sujet consiste à déterminer la construction la plus avantageuse pour rendre cette dernière image aussi distincte, aussi grande et aussi éclairée qu'il est possible. L'œil qui reçoit cette image fait, en quelque sorte, partie du télescope ou du microscope, et l'ensemble de l'un et l'autre forme comme un seul instrument d'optique, ou, si l'on veut, un œil unique, qui réunit toute la puissance de la nature et de l'art pour élever la vision à son plus haut point de perfection.

Lunette astronomique.

1454. Le plus simple de tous les télescopes est celui qui porte le nom de *télescope* ou de *lunette astronomique*; il est composé de deux verres convexes, dont l'un gh (fig. 145), qui est tourné vers l'objet, s'appelle *objectif*, et l'autre kn , situé vers l'œil o , est l'*oculaire*. Ce dernier a plus de convexité que l'autre, et son foyer r se confond avec celui de l'objectif gh , en sorte que cl est égale à la somme des distances focales. L'œil placé au point o , où est situé l'autre foyer de l'oculaire, reçoit des rayons dont les impressions sur la rétine y représentent l'objet renversé et très amplifié.

Il est aisé de juger, d'après la seule inspection de la figure, que l'objectif gh produit d'abord en ab une image de l'objet très éloigné AB , semblable à celle dont nous avons exposé précédemment la formation (1435), et que l'on pourrait recevoir immédiatement, en plaçant un carton blanc à la distance re du centre de l'objectif. Cette image se trouve substituée au véritable objet, et les pinceaux kbm , nax , etc., qui partent de ses différens points, et dont les rayons ne sont autre chose que les prolongemens de ceux qui ont passé à travers l'objectif, se replient dans l'oculaire, de manière qu'en repassant dans l'air, ils concourent vers l'œil suivant des directions zo , po , en même temps que les rayons de chaque pinceau perdent presque toute leur divergence, ce qui donne de la netteté à l'image au fond de l'œil. D'une autre part, l'angle zop sous lequel l'œil aperçoit l'objet fictif ab étant beaucoup plus grand que celui sous lequel il verrait le véritable objet, la grandeur apparente se trouve considérablement augmentée; et l'on prouve, par la Géométrie, qu'elle est à la grandeur sous laquelle l'œil verrait immédiatement l'objet, comme la distance focale de l'objectif est à celle de l'oculaire (1).

(1) Soit AB (fig. 146) le diamètre d'un objet très éloigné, tel que la lune; soient m , r les foyers des rayons parallèles, relativement à l'objectif gh , et r , f ceux des mêmes rayons à l'égard de l'oculaire kn . On pourra toujours supposer, à cause de la grande distance à laquelle l'objet est situé, qu'un rayon parti d'une des extrémités, telle que A , de cet objet, après avoir passé par le foyer m , aille rencontrer la lentille gh ; d'où il suit qu'il en sortira suivant une direction telle que hn , parallèle à l'axe Rr , et qu'après avoir subi une nouvelle réfraction dans la lentille kn , il se dirigera vers le foyer f . Concevons maintenant un autre rayon Ae qui passe par le centre de la lentille gh . Le rayon réfracté ea faisant un angle extrêmement petit avec l'axe cl , de manière qu'il lui est à peu près parallèle, sortira de la lentille nk sous une direction telle, que le point o où il ira couper l'axe, coïncidera presque avec le foyer f des rayons parallèles. Or le rayon Aea peut être regardé comme l'axe du pinceau qui forme en a une des extrémités de l'image située dans l'intervalle entre les deux lentilles; et puisque les points o , f , ainsi que les directions des deux rayons qui aboutissent à ces points, approchent beaucoup de se confondre, si l'on suppose l'œil situé en o , l'angle nfl sera sensiblement celui sous lequel cet œil voit, à travers le télescope, le demi-diamètre de l'image ampli-

Il suit de là que l'on gagne du côté des dimensions, à employer des oculaires d'un foyer plus court; mais en même temps on perd du côté de la netteté de l'image qui se peint au fond de l'œil, parce que les rayons d'un même pinceau, après avoir traversé un oculaire dont le foyer étant plus rapproché exige une plus grande convexité, ne concourent pas aussi exactement sur la rétine en un point commun.

Lunette de Galilée.

1465. La lunette que nous venons de décrire ne sert que pour les objets célestes, à l'égard desquels le renversement de l'image a peu d'inconvéniens. On a imaginé, pour les objets terrestres, une autre espèce de lunette, connue sous le nom de *Lunette Batavique* ou de *Lunette de Galilée*, qui est composée d'un objectif convexe et d'un oculaire concave, et qui fait voir les objets droits. Voici la marche de la lumière dans cette lunette.

Lorsqu'un objet est situé derrière un verre convexe, au-delà du foyer des rayons parallèles, l'image que forment, du côté opposé, les rayons partis des différens points de l'objet (1438), devient plus petite à mesure que cet objet est plus éloigné. Or,

féc. Mais parce que l'objet est extrêmement éloigné, l'intervalle entre les point o , m doit être considéré comme nul; en sorte que l'on peut supposer que l'angle AmR , ou son égal cmh , soit celui sous lequel l'œil verrait le demi-diamètre de l'objet à la vue simple. Donc la grandeur apparente, dans la vision à l'aide du télescope, sera à celle qui résulte de la vision naturelle, comme l'angle nfl est à l'angle cmh . Or, ces deux angles étant très petits et appuyés sur des côtés égaux ch et ln , sont sensiblement entre eux comme cm ou cr est à fl .

Car si l'on fait coïncider cmh , lon par leurs côtés ch , ln , ainsi que le représente la fig. 147, les angles chm , col , que l'on suppose toujours très petits, seront à peu près comme leurs sinus, ou comme les côtés oh , lm , qui, dans le triangle moh , sont opposés à ces angles. Or, le rapport de oh à lm diffère très peu à son tour de celui de co à cm , qui sont les deux distances focales. Voyez *Huygens, Opera reliqua*, Amstelod. t. II, Dioptr., p. 134 et Smith, *Traité d'Optique*, p. 76.

telle est la petitesse de celle que tend à produire l'objectif de la lunette batavique, que l'espace qu'elle occuperait, sur un carton placé à la distance convenable, serait sensiblement moindre que la surface sur laquelle les objets se peignent au fond de l'œil.

Soit gh (fig. 148) l'objectif: soient AC , BC deux rayons partis des extrémités de l'objet, lesquels, après s'être croisés au centre C de l'objectif, auraient été former en ab une petite image de l'objet. Si l'on place un oculaire biconcave kn entre l'objectif et cette image, les rayons divergens Cs , Ct le deviendront encore davantage en passant à travers cet oculaire, et prendront les directions $s'b'$, $t'a'$; d'où il suit que si la ligne Dd représente le diamètre de la prunelle de l'observateur, il verra l'image de l'objet sous la grandeur $b'a'$ beaucoup plus considérable que celle sous laquelle il la verrait sans intermédiaire.

Supposons que Cs , Dt soient les axes des pinceaux envoyés par les points A , B ; les rayons qui forment ces pinceaux convergeront vers l'oculaire, puisqu'ils iraient sans lui se réunir en a et en b ; et telle est la courbure de ce verre, qu'il rendra les rayons émergens parallèles ou à peu près, en sorte qu'ils entreront dans l'œil sous les directions convenables pour produire une image nette au fond de cet organe.

Enfin, il est évident que l'objet paraîtra droit, parce que les rayons partis des points A et B , au lieu de se croiser, à l'ordinaire, en traversant la prunelle, se seront croisés en passant à travers l'objectif, ce qui produit le même effet par rapport à la situation de l'image.

Tel est donc l'effet de l'oculaire kn que, par son intermède, les rayons qui tendaient à faire naître dans l'espace l'image ab , la peignent au fond de l'œil sous de plus grandes dimensions, comme si cette image était celle d'un objet situé au-delà de z , et dont les extrémités envoyassent des rayons qui, après s'être croisés dans ce même point, continuassent leur route sans se croiser dans la prunelle elle-même, en suivant les directions zb' , za' . La grandeur apparente de l'image est à celle sous laquelle l'œil verrait l'objet, à la vue simple, dans le rapport de la distance

focale de l'objectif à celle de l'oculaire, comme cela a lieu pour la lunette astronomique (1).

1456. On nomme *champ* d'une lunette l'étendue de l'espace qu'elle permet à l'œil d'embrasser. Dans la lunette astronomique, la grandeur du champ dépend de la largeur de l'oculaire; mais dans celle de Galilée elle est déterminée par la largeur de la prunelle, parce que les pincesaux de lumière $s'b'$, $t'a'$, qui sortent de l'oculaire et qui renferment entre eux tous les autres envoyés par l'objet, vont, en s'écartant, passer près des bords de la prunelle, au lieu que dans la lunette astronomique, les pincesaux partent des bords de l'oculaire sous des directions convergentes, pour aller ensuite se croiser dans la prunelle; aussi la lunette de Galilée a-t-elle moins de champ, ce qui la rend d'un usage moins commode.

Lunettes à quatre Verres.

1457. On parvient à redresser les objets vus au moyen de la lunette astronomique, en ajoutant deux nouveaux verres tellement disposés, que les foyers des verres voisins se confondent toujours en un point commun. Ces verres portent le nom d'*oculaires*, comme celui qui est à la proximité de l'œil. On jugera aisément des effets de cette lunette à la seule inspection de la figure 149. Les rayons eb , da , etc., qui forment l'image ab derrière l'objectif gh , après avoir pénétré le deuxième verre il , se croisent au foyer commun c de ce verre et du suivant ts ; ils passent à travers ce troisième verre, au-delà duquel ils vont former une seconde image $a'b'$, qui est renversée par rapport à la précédente, et enfin l'oculaire kn les reçoit, en les rendant convergens vers le centre O de la prunelle.

1458. A mesure que les objets vus à travers cette espèce de lunette sont plus éloignés, on est obligé de la raccourcir, pour conserver à la vision le même degré de netteté, c'est-à-dire, que l'on

(1) Smith, Traité d'Optique, p. 79.

fait mouvoir un tuyau qui porte les oculaires kn , ts , il , de manière que le dernier se rapproche de l'objectif gh . Si au contraire les objets sont à une plus petite distance, on allonge la lunette, à l'aide d'un mouvement contraire, qui écarte l'oculaire il de l'objectif gh .

Pour concevoir la raison de ces mouvemens, supposons d'abord l'objet à la distance où la marche des rayons étant celle que représente la figure, tout soit disposé de la manière la plus favorable à la netteté de la vision. Imaginons ensuite que le spectateur aille se placer plus loin de l'objet. Les rayons partis du point R , que nous prenons pour exemple, formeront derrière l'objectif leur foyer en deçà du point r (1042); il faudra donc, pour que la vision ne souffre pas de ce déplacement du foyer, que les oculaires s'avancent vers l'objectif, d'une quantité égale à celle dont le foyer r s'en est rapproché. Alors ce foyer se retrouvant dans la même position qu'auparavant, à l'égard des oculaires, les rayons qu'il leur envoie les traverseront et arriveront à l'œil dans le même ordre.

Si nous supposons au contraire que le spectateur se rapproche de l'objet, alors le foyer qui était en r se placera plus loin de l'objectif, et il faudra que les oculaires reculent à leur tour d'une égale quantité, pour que l'œil continue de voir nettement l'image de l'objet.

1459. Les personnes qui regardent pour la première fois des objets éloignés à travers une lunette, sont souvent surprises de ne pas les voir d'une grandeur démesurée, comme elles s'y attendaient. Car l'effet de la lunette, lorsqu'on s'en sert, par exemple, pour observer un homme placé à une grande distance, est de nous le faire juger beaucoup plus près, et de rendre tous ses traits beaucoup plus nets et mieux prononcés; et quant à la grandeur, il est vrai qu'elle est augmentée, si nous la comparons à celle sous laquelle nous verrions cet homme dans l'éloignement où nous le supposons; mais elle n'excède pas sensiblement celle que nous lui attribuerions, s'il était placé à une distance ordinaire.

Pour analyser cette action de la lunette, il faut d'abord remarquer que l'objet immédiat de la vision est ici l'image $a'b'$ qui se

forme derrière l'oculaire, et qui est beaucoup plus petite que l'objet réel, et en même temps très voisine de l'œil. Mais l'oculaire produit ici deux effets; d'une part, les rayons de chacun des cônes envoyés par les extrémités a' , b' , que nous nous bornons encore ici à considérer, sortent de ce verre avec un léger degré de divergence, qui les met dans le même cas que s'ils partaient d'un objet beaucoup plus éloigné que l'image, mais beaucoup moins que l'objet réel. D'une autre part, ces cônes, après leur émergence, deviennent convergens, en formant un angle beaucoup plus grand que celui sous lequel l'œil verrait, à la vue simple, l'homme vers lequel est dirigée la lunette; enfin telle est l'abondance des rayons qui composent ces mêmes cônes, que l'image qu'ils substituent à celle de l'objet réel se peint nettement sur la rétine.

Il résulte de ce qui vient d'être dit, que la lunette produit en nous une illusion qui tend à nous faire croire que c'est l'objet réel qui est venu tout à coup se mettre à la portée ordinaire de nos yeux. La diminution apparente de distance devient très sensible pour nous, ainsi que l'augmentation de clarté, comme cela aurait lieu dans l'hypothèse d'un véritable rapprochement; et à l'égard de la grandeur jugée, quoiqu'elle se trouve aussi augmentée, par rapport à celle de l'objet vu dans le lointain, cet accroissement n'a rien d'extraordinaire, par la raison que l'homme qui est le sujet supposé de l'expérience, ne nous paraîtrait pas être un géant, s'il s'était avancé vers nous, par un mouvement subit.

Aberration de Sphéricité.

1460. Les instrumens que nous venons de décrire, et en général tous ceux qui sont connus sous le nom de *telescopes dioptriques*, ont deux défauts frappans qui empêchent que les images ne soient nettes et bien terminées.

Le premier, que l'on nomme *aberration de sphéricité*, provient de la figure sphérique des verres, qui ne permet qu'aux rayons très voisins de l'axe de concourir sensiblement en un point commun. Ceux qui sont plus éloignés, étant plus fortement ré-

fractés, coupent l'axe en deçà du même point, en sorte que le foyer est réellement un espace d'une certaine étendue. Il en résulte que l'image principale, ou celle qui est produite à l'endroit où il se réunit le plus de rayons, est comme offusquée par une multitude d'autres images qui rendent la vision confuse.

1461. Le moyen le plus simple que l'on ait trouvé jusqu'ici pour remédier à cet inconvénient, est de diminuer la surface de l'objectif. L'étendue de cette surface est ce qu'on appelle l'*ouverture* du télescope, et elle se mesure par le nombre de degrés renfermés dans l'arc qui passe par deux points opposés du bord circulaire de la même surface, et par le point où l'axe de l'objectif la rencontre. En rétrécissant l'ouverture, on intercepte les rayons qui tombent à une certaine distance de l'axe, et qui trouble- raient la vision.

Aberration de Réfrangibilité.

1462. On avait regardé d'abord le défaut dont nous venons de parler, comme le seul qui s'opposât à la perfection des télescopes; mais celui qui provient de la différente réfrangibilité des rayons diversement colorés influe d'une manière bien plus nuisible sur la netteté des images.

Pour bien entendre ceci, remarquons que la surface d'un verre lenticulaire n'est autre chose qu'un assemblage d'une infinité de petits plans, dont deux quelconques pris de deux côtés opposés, sont censés appartenir à deux faces d'un prisme, pourvu qu'ils ne soient point dans les positions où les tangentes sont parallèles. Or, parmi les rayons d'un même faisceau, qui forment un foyer derrière une lentille, il n'y a que l'axe qui sorte parallèlement à lui-même. Tous les autres rayons sortent par des facettes inclinées à l'égard de celles par lesquelles ils sont entrés. Il en résulte qu'une lentille fait subir à la lumière une décomposition analogue à celle qui a lieu par l'intermède d'un prisme. Supposons, pour plus grande simplicité, qu'un faisceau de rayons parallèles rencontre une lentille sous des directions qui soient elles-mêmes parallèles à l'axe de cette lentille. Les rayons, après avoir re-

passé dans l'air, iront former le long de l'axe une série de foyers ; parmi lesquels le plus voisin de la lentille sera celui des rayons violets, qui sont les plus réfrangibles, et le plus éloigné celui des rayons rouges, qui ont la plus petite réfrangibilité ; les autres foyers seront situés entre les précédens, suivant l'ordre de leurs degrés de réfrangibilité. La même chose a lieu à l'égard d'un faisceau qui fait son incidence sous une direction quelconque.

1463. L'effet de la décomposition dont nous venons de parler exerce son influence sur la vision à l'aide des lunettes et des télescopes ordinaires. Les rayons diversement colorés, qui forment les pinceaux envoyés par les différens points de l'objet, étant déagés les uns des autres au sortir de l'objectif, font naître derrière ce verre une image altérée par la diffusion des foyers ; et les rayons qui sortent de l'oculaire transportent cette image au fond de l'œil, avec toutes ses causes d'imperfection. Les couleurs produites par la lumière décomposée s'effacent vers le milieu de l'image, où les rayons recomposent le blanc par leur mélange ; mais elles deviennent sensibles en approchant des bords, et y font apercevoir ces franges irisées qui défigurent les images et les empêchent d'être nettement terminées : ce défaut a été nommé *aberration de réfrangibilité*.

Télescope Newtonien.

1464. Newton, dont les découvertes sur les couleurs ont servi à mettre en évidence le défaut dont nous venons de parler, s'attacha à prouver combien il était nuisible au perfectionnement des télescopes dioptriques, surtout si l'on se proposait de raccourcir ces instrumens, pour les rendre plus maniables et d'un usage plus commode. En conséquence il prononça que la construction d'un télescope de ce genre, qui n'eût qu'une médiocre longueur et conservât aux images une netteté suffisante, était *une affaire désespérée* (1).

(1) *Newtonis Optice*, lib. I, pars 1, propos. 7.

Dans cette persuasion, il tourna ses vues du côté de la réflexion; et imagina une construction dans laquelle il substituait à l'objectif un miroir concave de métal. L'instrument qu'il exécuta d'après ce principe, est connu sous le nom de *Télescope Newtonien*, et nous allons en donner une idée.

1465. Soit AB (fig. 150), l'image d'un objet lointain, produite à l'aide du miroir concave M₁N₁, de manière que SMA, TGA représentent les rayons extrêmes du pinceau envoyé par le point de l'objet auquel répond le point A de l'image. Si l'on voulait faire passer immédiatement cette image à travers un oculaire, on en intercepterait une partie : or on pare à cet inconvénient, en détournant cette image au moyen d'un petit miroir plan *de*, incliné de 45° à l'axe HV du miroir concave, d'où résulte une seconde image *ab*, qui devient l'objet de la vision. Les rayons *ar*, *az* passent à travers l'oculaire *ln*, qui, comme on le voit, est situé de côté, et, après s'être réfractés en repassant dans l'air, suivant des directions *uy*, *qh*, à peu près parallèles, se dirigent vers l'œil placé en O, et lui font voir l'image amplifiée sous l'angle *qOx*. Cette image est renversée en vertu des propriétés du miroir concave que nous avons exposées plus haut (1293). Ces sortes d'instrumens ont été nommés, en général, *Télescopes catadioptriques*, parce qu'ils réunissent les effets combinés de la réflexion et de la réfraction.

1466. Newton avait été prévenu quelques années auparavant, relativement à l'idée d'un télescope construit suivant cette méthode, par Jacques Gregori, qui donna dans son *Optica promota*, la description de celui qu'il avait imaginé. Il employait deux miroirs curvilignes, l'un parabolique, l'autre elliptique; mais la difficulté d'exécuter de pareils miroirs, y a fait substituer depuis des miroirs simplement sphériques : le plus grand est placé au fond du télescope, comme dans la construction de Newton; l'autre qui est très petit, regarde le premier par sa concavité. L'image formée par la réflexion sur le grand miroir, est reçue par le petit, qui la réfléchit à son tour. On place deux oculaires derrière le grand miroir qui est percé dans son milieu d'une ouverture circulaire, par laquelle passe l'image renvoyée par le petit mi-

roir. Le premier oculaire produit une nouvelle image, d'où partent les rayons qui vont se rendre à l'œil en sortant du second oculaire sous des directions parallèles.

Ce télescope fait voir les objets droits, et par là même est plus propre que celui de Newton à l'observation des objets terrestres ; mais il le cède à ce dernier, soit du côté de la clarté, parce que la lumière a un verre de plus à traverser, soit pour la perfection de l'image, parce que le second miroir, qui est concave comme le premier, ajoute encore aux petites altérations inséparables de la réflexion qui se fait sur ces sortes de miroirs. Après tout, la construction des télescopes catadioptriques exigeait une multitude de précautions délicates, et il fallait long-temps tâtonner, pour les diriger vers les objets que l'on voulait observer.

Découverte des Lunettes achromatiques.

1467. Tel était l'état de la Dioptrique, lorsqu'en 1747, Euler, en réfléchissant sur la structure de l'œil, conçut une idée qui a eu les suites les plus avantageuses pour le progrès de cette science. Voici en quoi consiste l'idée dont il s'agit. Lorsque nous regardons les objets à la vue simple, leurs images ne sont altérées par aucun mélange de couleurs étrangères. Cet inconvénient n'a lieu que quand des images produites par la réfraction à travers une lentille, et déjà teintes de couleurs prismatiques, deviennent les objets immédiats de la vision. Euler concluait de là que l'œil avait toutes les propriétés d'un instrument capable de faire disparaître l'aberration de réfrangibilité ; il ne douta point que les différentes humeurs de cet organe ne fussent arrangées de manière qu'il n'en résultât aucune diffusion des foyers, et il jugea qu'en le prenant pour modèle, et en combinant, d'une certaine manière, des milieux de densités différentes, on parviendrait à construire des télescopes, à l'aide desquels les images auraient la même perfection que celles qui ont lieu lorsque nous n'employons pour voir les objets, d'autre instrument que l'œil lui-même.

1468. Euler, en partant de l'idée que nous venons d'exposer, chercha les dimensions que devaient avoir des objectifs compo-

sés de verre et d'eau, pour imiter la combinaison qui a lieu naturellement par rapport à l'œil; mais Dollond, savant opticien anglais, rejeta ces dimensions, parce qu'elles étaient fondées sur une loi de réfraction dont il soupçonnait la vérité (1) : il essaya d'employer une loi différente, qui ne lui réussit pas. La discussion s'engagea de part et d'autre. Euler insistait toujours sur la possibilité d'anéantir la diffusion du foyer par le procédé qu'il avait indiqué. Dollond, de son côté, avait fini par regarder la chose comme absolument impraticable, et il repoussait, avec le nom et l'autorité de Newton, toutes les raisons qu'on lui opposait.

1469. Ce qui rendait ce célèbre artiste si ferme dans son opinion, c'était le résultat d'une expérience de Newton, que nous avons déjà indiquée (1312), et qu'on était bien éloigné de croire qu'il eût manquée, lui qui avait coutume d'interroger si adroitement la nature.

Newton ayant fait passer un faisceau de lumière à travers deux milieux contigus, de densités différentes, savoir, l'eau et le verre, crut remarquer que quand les deux surfaces, dont l'une recevait les rayons incidens et l'autre donnait issue aux rayons émergens, se trouvaient tellement disposées, que la lumière fût redressée par des réfractions contraires, en sorte que les rayons émergens devenaient parallèles aux incidens, elle sortait toujours blanche. Au contraire, si les rayons émergens étaient inclinés aux incidens, la blancheur de la lumière se colorait vers ses extrémités, à mesure qu'elle s'éloignait du point d'émergence (2).

1470. Voici maintenant la conséquence à laquelle conduisit ce résultat, que Newton étendait, par analogie, à toutes les espèces de milieux. Les objectifs que l'on emploie dans la construction des télescopes ne produisent les images qui deviennent les objets de la vision (1453) pour un œil placé derrière l'oculaire, qu'autant que la réfraction à travers ces objectifs écarte les rayons

(1) Smith, *Traité d'Optique*, p. 384, note 66r.

(2) *Optice Lucis*, lib. I, pars 2, experim. 8.

émergens , relatifs à chaque pinceau de lumière , du parallélisme avec les rayons incidens. Donc , puisque l'on ne peut empêcher que , dans le cas où ce parallélisme cesse d'avoir lieu , les couleurs renfermées dans la lumière ne se séparent , même lorsque l'on essaie de combiner des substances différemment réfringentes , il est impossible de concilier la destruction des franges irisées qui bordent les images , avec l'effet de la réfraction pour produire ces mêmes images. Cette conséquence s'éclaircira encore d'après les nouveaux détails dans lesquels nous entrerons bientôt.

La persuasion où l'on était que Newton avait fait son expérience avec l'exactitude qui lui était ordinaire , les recherches de Clairaut , qui , ayant examiné la loi proposée par Euler , avait trouvé qu'elle ne soutenait pas l'épreuve du calcul , tout conspirait à faire croire que Newton avait posé la borne qu'il était défendu à la science et à l'art de franchir.

1471. Cependant , en 1755 , Klिंगenstiern , professeur de Mathématiques à Upsal , fit passer à Dollond un écrit dans lequel il se bornait à attaquer l'expérience de Newton par la Métaphysique et par la Géométrie , mais d'une manière assez imposante pour forcer Dollond de douter de la vérité de cette expérience. Enfin il osa la répéter , et la trouva fautive. Il joignit deux plaques de verre par deux de leurs bords , en sorte qu'il pouvait faire varier à volonté l'angle qu'elles formaient entre elles , puis il remplit d'eau l'espace intermédiaire ; il plongea dans cet eau un prisme de verre , dont l'angle était tourné en haut , c'est-à-dire en sens contraire de l'angle formé par les deux plaques de verre. Il inclina ensuite ces plaques sous différens degrés , jusqu'à ce que les objets vus au travers de ce double prisme parussent sensiblement à la même hauteur que dans la vision simple. Il était bien sûr alors que les réfractions se détruisaient l'une l'autre , c'est-à-dire , que les rayons émergens étaient parallèles aux rayons incidens. Or , les images , dans ce même cas , étaient teintes des couleurs de l'iris. Venait-on ensuite à faire mouvoir de nouveau les plaques de verre jusqu'à un certain degré d'inclinaison , les iris disparaissaient ; mais les objets n'étaient plus à la même hauteur que

quand on les regardait immédiatement, et ainsi l'aberration de réfrangibilité était anéantie, sans que les réfractions se corrigassent mutuellement (1).

Cette expérience décida la question. On chercha des substances dont la combinaison fût propre à détruire la diffusion des foyers, en laissant subsister la plus grande quantité possible de réfraction. Des géomètres illustres s'occupèrent de déterminer les courbures les plus avantageuses relativement aux objectifs composés de différens milieux; et c'est de toutes ces recherches qu'est sortie la construction des lunettes *achromatiques*, c'est-à-dire, de celles qui font voir les images nettement terminées et sans aucunes franges de couleur empruntées. Nous allons exposer, le plus clairement que nous pourrons, à l'aide du simple raisonnement, les principes sur lesquels est fondée cette construction.

Théorie des Lunettes achromatiques.

1472. Nous avons vu (1105) que Newton avait déterminé immédiatement les différences entre les sinus de réfraction des rayons diversement colorés qui composent la lumière, pour le cas où le passage se fait du verre dans l'air, et qu'il avait trouvé que la loi de ces différences était la même que celle qui représente les sept notes de notre échelle musicale, relative au mode mineur. Supposons que l'on emploie un prisme d'une autre matière que le verre, et qui soit par exemple beaucoup plus dense. Si les circonstances sont les mêmes, c'est-à-dire, si les deux angles réfringens sont égaux, et les rayons incidens également inclinés aux surfaces réfringentes, ces rayons s'infléchiront en général sous de plus grands angles dans le second prisme; d'où il suit que la quantité dont le faisceau sera dilaté, au sortir de ce prisme, sera plus considérable. Supposons, de plus, que les réfractions partielles suivent entre elles une même loi relativement à toutes les espèces de substances, c'est-à-dire, cette loi qui est représentée par notre échelle musicale. Si l'on prend pour terme de com-

(1) Smith, Traité d'Optique, p. 383, notes 658 et suiv.

paraison la réfraction du rayon qui occupe le milieu du spectre solaire, et que l'on peut regarder comme l'axe du faisceau dilaté, il est clair que la quantité totale de la dilatation suivra, pour es différentes substances, le même rapport que la réfraction du rayon dont il s'agit; en sorte que si cette dernière est, par exemple, d'un tiers plus forte dans le second prisme, le faisceau qui en sort se trouvera dilaté sous un angle plus ouvert à proportion. La réfraction de ce rayon, qui occupe le milieu du spectre, est ce qu'on appelle la *réfraction moyenne*, et la quantité de la dilatation, ou l'excès de la réfraction du rayon violet sur celle du rayon rouge, se nomme *dispersion*.

Dans la même hypothèse, où la réfraction moyenne serait proportionnelle à la dispersion, on ne pourrait jamais détruire l'effet de la dispersion en combinant plusieurs milieux, sans que l'effet de la réfraction moyenne ne fût en même temps anéanti; car la compensation qui aurait lieu à l'égard de l'axe du faisceau s'étendrait également à tous les autres rayons qui sortiraient de même parallèles à leurs premières directions. C'était la conséquence à laquelle conduisait l'expérience de Newton, et que lui-même en avait déduite.

Mais il n'en est pas ainsi, et la loi que suivent les réfractions des rayons diversement colorés varie suivant les différentes natures des milieux, ou, ce qui revient au même, la dispersion n'est pas proportionnelle, dans les différens milieux, à la réfraction moyenne; en sorte qu'il peut très bien arriver, par exemple, qu'un milieu qui aurait une réfraction moyenne, seulement un peu plus forte que celle d'un autre milieu, fasse subir aux rayons de la lumière une dispersion plus considérable.

1473. Cela posé, concevons d'abord deux prismes égaux et semblables de la même matière, appliqués l'un contre l'autre, de manière que leurs angles réfringens se trouvent tournés en sens contraire. Soient *acb*, *cby* (*fig. 151*) les coupes des deux prismes dans un sens perpendiculaire aux axes; *c* et *b* seront les angles réfringens. Or, dans ce cas, il est évident qu'un faisceau de lumière *de* qui rencontre la surface *ca* sous une obliquité quelconque, après s'être dilaté en traversant les deux prismes,

sortira de manière que les différens rayons émergens ks , rq , tu seront parallèles au rayon incident de , puisque by est elle-même parallèle à ca .

Imaginons maintenant que le prisme cby , étant d'une nature différente de celle du prisme acb , ait une réfraction moyenne seulement un peu plus forte, et qu'en même temps la dispersion qu'il fait subir aux rayons soit beaucoup plus considérable à proportion: l'axe rq du faisceau émergent ne sera plus dirigé par la réfraction moyenne parallèlement à de ; et par conséquent l'image du point d sera un peu déplacée. De plus, les rayons extrêmes ks , tu divergeront d'une quantité beaucoup plus grande que celle qui mesure le déplacement de l'image du point d . Si l'on fait varier alors l'angle cby jusqu'au point où cette image serait remise à sa place, et où par conséquent l'effet de la réfraction moyenne serait détruit, il est clair que la dispersion sera encore très sensible. Enfin, si l'on continue de faire varier le même angle jusqu'à ce que l'effet de la dispersion soit nul à son tour, la réfraction moyenne reparaitra, et l'image du point d sera déplacée de nouveau; c'est-à-dire que, d'une part, la lumière sera recomposée, et que, d'une autre part, les rayons émergens s'écarteront du parallélisme avec les incidens.

1474. Supposons que al (fig. 152) représente un filet de lumière parti d'un point visible, situé à une très grande distance sur l'axe AR de la lentille mn ; en sorte qu'il puisse être censé parallèle à cet axe (1). Imaginons de plus, que ce filet ne soit composé que de deux rayons, l'un rouge et l'autre violet; ils se réfracteront tous les deux dans la lentille, en se rapprochant de la perpendiculaire pls au point d'immersion. Mais la direction lk du rayon violet, dont la réfrangibilité est plus considérable, fera un plus petit angle avec la perpendiculaire que la direction lg du rayon rouge, d'où il suit que le premier sera plus incliné vers l'axe que le second.

(1) Il faut concevoir en même temps ce filet comme très voisin de l'axe, dont on ne l'a séparé ici d'un intervalle sensible, que pour la netteté de la figure.

Maintenant, si les deux perpendiculaires qi , be , relatives à l'incidence des rayons sur la surface mhn , étaient parallèles, l'angle d'incidence lkb du rayon violet étant plus grand que l'angle d'incidence lkq du rayon rouge, cette seule circonstance, à réfrangibilité égale, déterminerait le rayon violet à repasser dans l'air sous une direction qui divergerait par rapport à celle du rayon rouge, et ainsi le premier irait rencontrer l'axe à une distance de la lentille plus petite que celle du second. Or, quoique la direction de la perpendiculaire be , qui se rejette un peu par son extrémité supérieure vers la perpendiculaire qi , tende à diminuer l'angle d'incidence lkb , et, par une suite nécessaire, l'angle de réfraction ekf , comme le rayon violet est plus réfrangible que le rayon rouge, et que d'ailleurs il part d'un point k plus voisin de l'axe que le point g qui appartient au rayon rouge, il en résulte toujours que son point d'intersection f avec l'axe est plus voisin de la lentille que le point f' où se fait la rencontre du rayon rouge avec le même axe (1).

Si l'on suppose d'autres rayons de chaque espèce, qui, en allant du point radieux vers la lentille, passent de même très près de

(1) La formule qui donne la distance z entre le foyer et la lentille est, en général, $z = \frac{ma}{2(1-m)}$, comme nous l'avons vu (1040), m étant le sinus de

réfraction lorsque le sinus d'incidence est l'unité. Concevons que cette formule se rapporte à la réfraction du rayon rouge, et que celle qui est relative

à la réfraction du rayon violet soit $z' = \frac{m'a}{2(1-m')}$. Dans cette hypothèse, m

et m' étant les sinus de réfraction au passage de l'air dans le verre, il est évident que m' sera plus petite que m , puisqu'alors le rayon violet, à incidence égale, se rapproche plus de la perpendiculaire au point d'immersion, que le rayon rouge. Or le numérateur $m'a$ sera plus petit que le numérateur ma ; d'une autre part, le dénominateur $2(1-m')$ sera plus grand que le dénominateur $2(1-m)$, puisqu'ici la quantité m ou m' est soustraite.

Il suit de là que la fraction $\frac{m'a}{2(1-m')}$ sera plus petite que la fraction

$\frac{ma}{2(1-m)}$, c'est à dire, que le foyer z' des rayons violets sera plus rapproché de la lentille que le foyer z des rayons rouges.

l'axe, tous les rayons violets émergens formeront un foyer en f , et les rayons rouges en formeront un autre en f' . Tel sera l'effet de la dispersion à l'égard de la lentille mn .

1475. Mais concevons derrière cette lentille un second verre $mnxz$ (fig. 153), qui soit biconcave, et qui ait une réfraction moyenne seulement un peu plus sensible que celle de la lentille, et une dispersion beaucoup plus considérable à proportion. Le rayon rouge lg se réfractera de nouveau dans le verre biconcave, suivant une direction telle que gt , et comme la grande dispersion de ce verre rend la réfraction du rayon violet beaucoup plus forte, par rapport à celle du rayon rouge, qu'elle ne l'était dans la lentille; le rayon violet, en entrant dans le verre biconcave, se rapprochera tellement de la perpendiculaire bpe , que sa nouvelle direction pd ira croiser en un point u la direction gt du rayon rouge. Il en résulte que l'angle d'incidence pdr du rayon violet, à la rencontre de la surface zx , sera plus petit que l'angle d'incidence gto du rayon rouge. Mais le rayon violet, par une suite de la supériorité de sa réfraction, repassera dans l'air sous une direction df tellement située, que l'angle qu'elle formera avec la perpendiculaire rh regagnera sur l'angle de la direction tf du rayon rouge avec la perpendiculaire oy , ce qui sera nécessaire pour que les deux directions aillent concourir en un point commun f . Tous les rayons de chacune des deux espèces qui partiront du même point visible sous des directions très voisines de l'axe, se croiseront aussi au foyer f , où ils produiront une image unique du point dont il s'agit, et de là ils continueront leur route, en se dirigeant vers l'oculaire.

1476. Ainsi, il y a cette différence entre l'effet des deux verres dont il s'agit ici, pour corriger l'aberration de réfrangibilité, et celui de deux prismes appliqués l'un à l'autre par une de leurs faces (1473), que les figures curvilignes des verres déterminent les rayons émergens à se confondre en un même point, au lieu que ces rayons, en sortant des prismes, sont parallèles entre eux comme ils l'étaient avant d'y entrer, et cela par une suite des surfaces planes que leur présentent les deux milieux qu'ils ont à traverser.

Si le pouvoir dispersif du verre biconcave variait dans le même rapport que sa réfraction moyenne, le rayon rouge et le rayon violet, ne pouvant se croiser dans ce même verre, ne concourraient jamais en un foyer commun après leur émergence. Dans le cas où tous les rayons de chaque espèce qui seraient partis d'un même point de l'objet, prendraient, en repassant dans l'air, des directions inclinées à celles des rayons incidens pour se rejeter vers l'axe, ils formeraient deux foyers distincts, comme lorsqu'ils traversent un seul verre *mn* (*fig.* 189); c'est-à-dire, que la réfraction moyenne nécessaire à la production des images subsistant encore, la dispersion ne serait pas détruite : et, si telle était la courbure des verres, que l'effet de la dispersion eût disparu, cela ne pourrait avoir lieu sans que les rayons émergens de l'une et l'autre espèce ne fussent parallèles aux rayons incidens; et parce que ceux-ci composent un seul cône par leur assemblage, ce cône serait censé se prolonger au-delà du verre biconcave, abstraction faite de la petite déviation produite par l'épaisseur des verres. Alors il n'y aurait plus de foyers, ni par conséquent d'images, et l'on ne gagnerait rien à placer un pareil assortiment de verres entre l'œil et l'objet.

1477. On voit, par ce qui précède, qu'à la rigueur le foyer *f* (*fig.* 190) n'est que le point de réunion des rayons extrêmes, savoir, les rouges et les violets, auxquels il faut ajouter les rayons moyens, qui sont les verts, et qui forment comme l'axe du cône dont le sommet est à l'endroit du même foyer. Mais les petites aberrations qui existent encore dans les rayons intermédiaires sont en quelque sorte couvertes par la parfaite coïncidence des extrêmes.

1478. Les deux substances dont on compose l'objectif des lunettes achromatiques sont, l'une le *flint-glass*, qui est une espèce de verre dans lequel il entre environ un tiers de *minium*, ou d'oxide rouge de plomb, et l'autre le *crown-glass*, qui est de la nature du verre ordinaire employé par les vitriers. On a trouvé que la dispersion produite par le flint-glass était très grande à l'égard de celle qui provenait du crown-glass, à peu près dans le rapport de 3 à 2, tandis que sa réfraction moyenne surpassait

peu celle du même verre (1). Dans un grand nombre de lunettes achromatiques, l'objectif est formé simplement de deux verres, l'un biconcave, ou convexe d'un côté et concave de l'autre, qui est de flint-glass; l'autre biconvexe, qui est de crown-glass, et dont une des convexités s'emboîte dans la concavité du premier. D'autres lunettes ont leur objectif composé d'un verre biconcave de flint-glass placé entre deux verres biconvexes de crown-glass. Ces lunettes sont plus parfaites que les précédentes.

1479. La construction que nous venons de décrire ne corrige l'aberration de réfrangibilité que par rapport à l'objectif; elle laisse subsister celle qui provient de l'oculaire; mais comme le court trajet que les rayons qui sortent de ce verre ont à faire pour arriver à l'œil ne leur permet que de subir une assez légère séparation, on regarde l'aberration qui en résulte comme susceptible d'être négligée: l'objectif fait l'essentiel; le reste est de nature à pouvoir être toléré par l'œil.

Microscope à deux Verres.

1480. Nous venons de parler des instrumens qui font franchir à l'œil des distances immenses; nous devons faire connaître aussi ceux qui donnent pour lui de la grandeur aux atomes. Le microscope à deux verres a beaucoup d'analogie avec le télescope astronomique (1454). L'objectif gh (*fig.* 191) est très petit et très convexe; on place l'objet ab un peu plus loin que le foyer de ce verre, d'où il suit que les rayons de chacun des faisceaux, qui vont de a en a' et de b en b' , lesquels rayons sortiraient parallèles si l'objet était exactement au foyer, ne s'inclinent que peu l'un vers l'autre; en sorte qu'ils forment une image renversée $a'b'$ de l'objet, à une grande distance de l'objectif, et qui par conséquent a déjà beaucoup plus d'étendue que cet objet. L'oculaire kn est

(1) Suivant les expériences de Clairaut, le rapport de réfraction pour le rayon moyen est, dans le flint-glass, celui de 1,6 à 1, et dans le verre commun, celui de 1,55 à 1. Smith, *Traité d'Optique*, p. 447.

situé de manière que son foyer concourt à peu près avec le milieu x de l'image $a' b'$, et ainsi les rayons lo , sy d'une part, et ty , ro de l'autre, étant très peu divergens, et, de plus, les deux points auxquels appartiennent ces rayons acquérant au contraire une convergence considérable, l'œil placé en o verra l'objet en $a'' b''$ très amplifié, pour deux raisons différentes.

Car l'image $a' b'$, si l'œil pouvait en recevoir immédiatement l'impression, paraîtrait déjà sensiblement plus grande que l'objet ab . Or, cette image, à son tour, devient l'objet que l'œil aperçoit à travers l'oculaire, et ce verre faisant ici l'office d'une forte lentille, l'angle roL sous lequel l'œil verra distinctement ce même objet en $a'' b''$, sera beaucoup plus grand que celui sous lequel il le verrait avec la même netteté sans aucun intermédiaire. Donc le grossissement de l'image étant une combinaison de deux effets, dont chacun tend par lui-même à augmenter très sensiblement ses dimensions, croîtra dans un très grand rapport. On fait aussi des microscopes à trois verres, auxquels il est facile d'appliquer l'explication précédente.

1481. Ces admirables instrumens ont, pour ainsi dire, doublé l'univers à notre égard; ils nous ont fait voir, dans des gouttes presque imperceptibles de différens liquides, des animaux jusqu'alors inconnus; il nous ont dévoilé plusieurs mystères de l'organisation des plantes. Des corpuscules, en apparence informes, prennent des figures régulières; les poussières qui composent la graine de la mauve deviennent des globules hérissés de pointes; celles qui sont portées des étamines sur les pistils des diverses plantes, paraissent de même sous des formes symétriques et constantes dans chaque espèce, les plus petites parties des insectes offrent des assemblages de pièces assorties entre elles avec un art dont le nôtre n'est qu'une imitation grossière; et ce que l'œil revoit est aussi nouveau pour lui que ce qu'il n'a pas encore vu.

Description de quelques Instrumens particuliers de Dioptrique.

Les instrumens que nous nous proposons de décrire dans cet article ont pour but de représenter des images qui sont vues immédiatement sur des surfaces planes disposées pour les recevoir.

Chambre obscure.

1482. Si l'on pratique au volet d'une chambre exactement fermée, une ouverture d'environ 27 millimètres (un pouce) de diamètre, la lumière qui s'introduit par ce trou va dessiner sur la muraille opposée les images des objets extérieurs, dont les traits sont seulement comme ébauchés, et ressemblent à des ombres légères. Cette observation a fait naître l'idée de l'instrument d'optique appelé *chambre obscure* ou *chambre noire*. Au lieu de laisser libre l'ouverture par laquelle entre la lumière, on y applique un verre lenticulaire, qui détermine les différens pinceaux envoyés par les objets extérieurs à former autant de foyers derrière le verre, et l'on dispose, à la distance de ces foyers, un carton blanc sur lequel les images se peignent avec netteté et revêtues de toutes leurs couleurs.

1483. La marche des rayons qui produisent ces images est la même que celle qu'on voit *fig. 177*, où *AB* représente l'objet, *mn* la lentille, et *ab* l'image qui se peint sur le carton. Celle-ci est renversée, parce que les pinceaux de lumière se croisent en traversant la lentille. On peut redresser cette image en la regardant par réflexion dans un miroir situé horizontalement ou à peu près. Si la chambre obscure est à la portée d'un endroit fréquenté, on aura un tableau mouvant, où tous les objets seront rendus au naturel, ou plutôt on aura une succession de tableaux agréablement diversifiés.

1484. Il est facile de concevoir que plus les objets sont éloignés, et plus leurs images sont petites, puisque l'angle que font entre eux les rayons *Ac*, *Bd*, qui partent des extrémités de chacun de

ces objets diminue sans cesse à mesure que la distance augmente ; d'où résulte une diminution proportionnelle dans l'angle que font les rayons fb , ha , entre lesquels l'image est comprise. En même temps le foyer r formé derrière le verre par les rayons qu'envoie le point R que nous prenons pour exemple, se rapproche de la lentille, et alors l'image de ce point devient la base d'un cône qui résulte du prolongement des mêmes rayons au-delà du foyer. On détruit l'effet de ce cône en éloignant un peu la lentille du fond de la chambre obscure, pour augmenter la divergence des rayons Re , Rl qui tombent sur le petit espace el (1042), et les déterminer à se réunir derrière la lentille à une plus grande distance de ce verre. Dans le cas contraire où les objets sont trop rapprochés, eu égard à la position actuelle de la lentille, le fond de la chambre obscure coupe le cône en deçà de son sommet, et l'image du point R prend encore une figure circulaire, que l'on ramène à n'être plus qu'un point, en rapprochant la lentille du tableau.

1485. On fait des chambres obscures portatives, qui sont des espèces de boîtes carrées dont une des faces latérales porte un tuyau garni de sa lentille. Les images qui se forment à l'intérieur sont reçues par un miroir plan incliné, qui les réfléchit vers le haut de la boîte, où elles deviennent visibles sur un verre dont la surface extérieure est dépolie, et qui sert de couvercle à la boîte. Ces images sont droites pour un spectateur qui a le visage tourné vers les objets. On a varié de différentes manières la construction de cet instrument : on l'exécute aussi en forme de petite cabane pyramidale, dont la partie supérieure porte le tuyau avec sa lentille, qui, dans ce cas, a une position horizontale. Le miroir est disposé en dessus, et toujours dans une position inclinée, qui, pour être la plus avantageuse qu'il est possible, doit former, avec l'horizon, un angle de 45^{d} . C'est le miroir qui reçoit les rayons partis immédiatement des objets, et les renvoie vers la lentille, au lieu que, dans la construction précédente, les rayons vont de la lentille au miroir. Les images se peignent sur un papier blanc placé horizontalement au fond de la chambre obscure; on les voit par une large ouverture faite à l'une des

faces latérales, et que l'on garnit ordinairement de deux petits rideaux, pour que l'observateur, ayant la tête couverte, puisse l'avancer un peu dans la chambre obscure sans y laisser passer de lumière.

Si l'on pratique dans la même partie une seconde ouverture, de manière à y introduire le bras droit, on pourra se servir de la chambre obscure pour dessiner un paysage ou un édifice, en conduisant le crayon sur les traits de l'image que l'on aura devant les yeux.

Lanterne magique.

1486. La lanterne magique inventée par Kircher, et dont le nom est devenu en quelque sorte trivial par l'usage qu'on fait de cet instrument pour offrir à la curiosité du peuple une apparence de prestige, mérite de fixer l'attention même de ceux pour qui elle n'a rien de magique. Elle consiste dans une caisse de bois ou de fer-blanc, vers le fond de laquelle est une lampe ou une grosse chandelle allumée. Les rayons que lance la flamme sont reçus par une lentille qui les rassemble et les fait tomber plus denses sur un verre plan et mince où l'on a peint diverses figures. Ainsi l'effet de cette première lentille se borne à bien éclairer les figures qui doivent être dans une situation renversée. Quelquefois on substitue à la lentille un miroir concave situé derrière la lumière; et, dans certaines constructions, on combine ensemble les effets de la lentille et du miroir. En avant du verre plan est une seconde lentille, à travers laquelle les pinceaux envoyés par les différens points d'une même figure se croisent, en même temps que la réfraction détermine les rayons dont chaque pinceau est l'assemblage à sortir parallèles. Ces rayons passent ensuite par une ouverture circulaire faite à un carton situé convenablement, et tombent sur une troisième lentille que l'on peut éloigner ou rapprocher à volonté de la seconde, au moyen d'un tuyau mobile, à l'extrémité duquel cette lentille est fixée.

Les rayons qui ont traversé cette même lentille produisent sur une muraille ou une toile blanche située à l'opposé une

copie en grand des figures tracées sur le verre plan; et il est facile de voir que cette copie représente les objets droits, en conséquence de ce que les pinceaux lumineux se croisent dans la seconde lentille. Deux circonstances contribuent à rendre plus vives les couleurs des images qui s'offrent aux yeux des spectateurs; savoir, la force de la lumière à laquelle est exposé le verre plan, et le cercle lumineux que les rayons émergens vont former sur la muraille.

Fantasmagorie.

1487. Les Physiiciens, en modifiant la construction et le jeu de la lanterne magique, l'ont transformée en un instrument capable de produire un effet beaucoup plus imposant, auquel ils ont donné le nom de *fantasmagorie*. Ici le mécanisme de l'opération est nul pour les spectateurs, qui n'ont devant les yeux qu'une mousseline gommée, tendue verticalement, qui est comme la toile d'un tableau où les images sont vues par transparence. L'appartement est privé de toute autre lumière que celle qui vient d'un appareil caché derrière cette toile. Au moment où commence l'opération, on voit paraître un spectre d'abord extrêmement petit, qui ensuite s'accroît rapidement, et semble s'avancer à grands pas vers les spectateurs; et lorsque la scène se passe dans un souterrain tapissé en noir, et qu'un morne silence, interrompu par les sons lugubres d'un harmonica, a servi de prélude, il est difficile de se défendre d'une certaine impression de frayeur à la vue d'un objet propre par lui-même à faire illusion, et qui trouve dans l'imagination une place toute préparée pour des fantômes.

1488. Voici maintenant ce qui se passe derrière la mousseline. Soit AB (*fig.* 192), une figure de spectre peinte sur une lame de verre, et placée dans une situation renversée. Cette figure est éclairée, comme dans la lanterne magique, par la lumière d'une lampe, dont les rayons ont passé à travers une lentille que nous supprimons ici (1). De nouveaux rayons, partis des différens

(1) On a soin d'appliquer un vernis sur les parties de la lame de verre qui servent de fond à la figure pour intercepter la lumière qui les traverserait.

points de l'image, traversent successivement deux autres lentilles mn , $m'n'$, et le tout est disposé de manière que la lentille mn ayant une position fixe, on peut en approcher et en écarter à volonté la lentille $m'n'$, en faisant glisser un tuyau qui porte celle-ci dans celui qu'occupe la première. De plus, l'appareil entier est mobile, en sorte qu'on est libre de faire varier sa distance par rapport à la toile. La lame de verre étant située en deçà du foyer des rayons parallèles, à une petite distance de la lentille mn , les deux extrémités A , B de l'objet peint sur cette lame (1) envoient deux cônes de rayons iAk , dBh , qui, après s'être réfractés dans la lentille mn , en sortent sous des directions lu , sc , et fq , ge , moins divergentes; et de plus, ces cônes convergent plus fortement l'un vers l'autre, que quand ils allaient de l'objet à la lentille. Ils sont reçus par l'autre lentille $m'n'$, dans laquelle ils se croisent, et leurs rayons ta , oa , et pb , xb , en sortent convergens, de manière qu'ils vont peindre sur la toile zy les images des points qui les ont lancés, d'où l'on voit que l'image totale doit avoir une position droite, à cause du croisement des cônes dans la seconde lentille.

1489. Il résulte d'abord de ce qui vient d'être dit, que les portions de cônes $lucs$, $fqeg$, font entre elles un plus grand angle que dans le cas où la lentille mn étant supprimée, les rayons envoyés par les points A , B , iraient immédiatement vers la lentille $m'n'$, et cette circonstance tend à augmenter, toutes choses égales d'ailleurs, les dimensions de l'image ab . D'une autre part, les rayons lu , sc , et fq , ge étant moins divergens que dans le cas où la lentille mn n'existerait pas, leur concours derrière la lentille $m'n'$ se fait plus loin de ce dernier verre, ce qui est encore une circonstance favorable à l'agrandissement de l'image, parce qu'alors il faut mettre une plus grande distance entre l'appareil et la toile. On supplée ainsi à la petitesse de l'objet, en combinant les effets des deux lentilles, dont la première mn fait prendre aux rayons qu'elle envoie vers l'autre les mêmes directions que s'ils étaient partis d'un objet beaucoup plus grand.

Ce que nous disons ici de ces deux points, s'applique à tous les autres.

1490. Concevons que les choses étant dans l'état que représente la figure, l'image ab soit nette, et que l'on veuille tout-à-coup la rendre très petite. Pour y parvenir, on placera l'appareil très près de la toile zy . Mais alors les cônes oat , pbx étant coupés par la toile en dessous de leur sommet, l'image sera confuse. Or, supposons que l'on écarte la lentille $m'n'$ de la première; l'effet sera le même que si le point d'où les rayons lu , sc , ou fq , ge sont censés partir s'éloignait (1044). Mais nous avons vu qu'alors les foyers a , b , se rapprochent de la lentille $m'n'$ (1042). Donc il sera possible de restituer à l'image diminuée de grandeur toute sa netteté.

Concevons au contraire que l'on veuille rendre l'image beaucoup plus grande que ne le représente la figure. On écartera d'abord l'appareil de la toile. Mais alors les cônes oat , pbx , auront leurs sommets en deçà de cette toile, et l'image sera encore confuse. Or, supposons que l'on fasse mouvoir la lentille $m'n'$ vers la première. L'effet sera le même que si le point d'où les rayons lu , sc , ou fq , ge sont censés partir se rapprochait, auquel cas les foyers a , b doivent s'écarter de la lentille $m'n'$, et ainsi l'image reprendra sa netteté.

1491. Que fait donc l'opérateur? Il dispose d'abord l'appareil à une petite distance de la toile, et alors l'intervalle entre les deux lentilles requis pour la netteté de l'image est à son *maximum*. Il éloigne ensuite progressivement l'appareil, et en même temps il rapproche la lentille $m'n'$ de la première, et cela dans la proportion nécessaire pour que l'image qui s'accroît continuellement soit toujours distincte.

Or les spectateurs, que l'obscurité empêche de s'apercevoir que le lieu de l'image ne change point à leur égard, se laissent séduire par l'illusion qui les porte à croire qu'elle s'approche d'eux, en même temps que ses dimensions augmentent; et cette illusion a d'autant plus d'empire sur eux que le spectre, en partant d'une petitesse qui le fait paraître d'abord comme un point, parvient rapidement à une étendue considérable, et que leur imagination trompée prend cet accroissement pour l'effet d'un mouvement progressif, à l'aide duquel un objet qu'ils auraient

vu il n'y a qu'un instant dans le lointain, serait venu se placer près d'eux.

Microscope Solaire.

1492. Le microscope solaire ne diffère proprement de la lanterne magique, qu'en ce qu'il est éclairé par un rayon solaire que l'on introduit dans un endroit obscur, au moyen d'un miroir plan qui le réfléchit horizontalement. Ce rayon passe à travers une lentille adaptée au trou de la fenêtre. On présente à la vive lumière qui sort de cette lentille un petit verre blanc nommé *porte-objet*, et sur lequel on a fixé de petits insectes, des poussières de papillon ou autre corpuscules transparens.

Une seconde lentille, destinée à produire l'image, est couverte; du côté du porte-objet, d'une petite lame de plomb percée d'un trou d'épingle; c'est par ce trou que passent en se croisant les jets de lumière qui viennent des différens points de l'objet, et voici l'avantage qui résulte de cette construction.

1593. Les jets lumineux dont il s'agit approchent beaucoup d'être des rayons simples ou des cylindres infiniment déliés de lumière, ce qui les rend propres à laisser des empreintes nettes et distinctes sur un plan placé à une distance quelconque; et quoique la petitesse de l'ouverture ne laisse passer que peu de lumière, comme cette lumière est par elle-même fort éclatante, les images qu'elle produit ne laissent pas d'avoir beaucoup de vivacité.

On peut donc écarter à la distance de trois ou quatre mètres le plan qui reçoit ces images, ce qui en amplifie prodigieusement les dimensions, et change le plus petit insecte en un colosse effrayant. Cependant, à une distance moyenne, les images ont quelque chose de plus net et de mieux prononcé.

1494. Nous venons de parcourir une des branches de la Physique les plus fécondes, et peut-être la plus difficile de toutes à manier. Le fluide et l'organe contribuent également à la compliquer. Le premier, infiniment varié dans sa composition, se modifie encore de mille manières par la diversité de ses mouvemens. Nulle part les phénomènes ne présentent des successions de nuances

plus légères, et n'exigent plus de sagacité pour être bien saisis. C'est un fil qui demande à être tenu d'une main assez sûre pour ne pas le laisser échapper, et assez délicate pour ne pas le rompre.

L'organe, de son côté, semble se transformer à chaque instant par la variété des impressions qu'il éprouve. Il a fallu des idées très fines pour démêler les résultats de tout ce qui se passe en lui, soit qu'il reste abandonné à ses facultés naturelles, soit qu'il les étende à l'aide de ces productions de l'art, qui sont pour lui autant de nouveaux moyens de voir. A en juger par le calcul rien n'est si simple et si précis que les effets de la vision. Mais combien les lois dont ces effets dépendent se modifient dans leurs applications, et qu'il y a loin de ce que représente la marche des rayons tracée par la Géométrie, à la sensation que fait naître l'image dessinée au fond de l'œil par les rayons eux-mêmes !

La théorie de la lumière n'est point épuisée. Plusieurs questions relatives à la vision n'ont pas été complètement résolues. Il existe certains phénomènes, comme ceux qui ont rapport à la diffraction, à la polarisation, etc., dans lesquels l'action du fluide lumineux n'a pas été suffisamment expliquée jusqu'à présent ; on n'a pas non plus déterminé jusqu'où s'étend l'analogie entre le même fluide et le calorique ; le problème de la double réfraction, sur lequel nous n'avons encore que des expressions géométriques, attend sa parfaite solution d'une main assez habile pour déterminer la loi physique dont il dépend.

Enfin, si l'on considère cette foule de résultats auxquels l'étude de la lumière a conduit les géomètres, les physiciens et les chimistes ; si l'on réunit au souvenir de ce qui a été fait, l'expectative de ce qui reste à faire, on conviendra qu'aucun sujet ne se prête à des observations plus étendues et à la fois plus intéressantes, que le fluide dont l'action s'exerce sur l'organe qui nous sert d'instrument pour observer la nature entière.

FIN.

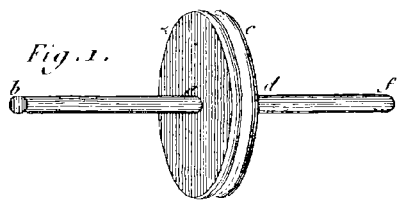


Fig. 1.

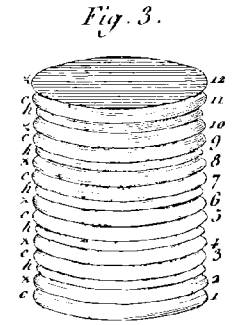


Fig. 3.

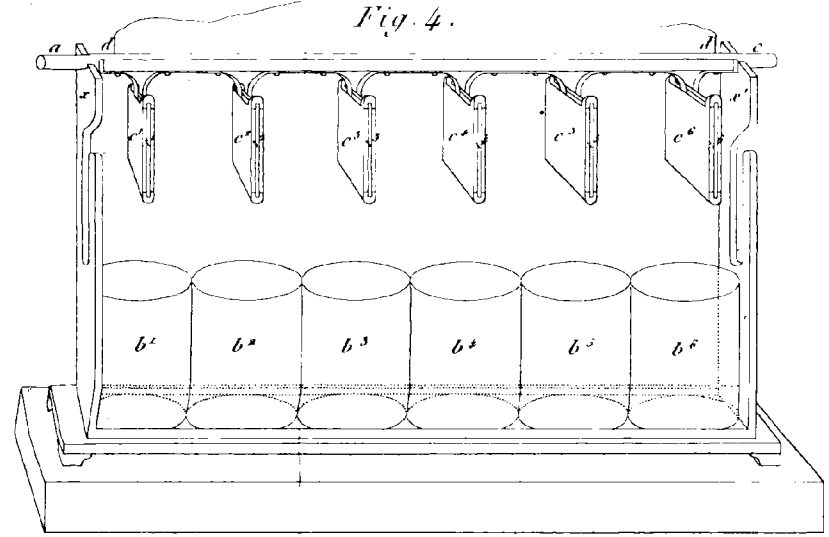


Fig. 4.

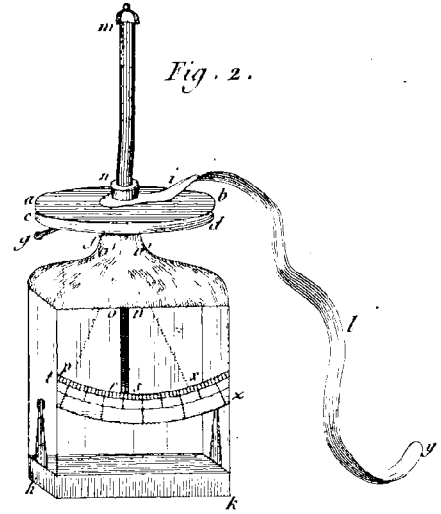


Fig. 2.

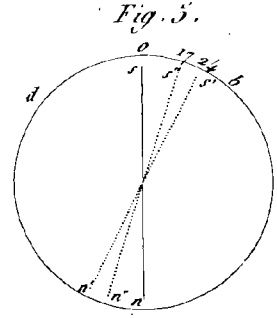


Fig. 5.

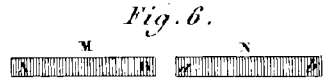


Fig. 6.

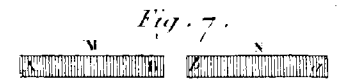


Fig. 7.



Fig. 9.

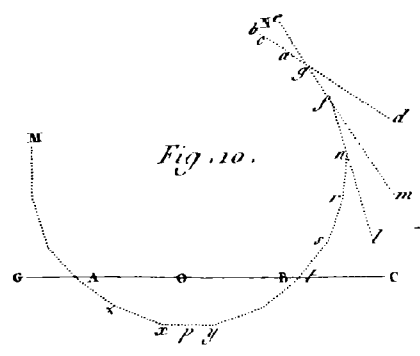


Fig. 10.

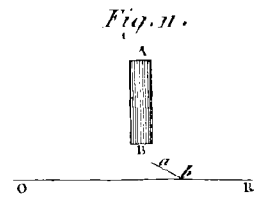


Fig. 11.

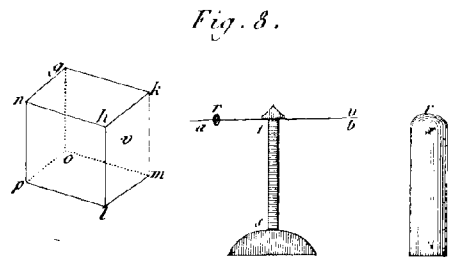


Fig. 8.

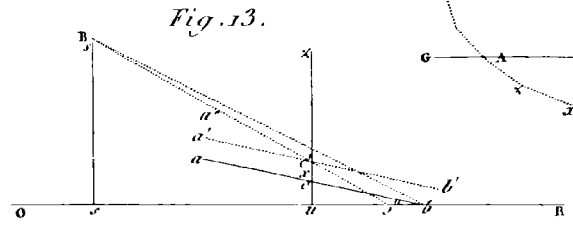


Fig. 13.

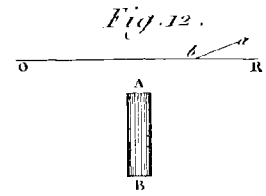
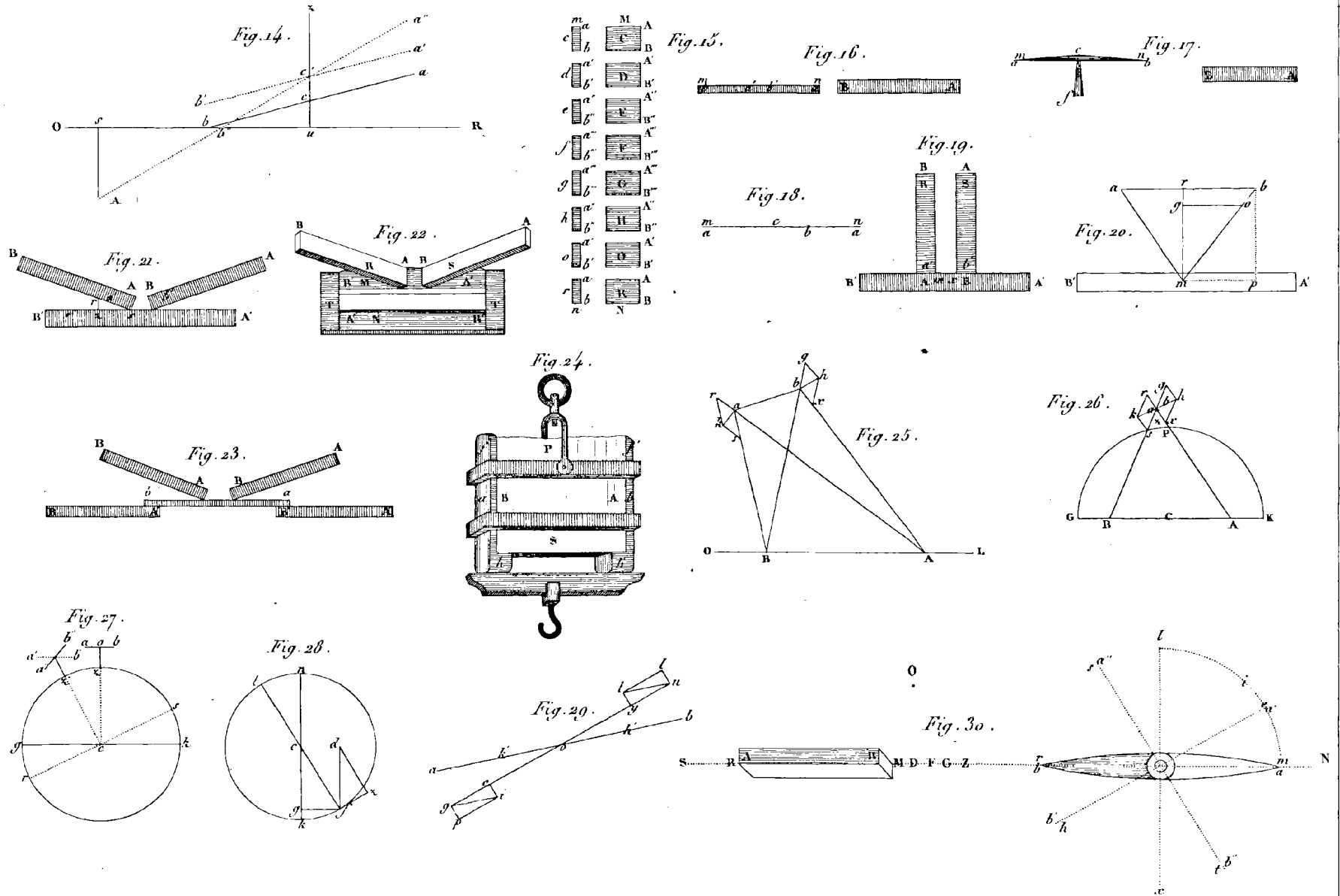


Fig. 12.



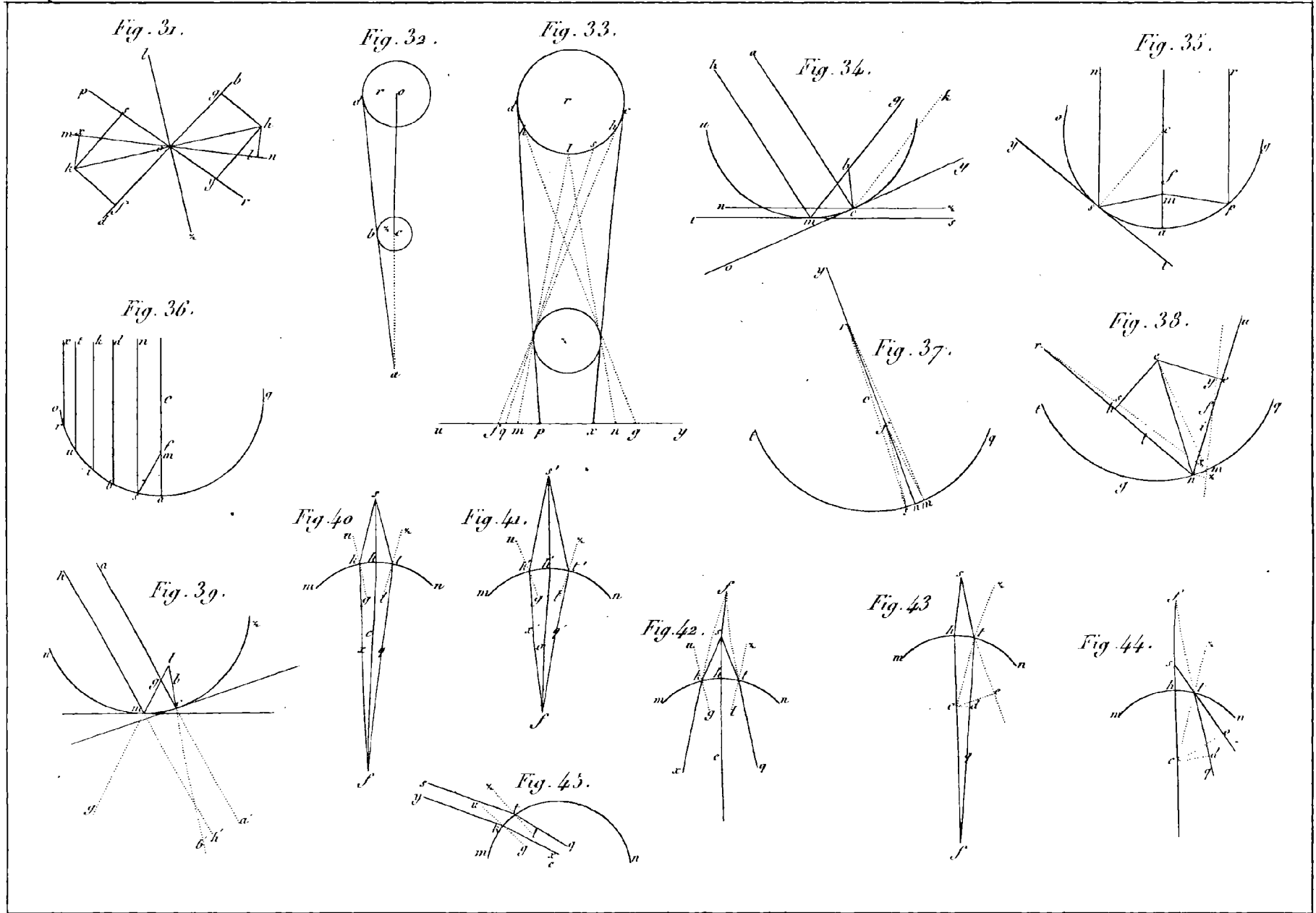


Fig. 62.

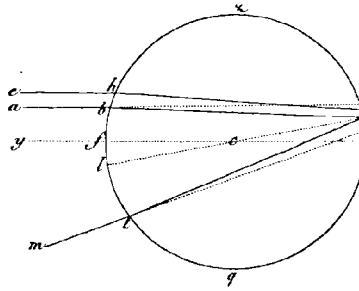


Fig. 63.

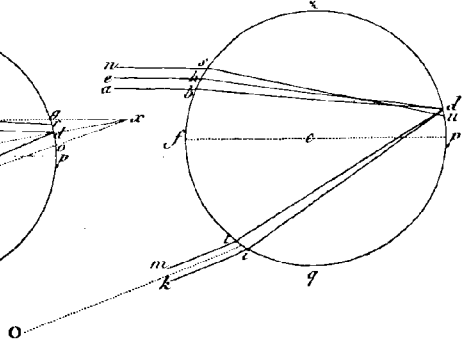


Fig. 64.

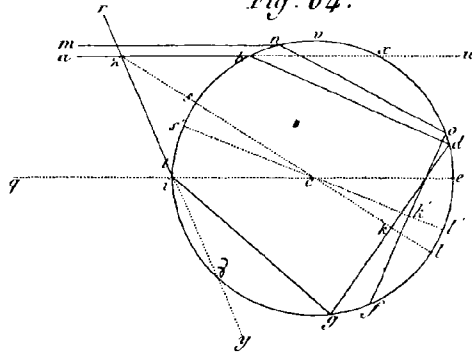


Fig. 65.

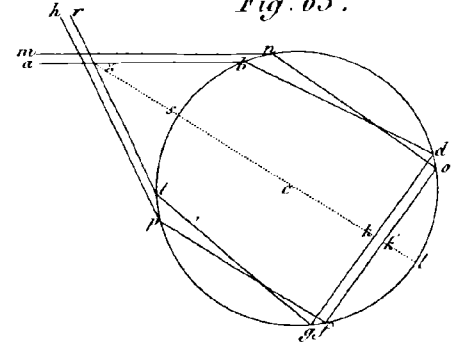


Fig. 71.

Violet	.....	6300
Indigo	.....	6812
Bleu	.....	7114
Vert	.....	7632
Jaune	.....	8255
Orange	.....	8833
Rouge	.....	10000

Fig. 66.

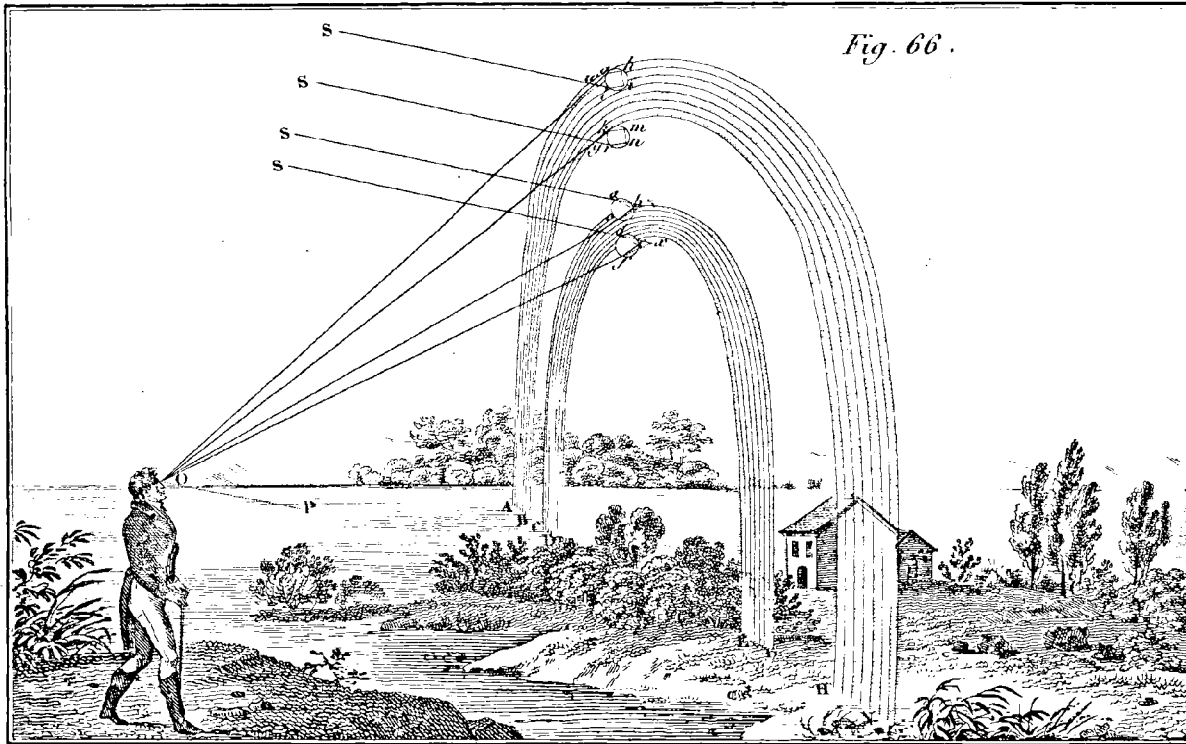
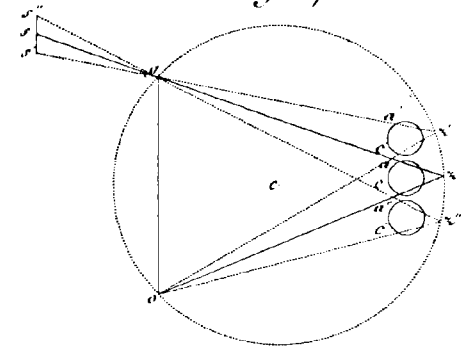
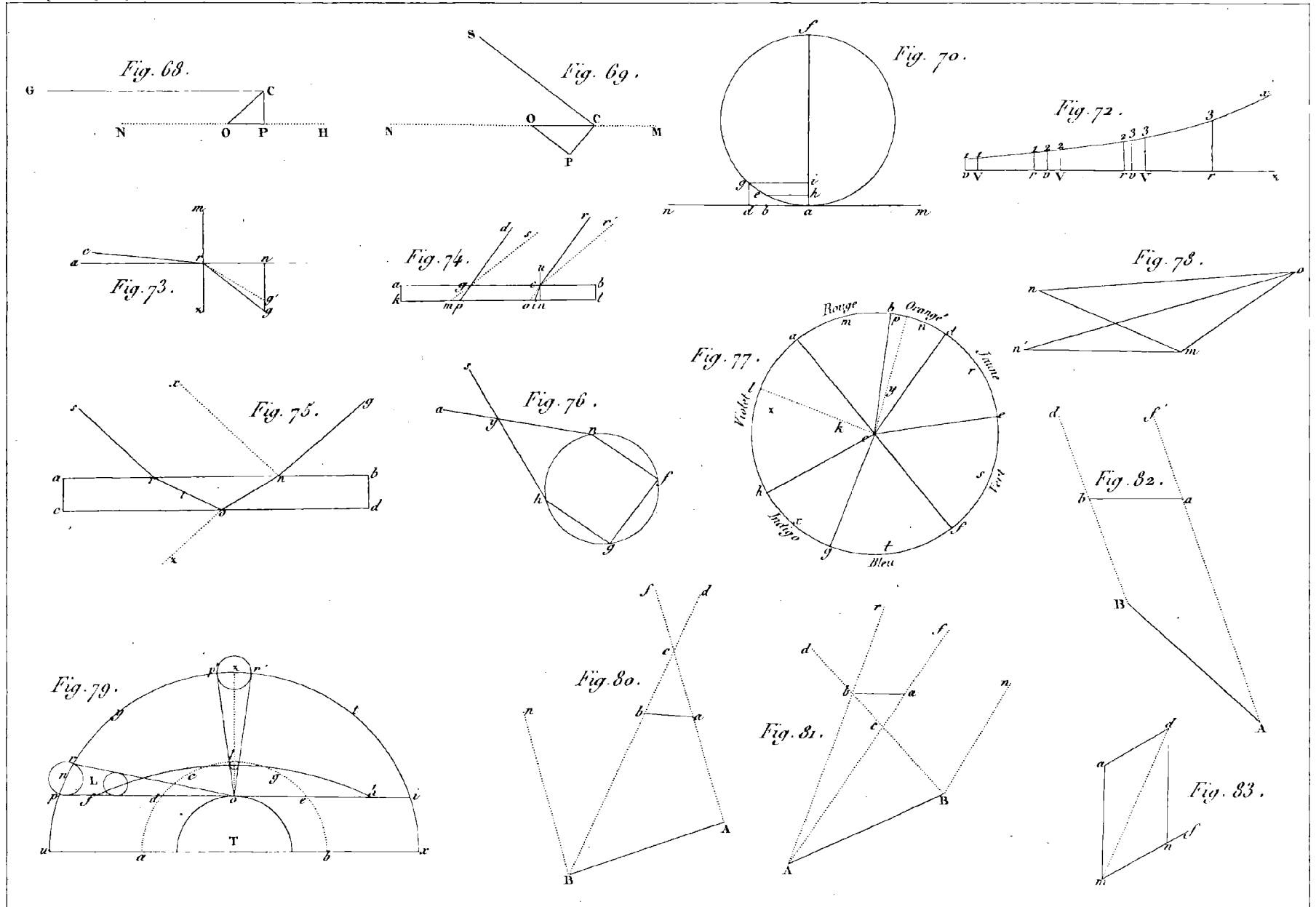


Fig. 67.





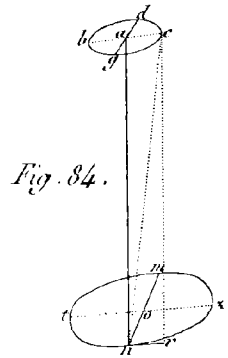


Fig. 84.

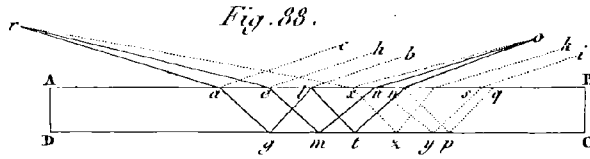


Fig. 88.

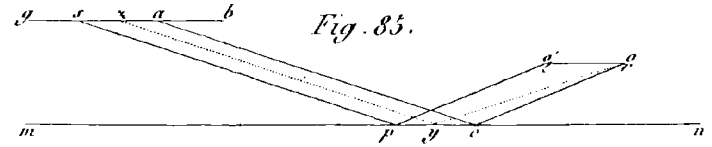


Fig. 85.

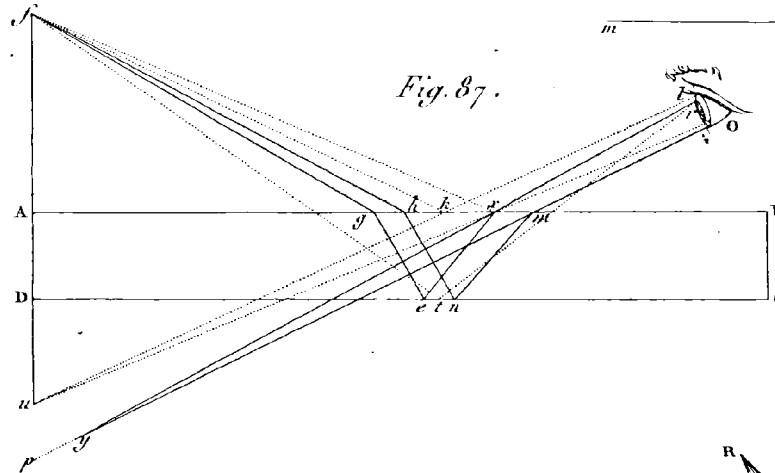


Fig. 87.

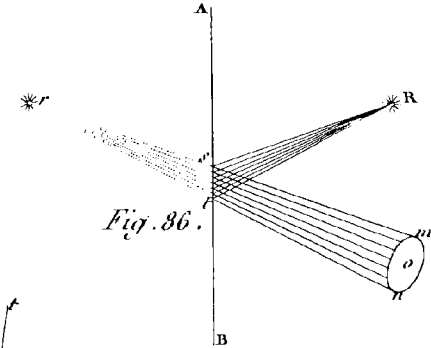


Fig. 86.

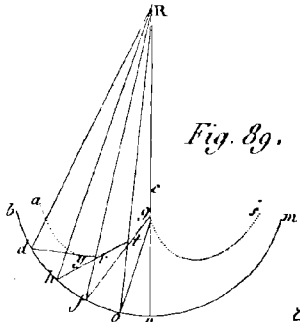


Fig. 89.

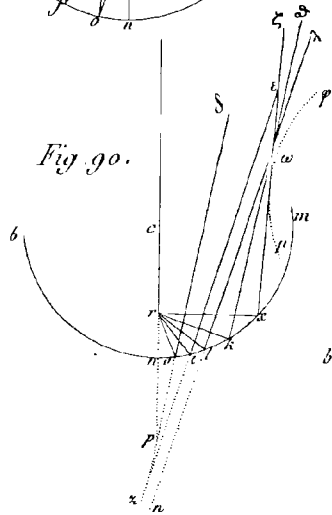


Fig. 90.

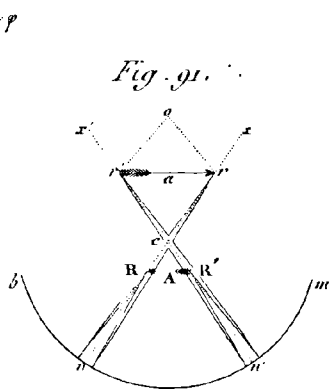


Fig. 91.

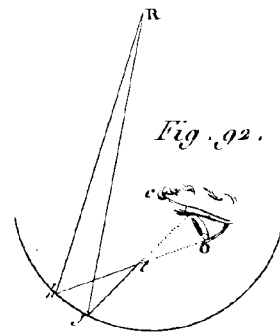


Fig. 92.

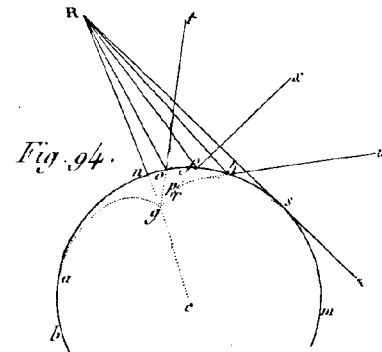


Fig. 94.

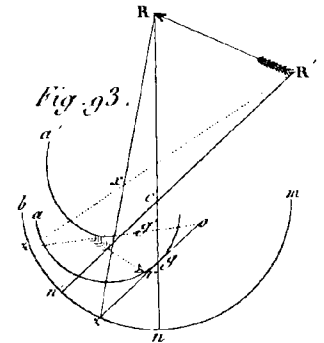
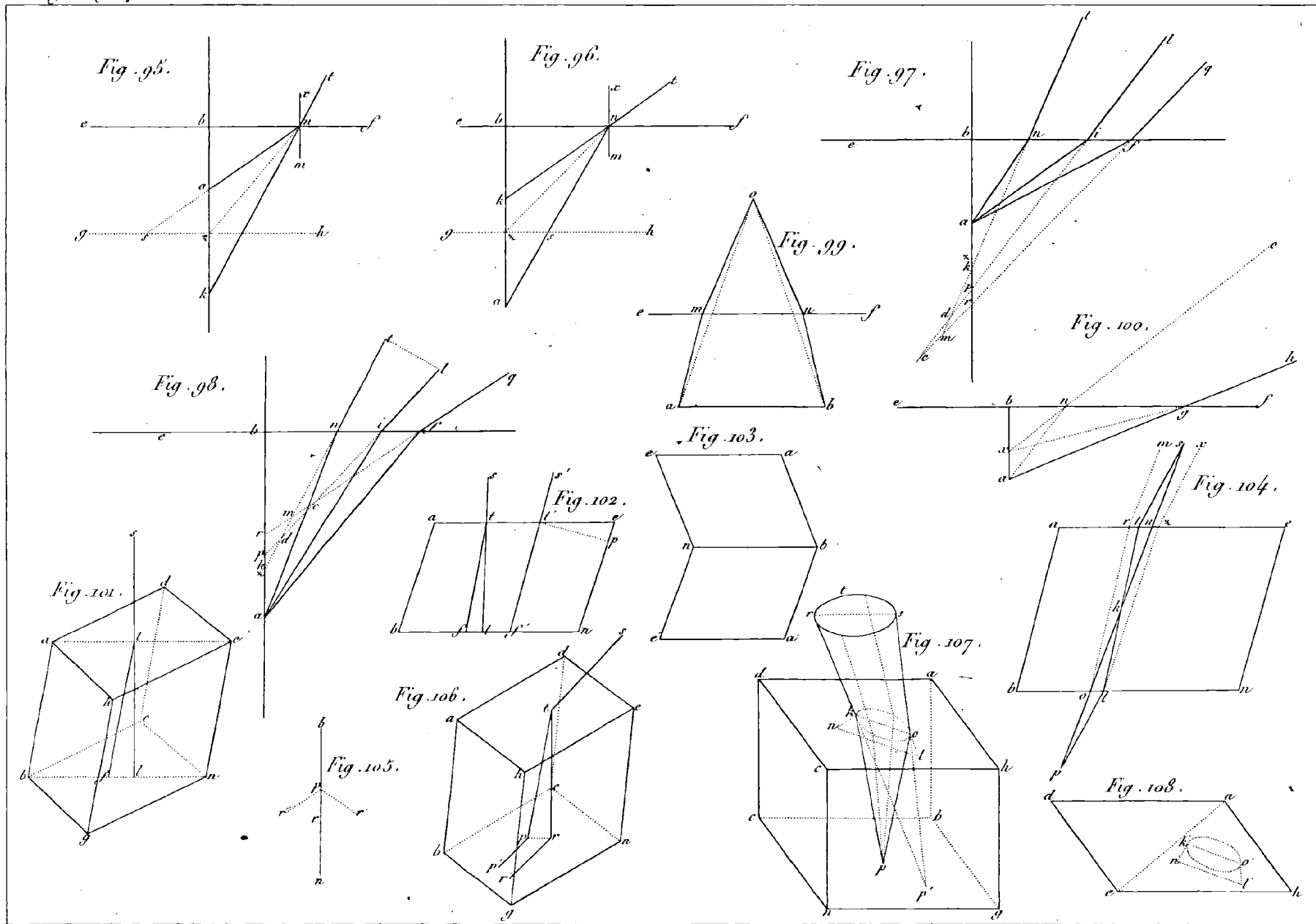


Fig. 93.



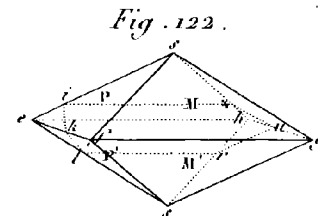
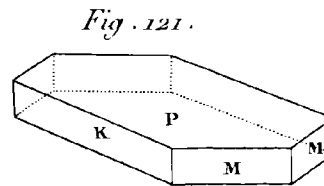
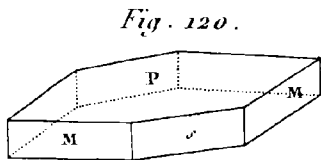
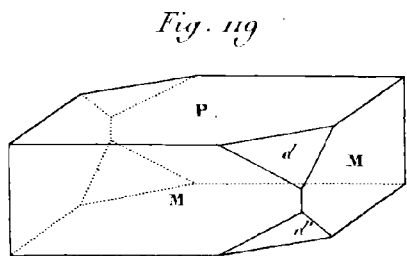
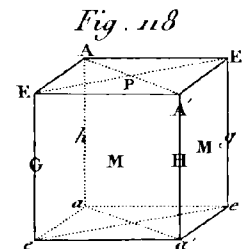
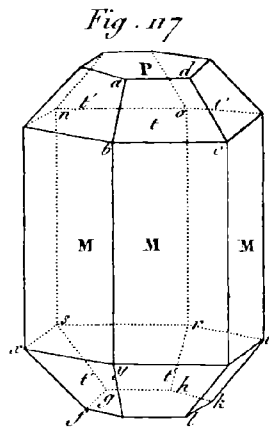
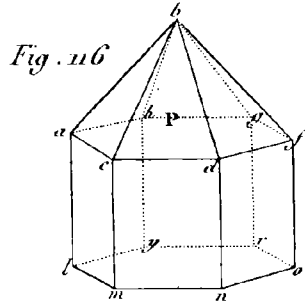
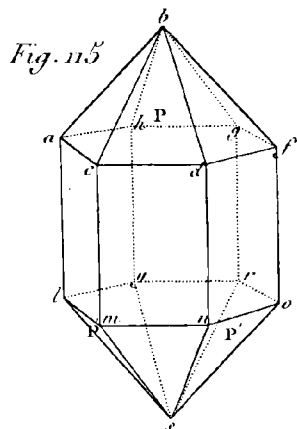
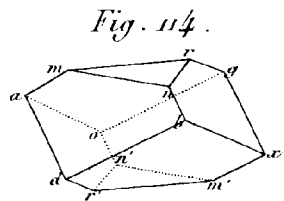
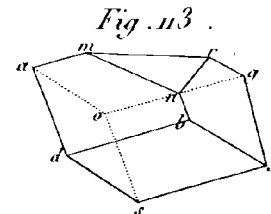
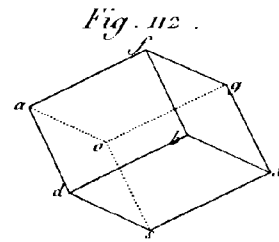
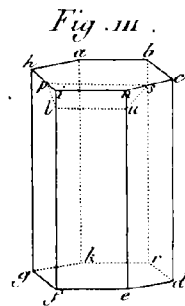
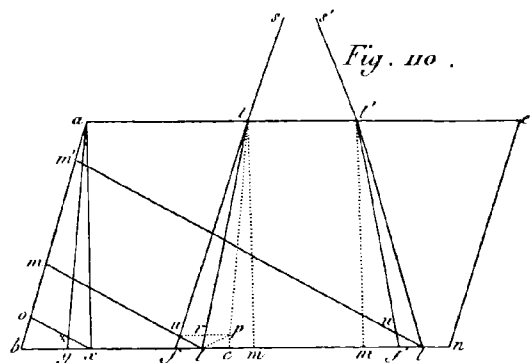
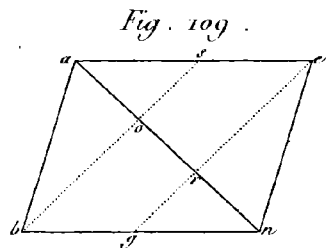


Fig. 123.

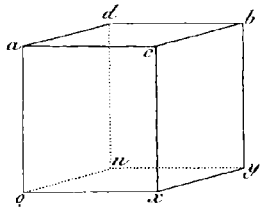


Fig. 124.

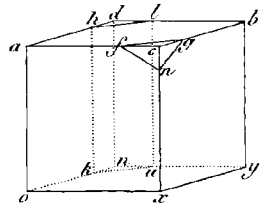


Fig. 125.

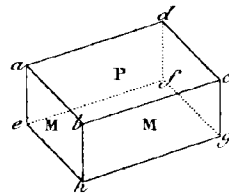


Fig. 126.

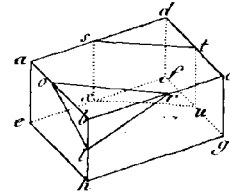


Fig. 127.

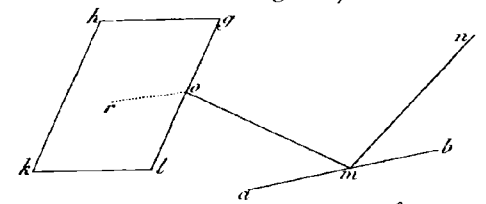


Fig. 128.

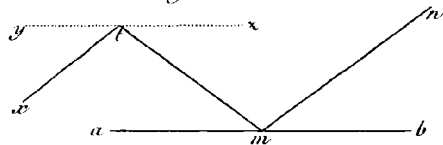


Fig. 129.

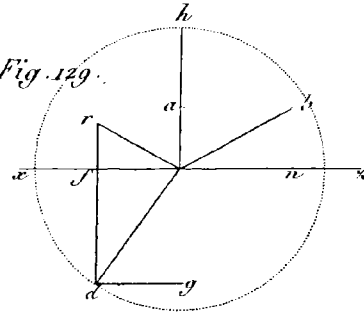


Fig. 130. (bis)

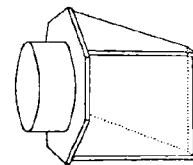


Fig. 130.

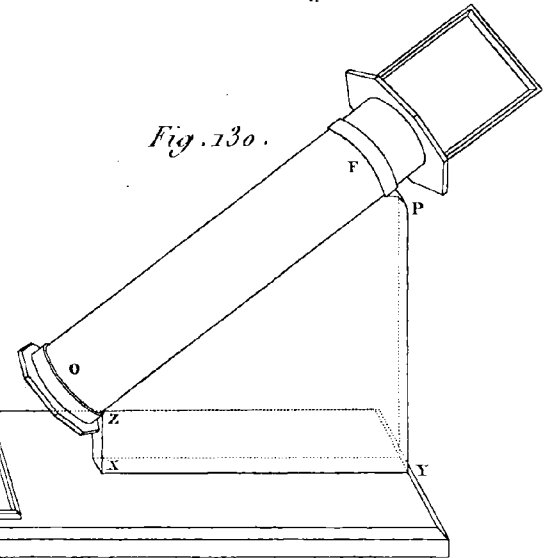


Fig. 131.

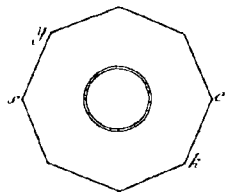


Fig. 132.

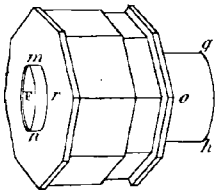


Fig. 133.

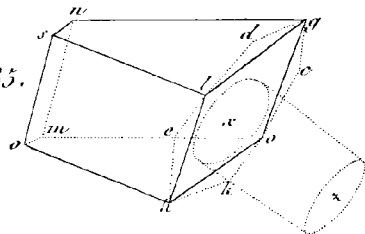


Fig. 133.

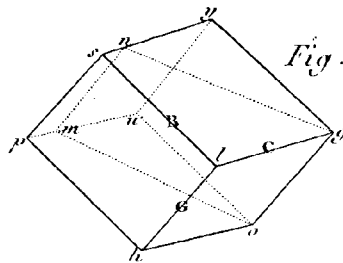
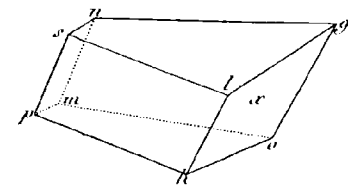
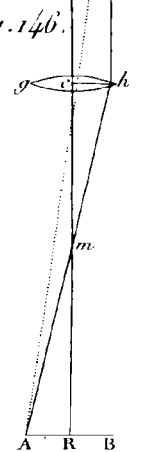
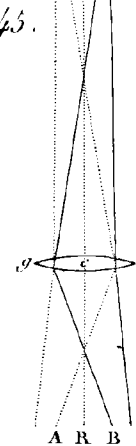
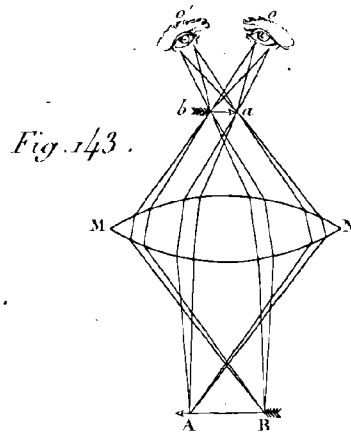
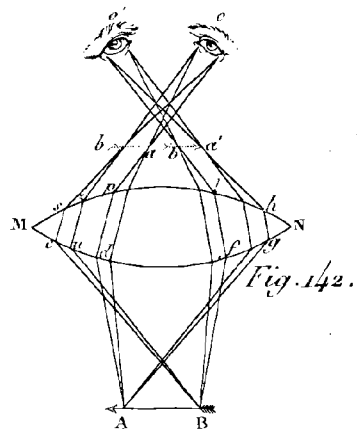
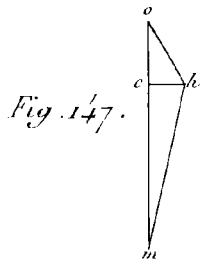
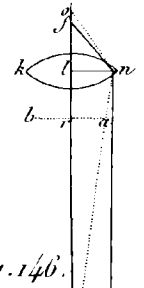
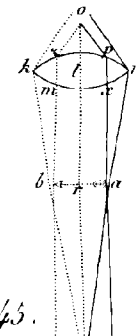
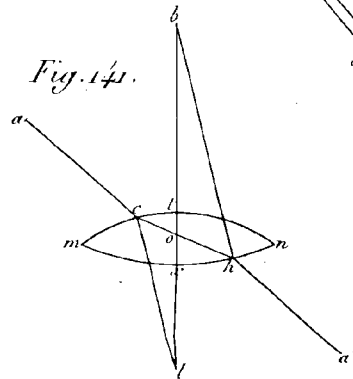
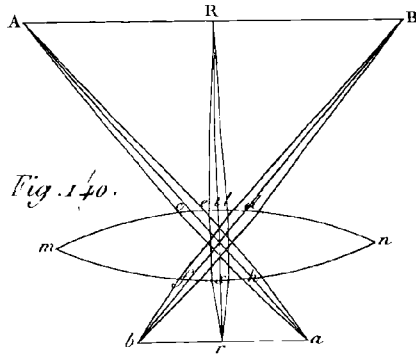
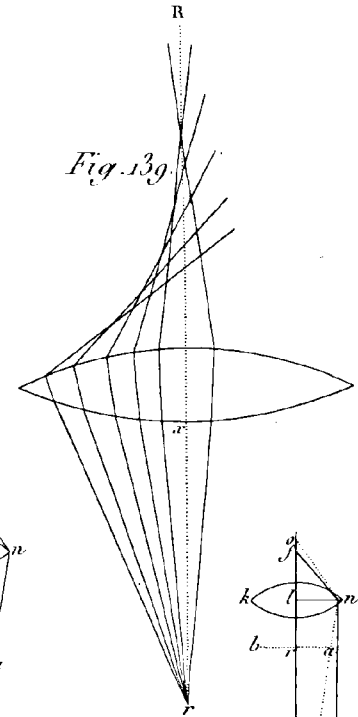
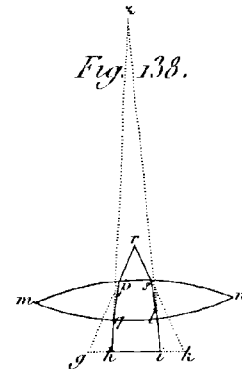
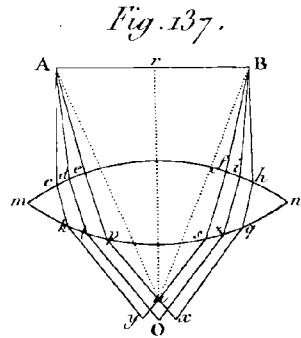
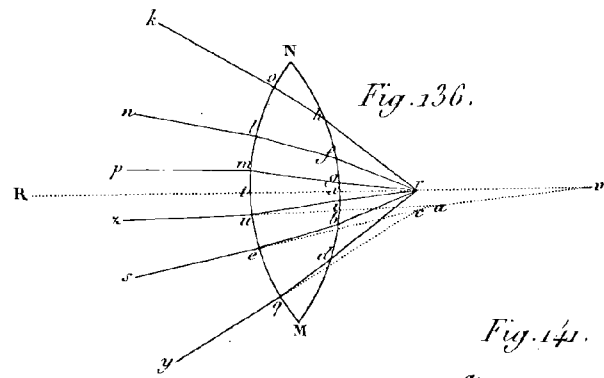


Fig. 134.





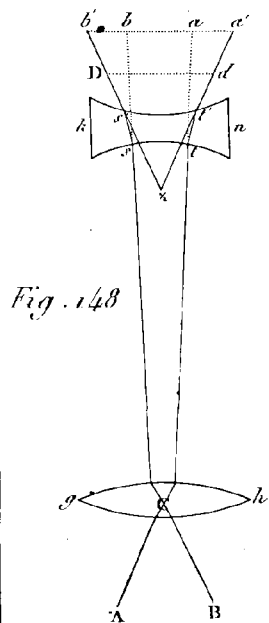


Fig. 148

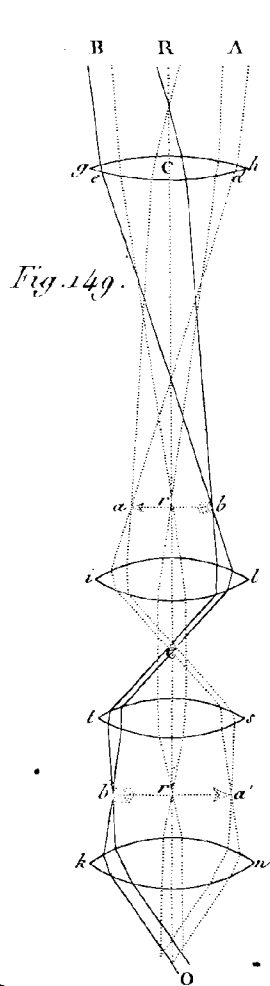


Fig. 149.

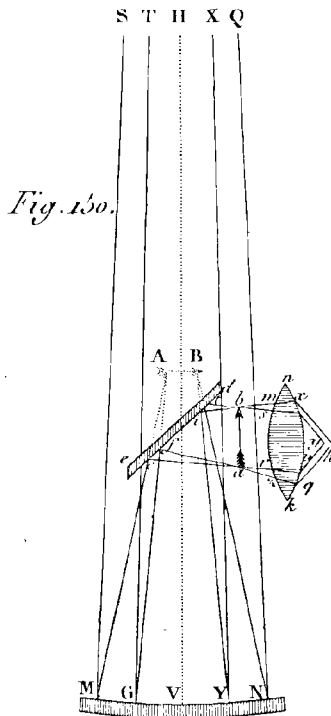


Fig. 150.

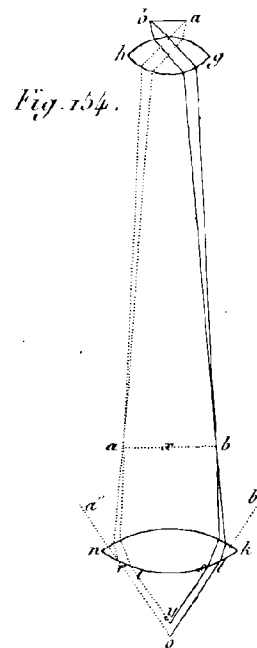


Fig. 154.

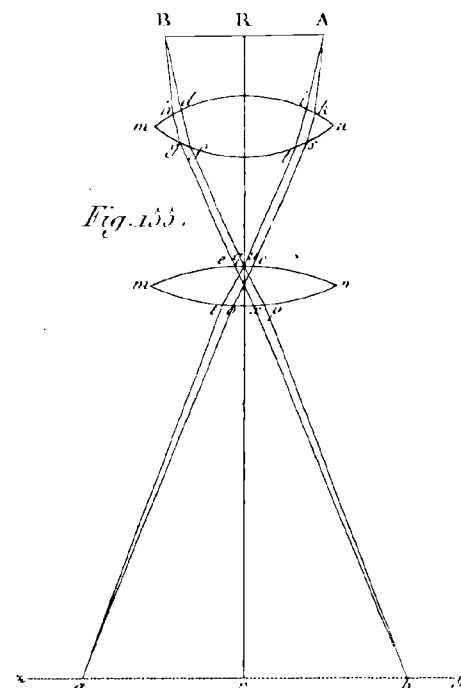


Fig. 155.

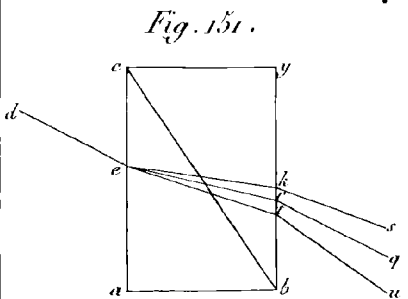


Fig. 151.

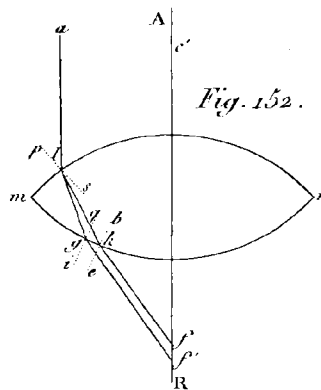


Fig. 152.

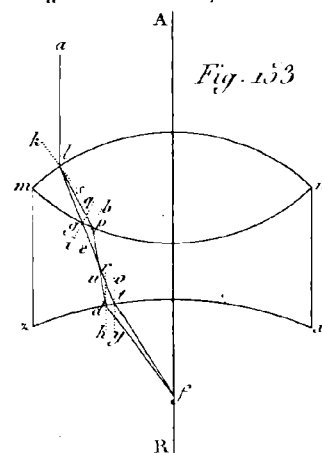


Fig. 153