

INTRODUCTION

AUX

PRINCIPES MATHÉMATIQUES

DES

LOIS GÉNÉRALES DU MONDE PHYSIQUE

PAR

A. PICART,

Ancien élève de l'Ecole normale supérieure,
Agrégé des sciences,
Docteur ès sciences mathématiques.



PARIS

GAUTHIER-VILLARS, ÉDITEUR,

QUAI DES GRANDS-AUGUSTINS, 55.

—
1882

PRÉFACE.

Cette introduction à une œuvre, encore inédite de l'auteur, intitulée : « Principes mathématiques des Lois générales du monde physique, » n'est autre, au fond, qu'un essai de synthèse cosmogonique.

Il lui a été inspiré par ces lignes qu'a écrites Lamé à la fin de ses leçons sur la théorie de l'élasticité :

« Ainsi la matière pondérable n'est pas seule dans l'univers ; ses particules nagent en quelque sorte au milieu d'un fluide. Si ce fluide n'est pas la cause unique de tous les faits observables, il doit au moins les modifier, les propager, compliquer leurs lois. Il n'est donc plus possible d'arriver à une explication rationnelle et complète des phénomènes de la nature physique, sans faire intervenir cet agent, dont la présence est inévitable. On n'en saurait douter, cette intervention, sagement conduite, trouvera le secret, ou la véritable cause des effets qu'on attribue au calorique, à l'électricité, au magnétisme, à l'attraction universelle, à la cohésion, aux affinités chimiques ; car tous ces êtres mystérieux et incompréhensibles ne sont, au fond, que des hypothèses de coordination, utiles sans doute à notre ignorance actuelle, mais que les progrès de la véritable science finiront par détrôner. »

C'est ce desideratum du grand géomètre-physicien que l'auteur a tenté de réaliser dans les pages qui suivent.

A. PICART.



INTRODUCTION

AUX

PRINCIPES MATHÉMATIQUES

DES

LOIS GÉNÉRALES DU MONDE PHYSIQUE.



CHAPITRE I^{er}.

Matière en mouvement engendrant les corps.

§ I^{er}. — HYPOTHÈSE FONDAMENTALE.

1. Avant d'établir les Principes mathématiques des Lois générales du monde physique, nous commencerons par essayer de montrer que tous les phénomènes de la nature peuvent être expliqués par une cause unique, *la matière en mouvement*.

La matière, telle que nous la concevons, consiste dans une substance fluide, répandue, de toute éternité, dans l'espace infini, formée d'atomes infiniment petits, indivisibles, inertes, impénétrables, élastiques, de même

volume et de figures diverses, qui sont animés de mouvements gyrotoires de toute vitesse, dans tous les sens, et de mouvements de translation dans toutes les directions, de même vitesse, pour la même figure, et de vitesse différente, pour une figure différente.

C'est cette substance primordiale, appelée *éther*, qui, par l'essence intime et le mouvement de ses atomes, a engendré, de toute éternité, dans l'espace infini, les corps de la nature, avec toutes leurs propriétés, rangées sous les rubriques de *gravitation*, ou attraction universelle, de *lumière*, de *chaleur potentielle et rayonnante*, de *électricité statique et dynamique*, de *magnétisme direct et inverse*, de *actions moléculaires et atomiques*, toutes leurs transformations, etc.

§ II. — FORMATION DES CORPS.

2. Les atomes de cette substance, dans leurs mouvements en toute direction, se choquent entre eux.

Après le choc, certains de ces atomes continuent leur mouvement de translation, tandis que d'autres, au contraire, s'étant rencontrés simultanément avec des atomes de même figure et de mêmes mouvements de translation et de gyration, s'enchevêtrent avec eux en plus ou moins grand nombre, et s'unissant inséparablement, forment un *groupe* d'un certain volume, d'une certaine figure et d'un certain mouvement de gyration et de translation, qui constitue une *molécule simple*.

Les *groupes* atomiques ainsi formés, qui sont animés eux-mêmes d'un double mouvement de translation et de gyration, s'ils rencontrent des *molécules* simples qui leur soient identiques, à la fois, pour leur volume, leur figure, leurs mouvements, et pour le nombre, la figure, les mouvements de leurs atomes constitutifs, en s'enchevêtrant avec elles, forment un *assemblage* qui constitue un *corps simple*.

S'ils rencontrent d'autres molécules de constitution intérieure différente, mais ayant avec eux des affinités de figure et de mouvements, qui entraînent leur enchevêtrement réciproque, en se groupant avec elles, ils forment des *molécules composées*.

Celles-ci, à leur tour, rencontrant des molécules identiques avec lesquelles elles s'enchevêtrent, forment un *assemblage* qui constitue un *corps composé*.

Et les *molécules composées* de diverse nature, en se groupant avec des molécules composées d'une autre nature, donnent lieu à des *molécules plus complexes*, dont la réunion constitue d'autres *corps composés*, eux-mêmes plus complexes.

Ces corps simples et composés sont à des *états* différents, solide, liquide, gazeux, suivant le lien plus ou moins étroit établi entre leurs molécules, dans l'opération du groupement, par leurs mouvements propres, sous le choc des atomes étherés ambiants.

Les atomes de figure sphérique qui, en raison de leur forme particulière, ont peu de tendance à s'enchevêtrer entre eux pour former des molécules, constituent le *milieu étheré universel*, qui remplit l'espace compris

entre les corps et leurs interstices moléculaires, dans lesquels il se condense pour former des atmosphères autour des molécules.

3. Les molécules des corps peuvent présenter toutes les formes et toutes les dimensions. Lorsqu'elles sont de forme polyédrique, c'est-à-dire à faces planes, et d'une orientation parallèle, elles sont dites *crystallines* et les corps qu'elles constituent sont dits *crystallisés*.

Lorsque, étant polyédriques, elles ont une orientation quelconque, les corps qu'elles constituent sont dits *crystalloïdes*. Ces deux cas sont le propre de la matière inorganique et d'une partie de la matière organique. Il y a une autre partie de cette dernière matière, formée de molécules, sans facettes planes, arrondies sur toute leur surface, qui constitue les corps dits *colloïdes*, jouissant de propriétés spéciales, qui les distinguent essentiellement des crystalloïdes, et qui les rendent aptes au développement de la vie organique inférieure.

Les cristaux qu'offre la nature se rattachent aux formes les plus simples et qui se rapprochent le plus des polyèdres réguliers : à celles du cube ou de l'octaèdre, du prisme droit à base carrée ou hexagonale régulière, du prisme droit à base rectangulaire, ou généralement des prismes droits, à un axe géométrique, coïncidant sur eux-mêmes par une rotation $\frac{2\pi}{n}$ autour de cet axe (n étant un nombre entier pair), avec toutes les modifications qu'y apportent des troncatures sur les sommets, des pointements sur les faces, et des clivages le long des arêtes latérales du type fondamental.

Les formes cristallines peuvent être *homoédriques* ou *hémiédriques*. L'hémiédrie peut être de droite ou de gauche. Dans un même corps cristallisé hémiédriquement deux molécules hémiédriques peuvent l'être de sens contraire. Suivant le sens dans lequel toutes les molécules d'un corps cristallisé ont la même hémiédrie, ou la proportion dans laquelle certaines sont hémiédriques de droite et les autres de gauche, le corps, tout en présentant la même constitution atomique et moléculaire, comme les molécules hémiédriques de sens contraire ne sont pas égales ou *superposables*, mais *symétriques* et *non superposables*, à l'instar de nos deux mains, ou d'un objet et de son image dans un miroir plan, jouit de propriétés physiques et chimiques différentes. Les corps de cette nature sont dits *isomères*, et cette particularité dans la forme cristalline des corps constitue ce qu'on appelle l'*isomérisation*.

4. D'après le mode de formation des corps que nous venons d'admettre, les molécules des corps simples ne peuvent pas renfermer moins de quatre atomes constitutifs identiques, et les molécules des corps composés moins de quatre molécules simples identiques et différentes ; car, pour qu'il puisse y avoir enchevêtrement et ensuite groupement stable, par rencontre simultanée, des atomes ou des molécules en mouvement, il faut qu'il y en ait plus de trois qui se rencontrent au même instant autour d'un point de l'espace.

5. Comme les molécules simples sont formées d'atomes de même volume, les poids des molécules des différents corps simples sont proportionnels aux nombres

différents d'atomes qu'elles renferment. Ces nombres entiers, qui ont entre eux des rapports simples, peuvent être appelés les *vrais équivalents chimiques* des corps simples. Ils sont proportionnels à ceux qu'on admet habituellement, en prenant l'équivalent de l'hydrogène, qui est le plus petit, pour *unité*. Comme une molécule ne peut renfermer moins de quatre atomes, il faudrait, pour avoir l'*équivalent chimique vrai* de chaque corps simple, c'est-à-dire le nombre des atomes que renferment ses molécules, multiplier par n son équivalent chimique habituel, n désignant le nombre des atomes de la molécule d'hydrogène, et étant égal au moins à 4.

6. Dans les corps composés qui sont formés seulement de deux éléments simples, si l'un des éléments est une molécule unique, l'autre doit être constitué au moins par trois molécules, et si le premier élément est formé de deux molécules, le second doit l'être au moins de deux. Il résulte de là que, par exemple, l'eau et l'eau oxygénée, qui sont des composés d'oxygène et d'hydrogène, l'acide chlorhydrique qui est un composé de chlore et d'hydrogène, l'acide sulfhydrique un composé de soufre et d'hydrogène, le protoxyde d'azote et le bioxyde d'azote, des composés d'oxygène et d'azote, ne peuvent être représentés par les notations habituelles : $H O$, $H O^2$, $H Cl$, $H S$, $Az O$, $Az O^2$, où H , O , Cl , S , Az désignent une molécule d'hydrogène, d'oxygène, de chlore, de soufre, d'azote ; car, d'une part, deux et même trois molécules, en se rencontrant, ne peuvent former un groupe stable ; d'autre part, les volumes de deux gaz simples que l'on combine et celui du gaz ou

de la vapeur résultant de la combinaison sont dans de certains rapports simples fournis par l'expérience ; et l'on admet, comme conséquence, que des volumes *égaux* de deux gaz simples renferment le *même* nombre de molécules. De ces conditions, il résulte que les composés, considérés ci-dessus, ne peuvent être représentés que par les notations $2 (H^2 O)$ ou $H^4 O^2$, $2 (H^2 O^2)$ ou $H^4 O^4$, $2 (H^2 Cl^2)$ ou $H^4 Cl^4$, $2 (H^2 S)$ ou $H^4 S^2$, $2 (Az^2 O)$ ou $Az^4 O^2$, $2 (Az^2 O^2)$ ou $Az^4 O^4$, en vertu des formules symboliques :

$$\begin{aligned} n O^4 + 2 n H^4 &= 2 n (2 H^2 O), \\ n Cl^8 + n H^8 &= 2 n (2 H^2 Cl^2), \\ n S^4 + 2 n H^4 &= 2 n (2 H^2 S), \\ n O^4 + 2 n Az^4 &= 2 n (2 Az^2 O), \\ n O^8 + n Az^8 &= 2 n (2 Az^2 O^2), \end{aligned}$$

conformes à la loi expérimentale des volumes.

Comme un volume d'azote et trois volumes d'hydrogène forment deux volumes d'ammoniaque, et que deux volumes d'acide chlorhydrique et deux volumes d'ammoniaque forment quatre volumes de chlorhydrate d'ammoniaque, l'ammoniaque doit être représenté par la notation $2 (Az^2 H^6)$ et le chlorhydrate d'ammoniaque par $2 (H^2 Cl^2, Az^2 H^6)$, en vertu des formules symboliques : $n Az^8 + 3 n H^8 = 2 n (2 Az^2 H^6)$,

$$2 n (2 H^2 Cl^2)^2 + 2 n (2 Az^2 H^6)^2 = 4 n (2 H^2 Cl^2, 2 Az^2 H^6)$$

qui traduisent la loi des volumes.

Nous en concluons que les chiffres des équiva-

lents chimiques, que donne l'Annuaire du Bureau des longitudes, pour l'hydrogène, l'azote, le chlore, le brome, l'iode, et les autres corps simples, gaz ou vapeurs, qu'indique l'expérience relative aux rapports des volumes, devraient être réduits à moitié, les autres ne changeant pas ; ou bien, si l'on veut conserver l'équivalent de l'hydrogène pour unité, les seconds devraient être multipliés par 2, les premiers ne changeant pas.

Et, dans les notations habituelles qui représentent les corps composés, les exposants des symboles H, Az, Cl, I, Br, Hg, Cd, etc. devraient être multipliés par 4, et ceux des autres O, S, Se, Te, B, Az, etc. par 2. Par suite le nombre des atomes des molécules des corps simples représentés par ces derniers s'obtiendrait, non plus en multipliant leurs équivalents habituels par n , comme nous l'avons dit ci-dessus, mais par $2n$.

Cette nouvelle notation aurait l'avantage d'indiquer le nombre des molécules de chacun des différents éléments simples qui constituent les corps composés.

Le nombre des molécules simples constituant un corps composé ne pourrait être ainsi inférieur à six.

7. Tous les corps de la nature sont donc formés d'une même matière, l'*éther*. Ils ne se différencient entre eux, *les corps simples*, que par le nombre, la figure, le mouvement, le mode de groupement des atomes constituant leurs molécules, et par le volume, la figure, le mouvement de ces molécules ; *les corps composés*, que par la nature, le nombre, le mouvement des diverses

molécules simples constituant les molécules composées, et par le volume, la figure, le mouvement de ces dernières molécules.



CHAPITRE II.

Gravitation.

8. Le mouvement effectif des atomes sphériques qui s'entrechoquent dans toutes les directions peut être assimilé idéalement à celui d'un système de particules égales, se mouvant, avec la même vitesse, autour de chaque point, d'un mouvement rectiligne et uniforme, comme si elles étaient *pénétrables*. Sans doute, dans la réalité, chaque particule ne peut se mouvoir indéfiniment sur la même droite, puis qu'elle rencontre, à chaque instant, sur sa route, d'autres particules qui, en la choquant, modifient la direction de son mouvement ; mais sa trajectoire est formée de portions de droite très-petites, se succédant en zigzag, et, comme il y a, en chaque point, des particules se mouvant dans tous les sens, les zigzags décrits par les diverses particules rajustent en quelque sorte leurs parties rectilignes le long d'une même droite dans toutes les directions autour de chaque point ; de telle sorte que, les particules ayant toutes le même volume et la même vitesse, on peut admettre que sur chaque droite, en chacun de ses points, se meut uniformément à chaque instant une de ces particules.

9. Si l'on suppose, dans ce milieu, une molécule infiniment petite, en faisant abstraction de toute autre, cette molécule subit, à chaque instant, par les chocs

des atomes d'éther, tout autour de sa surface, des pressions qui se détruisent relativement à son centre de gravité, et, par suite, ne peuvent lui imprimer qu'un mouvement de rotation autour de ce centre. Mais si, en face de cette molécule, il s'en trouve une autre aussi infiniment petite, à une certaine distance, et regardée comme fixe, celle-ci fait obstacle aux mouvements des atomes éthérés dont la trajectoire rectiligne va de chacun de ses points atomiques à la portion de surface, tournée vers ce point, et intercepte ces mouvements. De là résulte, sur cette portion de surface, une diminution de pression, dans le sens de la droite qui joint le point fixe au centre de gravité de cette molécule, proportionnelle à l'ouverture du cône circonscrit du point à la molécule. Cette molécule, plus pressée d'un côté que de l'autre, tend alors à se rapprocher du point ; et comme l'ouverture du cône infiniment petit varie pour la même base, en raison inverse du carré de sa hauteur, la tendance de la molécule vers le point est inversement proportionnelle au carré de leur distance. Cela a lieu pour chacun des points atomiques de la seconde molécule ; cette tendance est donc proportionnelle à la masse de cette molécule ; et, comme ce qui a été dit d'une des deux molécules peut s'appliquer à l'autre, elle est proportionnelle aux masses de l'une et de l'autre. C'est cette tendance des deux molécules infiniment petites l'une vers l'autre qu'on appelle *gravitation*. Elle est *proportionnelle à leurs masses et en raison inverse du carré de leur distance*.

Pour la démonstration, il a été supposé que les deux molécules se trouvaient seules en présence dans l'éther. Mais si l'on en suppose une infinité en présence, comme la force vive des atomes d'éther qui choquent une face des molécules se transmet, par ces molécules élastiques et mobiles, sur les atomes qui choquent la face opposée, la présence d'une molécule sur la ligne qui en joint deux autres ne trouble en rien l'action mutuelle de gravitation de ces dernières. La gravitation s'exerce donc, entre les *molécules* de tous les corps, proportionnellement à leurs masses et en raison inverse du carré de leur distance.

C'est là une première propriété essentielle des corps. Comme la pesanteur (*pondus*) provient de la *gravitation* des molécules d'un corps vers les molécules de la terre, on applique le nom de *pondérables* à tous les corps soumis à la gravitation.

10. L'éther libre formé d'atomes isolés et non groupés en molécules est *impondérable*. Cela semble d'abord paradoxal, parce que les molécules des corps, d'après notre hypothèse fondamentale, ne sont que des agrégats d'atomes éthérés, mais cela résulte bien de la notion de gravitation, telle que nous l'avons conçue, à savoir : non plus comme une force *effective* s'exerçant d'une molécule à l'autre, mais comme un *effet* instantané des chocs des atomes de l'éther ambiant sur ces molécules, supposées fixes pendant cet instant.

Il faut bien comprendre le sens de ce mot « *impondérable*, » appliqué aux atomes de l'éther libre. Il exprime uniquement, que les atomes, pris isolément, et

non réunis en groupes moléculaires, ne sont pas soumis à la *gravitation*, qui s'exerce entre ces groupes précisément en vertu de l'essence particulière et des mouvements propres des atomes qui les entourent.

Ils ont une *masse* (qui est infiniment petite), puisque nous leur attribuons une force vive (qui est représentée par le $1/2$ produit de la masse et du carré de la vitesse). C'est cette *force vive* qui produit la *pression*, exercée par leurs chocs sur les molécules, à laquelle est due la gravitation.

Mais, malgré cette masse, ils n'opposent point de résistance aux corps pondérables, qui se meuvent au milieu d'eux, en vertu même de la *gravitation* qu'ils produisent. Le fluide éthéré libre se distingue en cela des fluides pondérables, c'est-à-dire soumis à la gravitation. C'est grâce à cette propriété, que les mouvements de gravitation des corps célestes ne sont *nullement* troublés, comme le prouve l'observation astronomique, par ce milieu fluide, de nature particulière, qu'ils traversent.

Ce qui vient d'être dit s'applique exclusivement à l'éther libre compris entre les corps. L'éther condensé qui forme les atmosphères des molécules de la matière pondérable, et qui, par cela même, fait corps avec elles, est soumis à la gravitation au même titre que les molécules pondérables, et l'action de gravitation qui s'exerce sur lui s'ajoute à celle qui s'exerce sur la molécule, de telle sorte que, pour évaluer la gravitation, il faut considérer comme masse attirante la somme des masses de la molécule et de son atmosphère.

11. Cette conception de la *matière étherée*, qui constitue l'univers, doit faire repousser cette idée admise par quelques physiciens spéculatifs : que, par la transformation de l'énergie, « l'entropie de l'univers tend vers zéro » ; en d'autres termes, que l'énergie transmutable de l'univers s'approche de l'extinction. Car cette énergie transmutable n'est autre que la somme des forces vives des atomes de la matière étherée ; et, en vertu de l'élasticité de ces atomes, dans toutes les transformations que subissent par leurs chocs les éléments de cette somme, elle reste *constante*, dans le temps et l'espace infinis : c'est le principe de la *conservation* de l'énergie universelle.

12. Les groupements des atomes, qui produisent les molécules des corps, transforment, en donnant lieu à la gravitation, une certaine partie de la force vive de ces atomes, en force vive des molécules, qui s'ajoute à celle qu'elles possèdent déjà en elles-mêmes et en leurs atomes constitutifs. Ils introduisent ainsi dans le mécanisme de l'univers un facteur nouveau, la *gravitation*, qui, après avoir contribué à produire et à maintenir le groupement des molécules simples en corps simples ou en molécules composées, et celui de ces dernières molécules en corps composés, distribue suivant les lois de la Dynamique tous les corps dans l'espace infini.

CHAPITRE III.

Lumière.

§ I^{er}. — NATURE DE LA LUMIÈRE. — SA PROPAGATION DANS L'ÉTHÉR LIBRE.

13. Les chocs des atomes d'éther les uns contre les autres produisent entre ces atomes une *répulsion* intermittente qui se traduit idéalement par une *répulsion* permanente entre ces mêmes atomes supposés immobiles.

Cette force *répulsive* est une certaine fonction de la distance, qui décroît lorsque la distance augmente.

Si, dans une région infiniment petite du milieu éthéré, les atomes sont très peu dérangés de leurs positions idéales d'équilibre, par une cause quelconque, (qui ne peut être qu'une variation instantanée de la force vive de chaque atome de cette région, due à un choc plus intense des molécules pondérables et des atomes éthérés ambiants sur cet atome), cette force, tendant à les y ramener, leur fait exécuter des vibrations très petites autour de ces positions. — Ces vibrations, de nature complexe, peuvent être regardées comme la somme d'une infinité de vibrations simples. Chacune de ces vibrations simples se propage dans le

milieu, autour du centre d'ébranlement, suivant deux ondes sphériques, dont la surface est l'enveloppe de celles des ondes planes qui proviendraient d'ébranlements plans partant au même instant de ce centre dans toutes les directions ; et la vibration, en chaque point de la surface de ces ondes, a la même direction qu'elle aurait sur celle de l'onde plane tangente en ce point.

Ces deux ondes ont des vitesses différentes. Sur l'une, le mouvement de l'atome se fait le long d'une orbite située dans son plan tangent. Sur l'autre, le mouvement est rectiligne et perpendiculaire à ce plan. Les premières vibrations sont dites *transversales* et les autres *longitudinales*, relativement à la direction de propagation.

Les vibrations transversales produisent le phénomène de la *lumière*. Quant aux vibrations longitudinales, comme elles ne paraissent correspondre à aucun phénomène physique connu, il est probable qu'en raison de la faible compressibilité du fluide éthéré elles sont peu sensibles.

Les ondes correspondant aux diverses vibrations simples ont des épaisseurs ou *longueurs* différentes ; mais leur vitesse de propagation est la même : dans l'éther libre, il n'y a pas de *dispersion*.

L'amplitude de la vibration le long d'un rayon issu du centre d'ébranlement varie en raison inverse de la distance à ce centre, et, par suite, l'intensité de la lumière, qui est proportionnelle à la force vive du mouvement vibratoire, varie en raison inverse du carré de cette distance.

§ II. — PROPAGATION DANS LES CORPS NON CRISTALLISÉS.
SIMPLE RÉFRACTION.

14. Lorsque le mouvement vibratoire et ondulatoire qui constitue le rayon de lumière, en se propageant dans l'éther libre, vient à rencontrer la surface d'un corps transparent, il s'y réfléchit en partie régulièrement, c'est-à-dire de manière que le rayon réfléchi et le rayon incident soient dans un même plan normal à la surface, et faisant le même angle avec la normale au point d'incidence, s'y diffuse, pour une autre partie, et, pour le reste, en pénétrant dans le corps, se communique à l'éther compris entre ses molécules, où il se modifie différemment, suivant la constitution intérieure du corps.

15. Dans les corps transparents non cristallisés, ou cristallisés dans le système cubique ou octaédrique, dont les molécules forment un système isotrope, comme le verre, l'éther qui entoure les molécules ayant une densité moyenne constante, supérieure à celle de l'éther libre, et présentant la même condensation dans tous les sens autour de chaque point, mais des variations de densité le long d'une même droite, qui se reproduisent périodiquement d'un intervalle moléculaire à l'autre, le rayon de lumière, en pénétrant de l'éther libre dans l'éther emprisonné, se décompose en ses rayons de longueur d'onde différente et de même vitesse de propagation dans l'éther, qui se propagent chacun dans le corps, avec une vitesse différente plus petite. Dès lors,

chacun de ces rayons s'y réfracte plus ou moins, selon sa vitesse moins ou plus grande de propagation, et de telle manière, que le rayon réfracté et le rayon incident sont dans un même plan normal à la surface, au point d'incidence, et forment respectivement avec la normale en ce point deux angles r et i dont le rapport des sinus est égal au rapport des vitesses de propagation de ce rayon dans l'éther intermoléculaire et dans l'éther libre. Le rapport du sinus de l'angle d'incidence au sinus de l'angle de réfraction est appelé *indice* de réfraction.

C'est là le phénomène de la *dispersion* de la lumière, en vertu de laquelle les divers rayons de longueur d'onde différente, qui constituent un rayon lumineux dans l'éther libre, se séparent dans les corps transparents.

Les rayons différemment réfractés à travers un prisme de verre triangulaire, perpendiculairement à l'arête, produisent sur l'œil qui les reçoit des impressions différentes qui se traduisent par la sensation de couleurs différentes dont la juxtaposition constitue ce qu'on appelle le *spectre* de la source lumineuse qui les a fournis. Ils s'y succèdent dans l'ordre suivant de réfraction croissante : rouge, orange, jaune, vert, bleu, indigo, violet. Outre ces rayons lumineux visibles, le spectre reçoit encore d'autres radiations, des radiations calorifiques et chimiques qui s'étendent, les premières, en deçà du rouge, les secondes au delà du violet et qui ne produisent pas la sensation de lumière, mais se manifestent par des effets *calorifiques, chimiques et phosphorogéniques*.

L'aspect du spectre varie avec la nature de la source qui le fournit.

Le spectre solaire n'est pas continu ; il présente une série de *raies* noires très fines, dites raies de Fraunhofer, du nom du physicien qui les catalogua le premier, raies qui sont dues à l'absorption de rayons d'indice de réfraction correspondant, par la matière pondérable, constituant, avec le fluide éthéré lumineux, la masse superficielle du soleil, comme le prouvent les spectres fournis par différents corps rendus lumineux, et qui, à la place des raies noires du spectre solaire, présentent des raies brillantes, en vertu de ce principe qu'un corps a un pouvoir *émissif* et un pouvoir *absorbant* pour la lumière proportionnels et qu'il *émet*, lorsqu'il est à l'état lumineux, les mêmes radiations qu'il *absorbe* comme corps non lumineux, seulement transparent.

La *Spectroscopie* ou analyse spectrale a pour objet l'étude des spectres des différentes sources lumineuses. La comparaison de ces spectres, au point de vue de la position des raies noires et des raies brillantes, donne des indications sur la composition chimique de ces sources.

C'est ainsi que d'abord Kirschhoff et Bunsen ont pu découvrir deux nouveaux métaux, le césium et le rubidium, constater dans la couche de 10" d'épaisseur qui enveloppe la photosphère du soleil l'existence de l'hydrogène et de vapeurs métalliques, provenant, par éruption, de la photosphère, et où dominent le sodium, le magnésium, le calcium ; qu'ensuite un phy-

sicien français, M. Janssen, a reconnu que les protubérances et la couronne extérieure du soleil sont formées par des éruptions d'hydrogène, et que les atmosphères de certaines planètes, comme celle de la Terre, et certaines étoiles jaunes et surtout rouges renferment de la vapeur d'eau, ce qui indique pour ces étoiles un refroidissement sensible; et enfin que M. Huggins a retrouvé dans toutes les étoiles observées par lui les éléments du soleil, diversement associés, et reconnu dans toute une classe de nébuleuses, irrésolubles en étoiles, l'existence de gaz incandescents parmi lesquels figure toujours en première ligne l'hydrogène.

§ III. — PROPAGATION DANS LES CORPS CRISTALLISÉS A UN AXE OPTIQUE. — DOUBLE RÉFRACTION. — POLARISATION RECTILIGNE.

16. Dans les corps transparents cristallisés à un axe optique, tels que le quartz, le spath d'Islande, etc., ayant pour forme typique de leurs cristaux le prisme droit à base carrée, ou hexagonale régulière, chaque rayon lumineux d'une certaine longueur d'onde se comporte différemment; car alors, en vertu de la forme polyédrique particulière des molécules et de leur orientation parallèle qui constituent la cristallisation, la condensation moyenne de l'éther, dans un intervalle moléculaire, varie avec la direction autour d'un point, de telle sorte qu'elle peut être représentée autour de chaque point par un ellipsoïde de révolution autour de l'axe

optique. Dans ce cas, l'analyse mathématique montre que l'onde lumineuse à vibration transversale de l'éther libre donne lieu dans le corps, pour des directions autres que celle de l'axe optique, à deux ondes, l'une sphérique, l'autre ellipsoïdale de révolution ; l'une à vibration *rectiligne rigoureusement transversale*, et l'autre à vibration *rectiligne quasi-transversale et perpendiculaire* à la première, ayant des vitesses différentes et produisant deux rayons qui se réfractent, le premier, dit *ordinaire*, suivant la loi de Descartes, énoncée ci-dessus, le second, dit *extraordinaire*, suivant une autre loi plus compliquée, de Huyghens.

17. Ces deux lois résultent de la forme de la surface de l'onde lumineuse qui se propage à travers le corps.

Dans les corps transparents non cristallisés, ou cristallisés suivant le système cubique ou octaédrique, l'onde lumineuse, qu'on peut regarder dans le milieu comme émanant du point d'incidence du rayon, est sphérique.

Dans les corps cristallisés à un seul axe optique, la surface de l'onde est composée d'une sphère et d'un ellipsoïde concentrique de révolution autour de l'axe optique qui passe par le point d'incidence et tangent à la sphère en ses deux pôles. Pour déduire de chacune de ces ondes la direction du rayon réfracté correspondant, on considère l'onde plane, perpendiculaire au rayon incident, qui atteint le plan tangent à la surface du corps au point d'incidence, une unité de temps après avoir atteint ce point, et par l'intersection de ces deux plans on mène deux plans tangents aux deux ondes émanées

du point d'incidence comme centre, qui se sont formées en ce même instant dans l'intérieur du corps. Les rayons allant du centre aux deux points de contact sont les rayons réfractés. Les longueurs de ces rayons vecteurs représentent les vitesses de propagation des rayons réfractés dans le milieu.

18. Les vibrations des deux rayons réfractés sont *polarisées en ligne droite*. La première s'effectue parallèlement à la trace du plan tangent à l'onde sphérique au point qui correspond au rayon ordinaire, sur un plan perpendiculaire à l'axe optique, c'est-à-dire est perpendiculaire au rayon et à l'axe optique. La seconde, qui est perpendiculaire à la première et fait un très-petit angle avec le plan tangent à l'onde ellipsoïdale correspondante, est située dans le plan mené par l'axe optique perpendiculairement à ce plan tangent, c'est-à-dire dans le plan du rayon et de l'axe optique.

Comme on appelle *plan de polarisation* d'un rayon *polarisé rectilignement* le plan perpendiculaire à la direction de la vibration, le plan de polarisation du rayon *ordinaire* est le plan mené par ce rayon parallèlement à l'axe optique.

Parmi les cristaux à un axe optique la tourmaline offre une particularité remarquable ; elle est colorée, absorbe une portion de la lumière qui la traverse, mais surtout celle du rayon *ordinaire*, et ne laisse passer que le rayon *extraordinaire*.

19. Lorsque l'onde incidente est, dans le milieu éthéré, perpendiculaire à l'axe optique, elle donne lieu, dans le corps, à une vibration transversale de forme

indéterminée. Mais le *quartz* fait exception. Le rayon de lumière, en traversant le cristal parallèlement à l'axe, se polarise à chaque instant perpendiculairement à un plan tournant uniformément autour de l'axe, comme l'indiquent l'expérience, et l'analyse mathématique fondée sur l'hypothèse d'une certaine distribution des atomes étherés intermoléculaires autour de l'axe du cristal.

Dans les corps cristallisés à un axe optique, tout plan mené parallèlement à cet axe y détermine une section dite *principale*. Les cristaux de spath d'Islande, qui ont la forme d'un rhomboèdre, c'est-à-dire d'un parallélipède dont toutes les faces sont des losanges égaux, d'angle obtus de $109^{\circ} 8'$, dérivant par le clivage de tronçures faites sur six sommets du prisme hexagonal régulier, ont pour axe la diagonale qui joint les sommets à angle obtus. Ils peuvent, par le clivage, être taillés en lames parallèles et perpendiculaires à l'axe.

§ IV. — PROPAGATION DANS LES CORPS CRISTALLISÉS A DEUX AXES OPTIQUES.

20. Dans les cristaux à deux axes optiques qui ont pour forme typique le parallélipède rectangle à arêtes inégales, tels que la topaze, l'arragonite, etc., l'ellipsoïde qui représente la condensation moyenne de l'éther autour de chaque point, pour toutes les directions, est à trois axes inégaux, parallèles aux arêtes

du parallélipède ; alors la surface de l'onde lumineuse, au lieu d'être l'ensemble d'une sphère et d'un ellipsoïde de révolution, est une surface biquadratique à deux nappes de mêmes plans principaux que l'ellipsoïde d'élasticité de l'éther intermoléculaire, qui donne pour chaque direction du rayon incident généralement deux rayons différents polarisés en ligne droite, dont les vibrations quasi-transversales sont dirigées à peu près suivant les axes de l'ellipse que détermine dans l'ellipsoïde d'élasticité un plan mené par son centre parallèlement au plan tangent de l'onde, au point où aboutit chaque rayon, et dont les vitesses de propagation sont respectivement inverses des longueurs de ces axes.

Quant à la direction de ces deux rayons, elle est déterminée, comme dans le cas des cristaux à un seul axe optique, par les points de contact des plans tangents à l'onde biquadratique qui se forme dans le corps au bout de l'unité de temps, menés par l'intersection de l'onde plane perpendiculaire au rayon incident et située à une distance du point d'incidence égale à la vitesse de ce rayon, hors du corps, avec le plan tangent à la surface de ce corps au point d'incidence.

Cette surface générale de l'onde lumineuse, dans les corps transparents cristallisés à deux axes optiques, a été considérée pour la première fois par Fresnel. Sa forme géométrique, à deux nappes, présentant quatre points coniques, sur les deux axes optiques, et quatre circonférences, qu'on peut appeler tangentielles, le long de chacune desquelles elle a même plan tangent, rend compte de toutes les particularités qu'offre la propaga-

tion de la lumière, dans ces corps, entre autres des phénomènes de réfraction conique et cylindrique signalés par Hamilton et vérifiés par Lloyd, dus à l'existence des points coniques et des circonférences qui sont points du contact d'un même plan tangent.

§ V. — POLARISATION CIRCULAIRE ET ELLIPTIQUE.

21. Les inégalités périodiques de densité de l'éther, d'une molécule à l'autre, sur toutes les droites issues d'un point quelconque d'un milieu *symétrique* ou *homoédrique* expliquent, comme nous l'avons dit, la *dispersion* de la lumière. Les inégalités périodiques éprouvées par la densité de l'éther dans les milieux *dissymétriques* ou *hémiedriques* permettent, en outre, d'expliquer la polarisation *circulaire*, et, en général, la polarisation *elliptique*, c'est-à-dire, la forme circulaire ou elliptique de l'orbite décrite par la vibration transversale sur l'onde lumineuse.

Lorsque les inégalités sont les mêmes dans toutes les directions autour d'un point, la polarisation est *circulaire* ; lorsqu'elles sont variables avec la direction, elle est *elliptique*. Le premier cas a lieu pour les dissolutions dans lesquelles flottent une multitude de petits cristaux hémiedriques orientés dans tous les sens, et cela, quelle que soit la direction du rayon lumineux incident. Il a lieu aussi pour un cristal à un axe optique, le *quartz*, où les inégalités périodiques de la densité de l'éther sont les mêmes dans toutes les directions

perpendiculaires à l'axe, mais seulement lorsque le rayon incident est parallèle à l'axe. Pour toutes les autres directions de ce rayon, la polarisation y est elliptique.

§ VI. — POLARISATION ROTATOIRE.

22. Quand la polarisation est circulaire, il y a deux vibrations circulaires de sens contraire, qui se propagent dans la même direction, avec une vitesse différente, et, par suite, se composent en une vibration *unique rectiligne* de direction *tournante*. C'est le phénomène de la polarisation *rotatoire* que l'on observe à travers les dissolutions hémiedriques et dans le quartz parallèlement à l'axe.

23. Les types géométriques, des différents systèmes de cristaux observés, système cubique ou octaédrique, système du prisme droit à base carrée ou hexagonale régulière, système du prisme droit à base rectangulaire, sont symétriques d'eux-mêmes par rapport à certains plans principaux. Mais les cristaux tels que les offre la nature, ou la cristallisation artificielle, présentent souvent sur la moitié de leurs sommets des tronçatures formant des facettes additionnelles. Lorsque ces tronçatures sont symétriquement placées, le cristal ne cesse pas d'être symétrique de lui-même ; mais lorsqu'elles sont placées de telle sorte que le cristal n'est plus symétrique de lui-même, le cristal est dit dissymétrique ou hémiedrique.

La distribution des facettes additionnelles qui constituent l'hémiédrie d'un cristal est telle, que, si ce même cristal avait des troncutures seulement sur ses autres sommets, sa seconde forme serait *symétrique* de la première. Ces deux formes sont comme un objet et son image dans un miroir plan ; elles ont tous leurs éléments linéaires et angulaires homologues égaux ; mais ces éléments étant disposés en sens contraire elles ne sont pas superposables ; elles sont alors *symétriques*, par rapport à un plan, ou un point.

Un observateur qui se mettrait successivement debout sur deux faces symétriques, verrait deux éléments quelconques homologues de ces formes symétriques, sur l'une, à droite, sur l'autre, à gauche. L'hémiédrie géométrique d'un cristal, si l'on suppose vertical son axe principal, peut donc être à droite ou à gauche.

Suivant le sens droit ou gauche de l'hémiédrie de cristaux donnés, le plan de polarisation du rayon qui traverse une dissolution de ces cristaux tourne à droite ou à gauche. Les cristaux ou leur dissolution sont dits alors dextrogyres ou lévogyres.

Pour les cristaux des deux premiers systèmes, le sens droit ou gauche de l'hémiédrie est indiqué par celui de la plus grande inclinaison des troncutures sur les deux faces latérales correspondantes du cristal ; pour les cristaux du troisième système, comme les troncutures ont la même inclinaison sur les deux faces, le sens droit ou gauche de l'hémiédrie est celui de la troncuture supérieure relativement à la face latérale la plus grande. On admet, dans le premier cas, que le

cristal est vu par un observateur placé debout sur sa base, en dehors, et regardant l'une quelconque de ses faces latérales ; dans le second, que cet observateur regarde la face latérale la plus grande.

La droite et la gauche du rayon, si on suppose qu'il tombe verticalement sur le cristal ou sur la dissolution, sont la droite et la gauche de l'observateur regardant le rayon.

Il vaudrait mieux, dans tous les cas, supposer l'observateur debout le long de l'axe principal du cristal et le long du rayon ; seulement alors, les deux sens, droit et gauche, seraient intervertis.

Tous les sels tartrates ont leurs cristaux hémédriques dans le même sens, à droite : ils sont dextrogyres.

Les sels racémates dont l'acide, l'acide racémique, est isomère avec l'acide tartrique, diffèrent de leurs isomères en ce qu'ils ne sont pas hémédriques et, par suite, ne font point tourner le plan de polarisation.

Mais M. Pasteur a reconnu que l'un d'entre eux, le racémate double d'ammoniaque et de soude, étant dissous, se sépare par la cristallisation en deux *sortes* de cristaux qui sont inversement hémédriques, les uns *dextrogyres*, les autres *lévogyres*. Il en a conclu que, si la dissolution de ce racémate était inactive, c'est que les actions contraires de ces deux sortes de cristaux sur la lumière se neutralisaient ; et il fut ainsi démontré que l'hémédrie est le signe caractéristique du pouvoir rotatoire des dissolutions cristallines. Le racémate double de potasse et de soude présente le même résultat.

Le quartz, qui cristallise en prismes hexagonaux terminés, à leurs bases, par deux pointements pyramidaux, présente, dans quelques-uns de ses cristaux, sur trois sommets alternés de chacune de ses bases, trois facettes de troncature, inclinées plus d'un côté du prisme que de l'autre, qui constituent une hémiedrie de droite ou de gauche, suivant le sens droit ou gauche de la plus grande inclinaison. Ces cristaux sont *dextrogyres* ou *lévogyres*.

Les bromate et chlorate de soude et le double acétate d'urane et de soude, dont les cristaux sont cubiques, présentent aussi, sur quatre sommets des cubes, des facettes hémiedriques inclinées à droite ou à gauche qui les font *dextrogyres* ou *lévogyres*.

Si l'on fait redissoudre les cristaux de la même hémiedrie, pour les faire cristalliser de nouveau, ils reproduisent deux sortes de cristaux présentant les deux hémiedries inverses, tandis qu'en dissolution ils conservent leur variété d'hémiedrie. Il y a là un effet de l'opération de la cristallisation, dans laquelle les molécules en dissolution n'ont pas plus de tendance à former, en se groupant, des cristaux égaux que des cristaux symétriques.

24. L'hypothèse du double mouvement circulatoire et gyrotoire des molécules des corps semble en contradiction avec l'idée qu'on se fait communément de la cristallisation.

On admet, en effet, que les molécules du corps cristallisé ont la même forme polyédrique que ses cristaux, et qu'elles sont distribuées dans le cristal, paral-

lèlement, c'est-à-dire avec la même orientation de leurs faces homologues ; ce qui paraît inconciliable avec le double mouvement des molécules.

Mais, de même que, pour l'explication des mouvements vibratoires transversaux et longitudinaux, dans l'éther et dans les corps, qui produisent la lumière et le son, on admet idéalement que les atomes de l'éther ou les molécules des corps, qui, dans la réalité, sont en mouvement continu, et se communiquent par leurs chocs des pressions de contact, sont immobiles chacune dans une position moyenne et exercent entre elles, à distance, des actions répulsives, effet représentatif de ces pressions ; de même, on peut supposer idéalement que, dans les corps cristallisés, les molécules, qui, dans la réalité, sont animées d'un mouvement de gyration autour d'axes de direction quelconque, sont à la fois immobiles et orientées toutes dans le même sens, leurs atmosphères éthérées continuant autour d'elles leur mouvement de gyration primitif. C'est ce mouvement par lequel nous expliquerons plus loin le magnétisme des corps.

25. Ainsi, dans les corps transparents, solides ou liquides, dont les molécules ont une forme cristalline, soit symétrique ou homoédrique, soit dissymétrique ou hémédrique, les rayons de lumière subissent, à travers l'éther intermoléculaire, une transformation de leur mouvement vibratoire, qui rend leurs vibrations transversales *rectilignes*, c'est-à-dire les *polarise* perpendiculairement à un plan, dit plan de polarisation, passant par le rayon, fixe, quand les molécules ont

une forme cristalline symétrique, mobile uniformément autour du rayon dans un sens ou dans l'autre, suivant le sens de l'hémiédrie, quand les molécules ont une forme cristalline dissymétrique.

§ VII. — POLARISATION PAR RÉFLEXION ET RÉFRACTION SIMPLE.

26. Mais ce n'est pas seulement la réfraction des rayons de lumière dans les corps cristallisés, qui les polarise rectilignement. Ils sont aussi polarisés par leur réflexion et leur réfraction à la surface d'un milieu transparent, dans de certaines conditions. En effet, le mouvement vibratoire d'un rayon de lumière qui tombe sur la surface d'un corps poli peut toujours, quelle que soit sa nature, être regardé comme la résultante de deux vibrations rectilignes, l'une perpendiculaire, l'autre parallèle au plan d'incidence. La première, qui est tangente à la surface du milieu au point d'incidence, se réfléchit en partie d'une quantité qui augmente, de l'incidence normale à l'incidence rasante, et se réfracte pour l'autre partie. La seconde, qui est située dans le plan d'incidence, se comporte autrement. Elle se réfléchit en partie d'une quantité qui va en décroissant, de l'incidence zéro à une incidence déterminée L pour laquelle elle cesse de se réfléchir, et si l'incidence croît, elle se réfléchit de nouveau en partie, d'une quantité qui augmente jusqu'à l'incidence de 90° . Dans tous les cas, la partie qui n'est pas réfléchie est réfractée ou

absorbée par le corps, à l'état calorifique, ou par l'éther extérieur, à l'état de vibration longitudinale. L'incidence L est nommée *angle de polarisation*.

Cette différence d'allure de la seconde vibration, qui donne lieu à la polarisation complète du rayon réfléchi, perpendiculairement au plan d'incidence, pour une certaine incidence, peut s'expliquer par cette considération : que cette vibration lorsqu'elle rencontre la surface, doit, en vertu du changement d'élasticité du milieu propagateur, éprouver, outre un changement de sens de sa vitesse, une déviation de sa direction dans le plan d'incidence, qui lui permet de se réfracter au lieu de se réfléchir. Elle doit prendre une direction perpendiculaire à celle du rayon réfracté. Mais alors on peut la regarder comme la résultante de deux vibrations rectangulaires, l'une dirigée dans le sens du rayon réfléchi, l'autre perpendiculairement à ce rayon. La première composante se propage en partie longitudinalement suivant le rayon réfléchi, mais ne produit pas de lumière sur ce rayon ; l'autre partie ne peut que se propager suivant le rayon réfracté, pour une part, et être absorbée par le corps, à l'état d'énergie calorifique, pour l'autre part. La seconde se propage, en partie, suivant le rayon réfléchi et en partie suivant le rayon réfracté. Elle diminue, lorsque l'angle que forme la direction du rayon réfracté avec celle du rayon réfléchi se rapproche de l'angle droit, et elle devient nulle, lorsque cet angle devient droit, auquel cas la première composante se réfracte tout entière. D'où il résulte que

pour l'incidence L , qui rend droit l'angle du rayon réfléchi et du rayon réfracté, le rayon réfléchi ne doit contenir que de la lumière polarisée perpendiculairement au plan d'incidence.

Dans ce cas, la somme de l'angle d'incidence et de l'angle de réfraction est égale à 90° , et par suite la formule $\frac{\sin i}{\sin r} = n$, devient $tg L = n$. Ce qui montre que l'angle de polarisation L a sa tangente trigonométrique égale à l'indice de réfraction. C'est la loi que Brewster découvrit par l'expérience.

On réalise ce phénomène de polarisation par réflexion au moyen de deux miroirs de verre placés aux deux extrémités d'un tube, et faisant avec sa direction un angle égal à celui L de la polarisation. Un rayon de lumière se réfléchit sur le premier et se polarise dans le plan d'incidence ; il se réfléchit ensuite sur le second, si les deux plans d'incidence coïncident, mais il est éteint, s'ils sont perpendiculaires.

Les deux composantes du rayon incident se réfractent inégalement. Celle qui est parallèle au plan d'incidence subit la réfraction la plus intense, de telle sorte que la lumière réfractée est partiellement polarisée dans un plan perpendiculaire au plan d'incidence. Elle ne l'est jamais totalement ; elle approche le plus de l'être sous l'incidence L de polarisation par réflexion.

En prenant une pile de glaces suffisamment nombreuses, on parvient à augmenter cette polarisation partielle et à obtenir de la lumière transmise presque complètement polarisée, dont les vibrations sont paral-

lèles au plan d'incidence. Cette pile de glaces arrête toute lumière polarisée dont les vibrations sont perpendiculaires au plan d'incidence.

§ VIII. — INTERFÉRENCE. — DIFFRACTION.

27. Le mouvement vibratoire des atomes de l'éther, le long des rayons lumineux, qui se propage par ondes successives, où sa vitesse est dirigée alternativement et périodiquement, tantôt en un sens, tantôt en sens contraire, explique le phénomène de l'*interférence* de la lumière, qui se produit lorsque deux rayons lumineux, partis de la même source et ayant parcouru des chemins peu différents, viennent à se rencontrer, sous un angle très petit, puisque, à leur point de rencontre, les vitesses de vibration sur ces deux rayons s'ajoutent ou se retranchent suivant qu'elles sont de même sens ou de sens contraire.

28. Le phénomène de la *diffraction* de la lumière s'explique par la même cause, jointe à ce principe, que lorsqu'une onde lumineuse rencontre une arête vive d'un corps, chaque point de cette arête peut être considéré comme un centre d'ébranlement de l'éther, autour duquel se propage une onde sphérique, si le mouvement a lieu dans l'éther libre ou dans un milieu transparent isotrope quelconque, et une onde de forme sphéro-ellipsoïdale, ou biquadratique, si le milieu est cristallisé à un axe optique, ou à deux axes optiques.

1° *Bandes d'interférence.*

29. On réalise le phénomène des interférences de plusieurs manières.

On peut se servir de deux miroirs juxtaposés, qui font entre eux un angle très voisin de 180° , sur lesquels on fait tomber deux faisceaux très voisins de lumière simple issus d'une fente très étroite, parallèle à leur intersection.

Dans ce cas, les deux faisceaux de lumière se superposent après la réflexion dans les mêmes conditions que s'ils partaient des deux images de la fente, qui, provenant d'une même origine, sont dans le même état vibratoire. Si l'on imagine le plan mené par l'intersection des deux miroirs, perpendiculairement au plan des deux images, sur un écran perpendiculaire à ce plan, et parallèle à cette intersection, on voit le long de la trace de ce plan une bande brillante très étroite, et, de part et d'autre de ce plan deux séries symétriques de bandes parallèles alternativement obscures et brillantes. Les bandes brillantes sont dues à la superposition des rayons qui ont parcouru, de leur source à l'écran, des chemins différant d'un nombre pair de demi-longueurs d'onde, $0, \lambda, 2\lambda, 3\lambda, \dots, n\lambda$. Les bandes obscures sont dues à la superposition des rayons qui ont parcouru, de leur source à l'écran, des chemins différant d'un nombre impair de demi-longueurs d'onde, $\frac{\lambda}{2}, \frac{3\lambda}{2}, (2n + 1) \frac{\lambda}{2}$.

Les bandes sont d'autant plus étroites que la longueur d'onde du rayon de lumière simple est plus petite, ou que sa réfrangibilité est plus grande. Par suite, l'effet produit par deux faisceaux de lumière blanche, qui est la résultante de ceux que détermine individuellement chacun des divers rayons simples composants, est une double série symétrique de bandes irisées de part et d'autre d'une bande blanche, dont les couleurs se succèdent dans un ordre qui dépend de la proportion des divers rayons simples superposés en chaque point, dont la dispersion est d'autant plus grande qu'elles s'éloignent plus de la bande blanche, et qui finissent par dégénérer en une teinte blanche uniforme.

30. On peut se servir aussi d'un prisme de verre à base isocèle dont l'angle au sommet est très voisin de 180° , en l'éclairant par une fente lumineuse très mince parallèle à ses arêtes. La réfraction donne deux images virtuelles ; et les rayons qui ont traversé le prisme sont dans les mêmes conditions que s'ils venaient originairement de ces deux foyers identiques. Ces rayons, en se superposant sur un écran, donnent naissance à des franges d'interférence, comme celles obtenues au moyen des deux miroirs. Au lieu de ce prisme, on peut encore se servir de deux moitiés d'une lentille, qui est coupée en deux par un plan mené suivant son axe, en les écartant à une distance très petite, et les éclairant par une fente lumineuse, étroite, parallèle à ce plan. Il se forme deux images identiques sur les deux axes ; et les rayons qui en émanent, en se

superposant sur un écran, y produisent des franges d'interférence.

2° *Anneaux colorés.*

31. On peut obtenir, au lieu de bandes, des anneaux colorés, en posant une lentille plane-convexe de verre de très grand rayon, sur une lame plane de la même substance, la convexité étant tournée vers la lame. Quand on reçoit sur ce double verre un faisceau normal de lumière simple, on voit par réflexion une tache noire centrale entourée d'anneaux concentriques alternativement brillants et obscurs, qui se serrent de plus en plus à mesure que leur numéro d'ordre augmente. Le diamètre des anneaux augmente ou diminue avec la longueur d'onde du rayon simple ; de telle sorte qu'avec la lumière blanche, les anneaux des diverses couleurs empiètent les uns sur les autres et que l'ensemble de ces couleurs donne lieu à une série d'anneaux, colorés des diverses nuances du spectre, dont la dispersion augmente rapidement avec le diamètre, jusqu'à les fondre dans une lumière sensiblement blanche d'égale intensité.

Par réfraction, l'appareil montre transmis un autre système d'anneaux beaucoup plus pâles, dont le centre est blanc, et qui se succèdent dans un ordre inverse.

Pour expliquer ces anneaux, il faut d'abord se rappeler le principe de la théorie des ondulations, que, lorsqu'une vibration, se propageant dans un milieu, en

rencontre un autre, elle se réfléchit, en conservant le sens de sa vitesse, ou en en changeant, suivant que le second milieu est moins dense ou plus dense que le premier ; et ensuite tenir compte des différences de chemins parcourus par les rayons qui se réfléchissent et se réfractent sur les surfaces des milieux qu'ils rencontrent.

La vitesse d'une vibration lumineuse change de signe à chaque demi-longueur d'onde ; par conséquent tout changement dans le signe peut être assimilé à un retard $\frac{\lambda}{2}$ dans la marche. Si donc l'on considère un rayon lumineux tombant normalement sur une lame mince d'air, d'épaisseur e , comprise entre deux verres, une partie de ce rayon se réfléchira sur la première face de la lame, l'autre partie se réfractera, puis se réfléchira partiellement sur la seconde face, et après avoir traversé de nouveau l'épaisseur de la lame, il émergera pour se superposer au rayon réfléchi sur la première face. Ce second rayon réfléchi aura ainsi parcouru, de plus que le premier, un chemin égal à $2e$, et en outre éprouvé un changement de signe de sa vitesse de vibration à sa réflexion sur la seconde face. Il aura donc sur le premier un retard égal à $2e + \frac{\lambda}{2}$.

Si ce retard est un multiple impair de $\frac{\lambda}{2}$, il y aura destruction par interférence de ces deux rayons réfléchis, et par suite extinction de lumière ; si, au contraire, il est un multiple pair, il y aura addition des intensités

lumineuses de ces deux rayons, et par suite lumière plus éclatante.

Si l'on suppose maintenant que l'épaisseur de la lame d'air varie, par degrés insensibles, autour d'un de ses points, de zéro à une valeur E très petite, ce qui a lieu pour la lame d'air comprise entre la plaque de verre et la lentille, on reconnaîtra que, par réflexion, des anneaux obscurs correspondront à l'épaisseur $e = 2n \frac{\lambda}{4}$, et des anneaux brillants à $e = (2n - 1) \frac{\lambda}{4}$.

Le centre est noir (pour $n = 0$).

Lorsqu'au lieu des rayons réfléchis on considère les rayons réfractés à travers les deux verres et la lame d'air interceptée, on reconnaît qu'il y a un rayon qui n'a subi aucune réflexion dans sa marche, et un autre qui s'est réfléchi d'abord sur la seconde face, puis sur la première pour émerger ensuite et se superposer sur le premier. Comme il y a eu pour ce dernier rayon, deux réflexions sur un milieu plus dense, il a, sur le premier, un retard égal à $2e + 2 \frac{\lambda}{2}$. De là l'explication des anneaux par réfraction, dans le système formé par la lame d'air d'épaisseur variable, la plaque et la lentille de verre. Les anneaux brillants correspondent à l'épaisseur donnée par l'équation $2e + 2 \frac{\lambda}{2} = 2n \frac{\lambda}{2}$ ou $e = (n - 1) \frac{\lambda}{2}$; et, les anneaux obscurs par l'équation $2e + 2 \frac{\lambda}{2} = (2n + 1) \frac{\lambda}{2}$, ou $e = (2n - 1) \frac{\lambda}{4}$. Le centre est brillant (pour $n = 1$).

Les irisations que présentent les bulles de savon s'expliquent de la même manière. L'épaisseur de ces bulles allant en augmentant de leur partie supérieure à leur partie inférieure, elles jouent le rôle de la lame d'air considérée précédemment.

3° Bandes et anneaux d'interférence associés.

32. Enfin on réalise encore les phénomènes d'interférence au moyen de lames de quartz ou de spath, parallèles ou perpendiculaires à l'axe optique.

Soit un rayon de lumière polarisé suivant OC , que l'on reçoit normalement sur une lame parallèle à l'axe. On peut décomposer sa vibration en deux, l'une OX , parallèle à l'axe, l'autre OY , perpendiculaire. La première se réfracte *extraordinairement*, la deuxième *ordinairement*. Elles marchent avec des vitesses différentes dans la même direction, et, à la sortie de la lame elles ont une différence de marche d proportionnelle à l'épaisseur traversée, et qui est un nombre de demi-longueurs d'onde égal à $\frac{2d}{\lambda}$.

Si $\frac{2d}{\lambda}$ est un nombre pair, les deux vibrations sont d'accord et se composent en une vibration parallèle à celle OC du rayon incident et ne donnent qu'une image *extraordinaire* à travers un cristal de spath, servant d'analyseur, dont la section principale est dirigée suivant OC . Si $\frac{2d}{\lambda}$ est un nombre impair, elles se compo-

sent en une vibration OC' symétrique de la première relativement au plan mené par le rayon incident parallèlement à l'axe. En tournant le cristal de spath de manière que sa section principale soit dirigée suivant OC' , il ne donne encore qu'une image *extraordinaire*.

Il résulte de là que si l'on superpose en lame deux prismes égaux de quartz, très minces et d'un angle très aigu, l'un ayant son axe dirigé perpendiculairement aux arêtes, et l'autre, parallèlement, un rayon qui se réfractera ordinairement dans le premier, traversera extraordinairement le second, et inversement ; par suite, un rayon polarisé se décomposera en deux vibrations, ordinaire et extraordinaire, qui auront à la sortie de la lame une différence de marche déterminée par la différence des épaisseurs traversées dans les deux prismes. Cette différence de marche sera nulle dans la section droite moyenne de la lame parallèle aux arêtes, elle augmentera positivement ou négativement des deux côtés de cette section, et prendra successivement les valeurs $0, \pm \frac{\lambda}{2}, \pm 2 \frac{\lambda}{2}, \pm 3 \frac{\lambda}{2}$.

Si donc on interpose la lame dans le trajet d'un faisceau normal de rayons polarisés suivant OC , et qu'on reçoive ces rayons dans un cristal de spath, lorsque la section principale de ce cristal sera dirigée suivant OC , il donnera des bandes noires, l'une sur la section moyenne de la lame, les autres également espacées des deux côtés de cette section, aux points où la différence de marche des rayons ordinaire et extraordinaire est

un multiple pair de $\frac{\lambda}{2}$, et des bandes lumineuses aux endroits où cette différence est un multiple impair de $\frac{\lambda}{2}$. Si l'on tourne l'analyseur suivant O C', les bandes noires sont devenues lumineuses, et les bandes lumineuses noires.

Mais ces bandes ne se placeront pas aux mêmes endroits pour les diverses couleurs, puisque λ varie d'une couleur à l'autre ; elles seront plus rapprochées pour le violet et plus espacées pour le rouge. Elles présenteront la teinte des anneaux colorés par réflexion, quand la section principale de l'analyseur sera dirigée suivant O C, et celle des anneaux colorés par transmission, quand cette section sera dirigée suivant O C'.

Au lieu de deux prismes, on peut superposer deux lames de quartz croisées, dont la supérieure est légèrement creusée en cuvette et qui ont la même épaisseur en leur milieu.

33. Les lames cristallisées, taillées normalement à l'axe optique, donnent lieu à un phénomène d'interférence plus compliquée, mais qui s'explique de la même manière.

Au moyen d'une lentille on forme un faisceau conique de lumière, de très faible convergence qu'on reçoit en O dans l'œil. On le polarise extraordinairement par une lame de tourmaline A, placée normalement à l'axe de révolution du cône, et on l'éteint par une seconde tourmaline B, croisée avec la première, puis on interpose entre les deux une lame de cristal taillée perpendiculairement à son axe optique.

On voit alors une croix noire dont les branches sont parallèles aux sections principales normales des deux tourmalines et, entre les branches, une série d'anneaux à centre noir.

Si l'on tourne de 90° la tourmaline B, l'aspect est complémentaire : la croix est brillante et les anneaux sont à centre blanc.

Ces phénomènes s'expliquent ainsi : les plans méridiens parallèles aux axes des deux tourmalines croisées sont des sections principales de la lame de cristal. Les rayons situés dans ces plans, en se réfractant dans cette lame, ne changent pas leur plan de vibration ; par conséquent, puisqu'ils étaient éteints avant l'interposition de la lame, ils le seront encore après.

Si l'on considère ensuite une section principale du cristal incliné à 45° , par exemple, de ces plans, la vibration incidente se décomposera en deux, l'une située dans le plan de cette section, l'autre perpendiculaire à ce plan, qui se réfracteront extraordinairement et ordinairement, prendront une différence de marche à travers le cristal et donneront une vibration elliptique. La tourmaline analyseur décomposera cette vibration en deux et laissera passer l'image extraordinaire. La différence de marche augmentant du centre du champ de vision à ses bords, puisque l'inclinaison des rayons augmente, elle prendra, d'une part, les valeurs successives $\lambda, 2\lambda, 3\lambda, \dots$ auquel cas la vibration gardera sa direction primitive, sera éteinte par l'analyseur, et donnera des anneaux noirs; d'autre part les valeurs $\frac{\lambda}{2}, \frac{3\lambda}{2}, \frac{5\lambda}{2}, \dots,$

auquel cas, la vibration donnera des anneaux brillants.

En tournant de 90° la tourmaline B, on obtient évidemment des résultats complémentaires.

Tous les cristaux à un axe optique agissent de même.

Ceux à deux axes optiques présentent des apparences plus compliquées encore, dues à l'existence de deux axes, qui a pour effet de donner, au lieu d'anneaux circulaires, des courbes en forme de lemniscate, ayant pour foyers deux points brillants ou obscurs correspondant aux deux axes, et dans un cas, une croix dont les branches partent de ces deux foyers, et dans un autre, les deux branches d'une hyperbole équilatère passant par ces deux foyers, et dont les asymptotes sont parallèles aux axes des lemniscates.

Tous les verres qui par la trempe, le recuit, la pression, la flexion, ou une action mécanique quelconque ont pris des élasticités inégales suivant diverses directions, produisent des effets analogues, de formes variées.

Pour une lame de quartz taillée perpendiculairement à l'axe, un rayon de lumière polarisé qui la traverse suivant l'axe donne deux images, ordinaire et extraordinaire, colorées de teintes complémentaires très vives; et un faisceau de lumière convergente donne, outre des anneaux concentriques, une croix noire dont les branches ne se prolongent pas jusqu'au centre.

4° *Bandes de diffraction.*

34. Pour réaliser les phénomènes de diffraction,

on éclaire une ouverture étroite et linéaire par une fente lumineuse parallèle très étroite. Cette fente, sans l'action qu'exercent les bords de l'ouverture sur les rayons de lumière qui les rasent, enverrait sur un écran une bande lumineuse limitée aux plans qui passent par la fente lumineuse et les deux bords de l'ouverture. Mais comme tout point de chaque bord, atteint par un rayon, devient centre de vibration, et envoie des rayons dans toutes les directions autour de lui, ces rayons émanés de tous les points des deux bords se superposent sur l'écran, entre eux et avec les rayons émanés directement de la source lumineuse, et donnent lieu à des interférences. Le milieu de la bande, qui serait lumineux sans la diffraction, est obscur ou brillant, suivant que la différence des chemins parcourus par les rayons centraux directs et les rayons qui s'infléchissent sur les bords de l'ouverture est un nombre impair ou pair de demi-longueurs d'onde. A partir de ce milieu, se succèdent une série de bandes alternativement brillantes et obscures dans le premier cas, obscures et brillantes dans le second, suivant que les rayons interférents ont parcouru des chemins différant successivement d'un nombre pair et impair ou d'un nombre impair et pair de demi-longueurs d'onde.

Au lieu d'éclairer une ouverture étroite, on peut éclairer un corps étroit comme un cheveu. Le phénomène de diffraction est analogue ; il s'explique de la même manière. Il n'y a de particulier que l'existence d'une bande lumineuse au milieu de ce qui serait l'ombre du corps sans la diffraction.

5° Anneaux de diffraction.

On peut encore éclairer un disque opaque très petit par un point lumineux; et on obtient alors des anneaux alternativement obscurs et brillants à partir du centre de l'ombre qui est brillant.

Cette particularité du centre lumineux de l'ombre géométrique, qui est une conséquence de la théorie des ondulations, et que ne peut expliquer la théorie de l'émission, le géomètre Poisson, partisan de la théorie de l'émission, en faisait une objection contre la légitimité de la théorie des ondulations, parce qu'il la croyait contraire à l'observation; mais le physicien Fresnel le convertit, en lui mettant sous les yeux ce phénomène, réalisé par l'expérience.

35. Comme l'espacement des bandes ou anneaux noirs et lumineux d'interférence dépend de la longueur d'onde du rayon de lumière, la mesure de cet espacement, dans des conditions déterminées d'expérience, donne la valeur numérique de cette longueur, pour les divers rayons simples.

Le rouge extrême du spectre solaire a pour longueur d'onde $0^{\text{mm}},0000007604$.

Le violet extrême $0^{\text{mm}},0000003933$.

Pour les rayons calorifiques, dans la partie infra-rouge, la longueur d'onde extrême est de $0,0000019400$.

Pour les rayons chimiques, dans la partie ultra-violette, elle est de $0,0000002948$.

36. Lorsque des rayons de lumière blanche tom-

bent sur la surface d'un corps, une partie de ces rayons se *diffuse*, c'est-à-dire que les divers mouvements vibratoires constituant les rayons de diverses couleurs dont la réunion forme la lumière blanche se réfléchissent, en partie, irrégulièrement dans tous les sens autour de chaque point de la surface en proportions différentes, variables avec la nature du corps. Ils produisent sur l'œil qui les reçoit des impressions qui se traduisent par une sensation différente, suivant la quantité relative des forces vives de ces divers mouvements superposés. Cette sensation est celle de la *couleur* particulière du corps.

37. La vitesse de propagation de la lumière dans l'éther a été déterminée, pour la première fois par Rømer, astronome danois, en 1675, au moyen de l'observation des éclipses du premier satellite de Jupiter.

L'intervalle de temps qui s'écoule entre les instants *vrais* de deux immersions ou de deux émergences de ce satellite étant de 42 h. 22 m. 35 s., si la vitesse de la lumière était infinie, il s'écoulerait un certain nombre de fois cet intervalle entre les époques de deux éclipses observées de deux points différents de l'orbite de la Terre ; si au contraire la lumière emploie un certain temps à franchir une distance donnée, aux époques où la Terre s'éloigne ou s'approche de Jupiter, l'intervalle de temps qui s'écoule entre deux éclipses *apparentes* devra surpasser l'intervalle *vrai* ou en être surpassé de tout le temps que la lumière du satellite met à franchir l'accroissement ou le décroissement de distance de la Terre au satellite, d'une observation à l'au-

tre. C'est par cette considération que Røemer a déterminé la vitesse de la lumière dans l'éther. Il l'a trouvée égale à 77000 lieues par seconde.

Dans ces derniers temps, M. Fizeau, par un procédé direct, a déterminé la vitesse de propagation de la lumière dans l'air, en mesurant le temps employé par un rayon de lumière à parcourir, à la surface de la Terre, une certaine distance.

Sans entrer dans le détail de l'expérience, nous nous bornerons à dire que le principe de ce procédé consiste dans l'envoi, d'une station (Suresnes), par la combinaison de trois lentilles convergentes et d'un miroir plan, d'un faisceau parallèle de lumière issue de la flamme d'une lampe, sur un miroir plan perpendiculaire situé à une seconde station (Montmartre), où il se réfléchit pour parcourir au retour, en sens inverse, le même chemin qu'à l'aller, et venir tomber convergent sur le bord d'une roue dentée d'axe parallèle au faisceau, qui, en tournant avec une grande vitesse, présente alternativement au foyer de convergence du faisceau réfléchi une dent et un intervalle égal de deux dents consécutives.

La lumière mettant un certain temps à franchir la distance de Suresnes à Montmartre, 8633^m, et à revenir ensuite à son point de départ, on peut donner à la roue une vitesse de rotation assez grande pour qu'un rayon qui a traversé en partant le milieu de l'intervalle de deux dents vienne frapper au retour le milieu de la dent suivante, ce dont on est averti par l'éclipse complète de l'image réfléchie de la flamme de la lampe.

Connaissant, en secondes, le temps qu'une dent met à passer au foyer, d'après le nombre des dents de la roue et le nombre de tours qu'elle fait en une seconde, on obtient la vitesse de la lumière en divisant le double de 8633 par ce temps. On a trouvé ainsi 77073 lieues.

Par ce même procédé un peu modifié, on a constaté que la vitesse de propagation de la lumière dans l'air est les $\frac{4}{3}$ de la vitesse de propagation dans l'eau. Elle est plus grande dans l'air que dans l'eau, conformément à l'hypothèse des ondulations, contrairement à celle de l'émission. Cette expérience apporte donc un nouvel argument irréfragable en faveur de la première de ces hypothèses, et rend la seconde absolument inadmissible.

38. Lorsque des rayons de lumière traversent un milieu gazeux, une partie de la force vive du mouvement vibratoire de l'éther intermoléculaire se communique aux molécules du gaz qui se trouvent sur le trajet de ces rayons ; et, par suite, augmente leur vitesse de translation. C'est là l'explication des phénomènes observés par Crookes dans ses expériences radiométriques. Un moulinet à ailettes, mobile autour d'un axe fixe, étant placé dans un récipient à parois transparentes, qui contient un gaz très raréfié, et recevant d'un côté de l'axe des rayons de lumière, tourne dans le sens de ces rayons, avec une vitesse de rotation d'autant plus grande que sa distance aux parois du récipient est plus petite. Ce mouvement est dû aux chocs, sur le moulinet, des molécules du gaz, qui sont d'une intensité

plus grande du côté qui reçoit les rayons de lumière que du côté opposé, et qui sont d'autant plus fréquents, dans l'unité de temps, que la distance des ailettes à la paroi du récipient, située en face, qui les réfléchit, est plus petite.

Cette augmentation de force vive des molécules d'un gaz par la lumière rend aussi compte des variations que le son, produit par les vibrations d'un gaz, éprouve sous l'influence de la lumière. L'effet est dû aussi bien aux radiations calorifiques qu'aux radiations lumineuses.

39. La lumière et la chaleur rayonnante agissent également, par la force vive de leurs mouvements vibratoires, sur certains corps solides ou liquides, en faisant varier leur conductibilité électrique. C'est l'action exercée par la lumière sur le sélénium, préalablement porté à une très haute température, qui a permis à Graham Bell de transmettre la parole à distance par des rayons de lumière.

Voici en quoi consiste le photophone qu'il a imaginé :

La plaque ou membrane mince, qui vibre transversalement sous le choc de la voix, communique son mouvement, par une tige adaptée normalement à son centre à un obturateur qui, en glissant, peut fermer plus ou moins une ouverture pratiquée dans un écran. Un faisceau de lumière parallèle, traversant cette ouverture, y passe en plus ou moins grande quantité, suivant sa grandeur ; par suite l'intensité lumineuse du faisceau, après son passage, subit des variations.

En tombant, à distance, sur un fragment de sélénium, il y détermine des variations de conductibilité

électrique correspondantes. Le sélénium faisant partie d'un circuit dans lequel existe un courant, l'intensité de ce courant subit lui-même des variations correspondantes. Un électro-aimant qui fait aussi partie du circuit éprouve ces mêmes variations dans son intensité magnétique. Enfin ces variations produisent sur une membrane ou plaque mince de fer doux placée en regard d'un pôle de l'électro-aimant les mêmes mouvements vibratoires que ceux de la première membrane. D'où résulte, pour une oreille mise en face et près de cette seconde membrane, une impression acoustique semblable à celle que produit directement la voix.

Au lieu de l'écran percé d'une ouverture, par laquelle passe le faisceau de lumière parallèle, il suffirait de faire réfléchir un faisceau de lumière parallèle sur une plaque mince pleine, près de laquelle vibrerait normalement la voix. Les vibrations transversales de la plaque, produites par l'action de la parole bien accentuée, donneraient lieu, par la déformation de la surface réfléchissante, à des variations dans l'amplitude du faisceau de rayons lumineux réfléchi, qui seraient accompagnées de vibrations dans son intensité de radiation, sur la surface du sélénium, lesquelles variations agiraient ensuite comme précédemment.

La portée du photophone est limitée par la rotondité de la Terre, ce qui n'a pas lieu pour le téléphone. Mais on pourrait agrandir cette portée, en se servant de miroirs réflecteurs placés de distance en distance, à de certaines hauteurs, sur l'arc terrestre que l'on voudrait parcourir.

40. Cette action que la lumière exerce sur les molécules des corps, par la communication à ces molécules d'une partie de la force vive des atomes éthérés en vibration le long de ses rayons, et au moyen de laquelle s'explique le radiamètre de Crookes et le photophone de Graham Bell, doit donner lieu, dans tous les corps, à des sons, lorsqu'elle est rendue intermittente par intervalles égaux très petits, puisqu'alors les variations de force vive des molécules, sous le choc de la lumière, se succédant à intervalles égaux très petits, constituent ces molécules en mouvement vibratoire, qui, en se propageant dans le corps, engendre un son.

C'est, en effet, ce que Tyndall d'abord, et Graham Bell ensuite, ont vérifié, le premier, sur les gaz et les vapeurs, le second, sur les corps solides et liquides.

L'intermittence régulière, à des intervalles très petits, de la lumière est réalisée au moyen d'un disque mobile autour d'un axe et percé suivant une circonférence de trous espacés régulièrement, sur lequel tombe le faisceau de rayons lumineux.

CHAPITRE IV.

Chaleur.

§ I^{er}. — CHALEUR POTENTIELLE.

41. D'après la manière dont se sont formés les corps, qui consiste dans le groupement d'atomes étherés en mouvement, constituant les molécules pondérables, et ensuite dans l'agrégation de ces molécules, constituant la masse entière des corps, ces atomes et ces molécules, en se groupant et s'agrégeant, ne restent pas immobiles. Les mouvements de translation et de gyration dont étaient animés les atomes et les molécules, lors de leur rapprochement, se transforment, après leur réunion, en d'autres mouvements, de force vive totale égale, de gyration autour de certains axes, et de translation autour de certaines positions moyennes d'équilibre, où, si les atomes et les molécules y étaient immobiles, la somme de leurs forces vives serait nulle. De plus, entre les molécules est emprisonnée une masse d'éther plus ou moins condensée, selon la nature du corps, formant des atmosphères autour de ces molécules, et dont les atomes constitutifs sont aussi en mouvement de translation et de gyration possédant une certaine force vive.

La variation, à partir de cet état d'immobilité idéale des atomes et des molécules, en une région quelconque d'un corps, de la force vive moyenne totale du double mouvement circulatoire et gyrotoire des molécules, de leurs atomes composants, et de l'éther intermoléculaire, constitue l'*énergie calorifique potentielle* du corps, en cette région, qui se manifeste par ce qu'on appelle la *température*.

42. D'après le *principe des forces vives*, cette énergie calorifique est équivalente à la somme du travail des actions atomiques et moléculaires, et du travail extérieur des actions du milieu ambiant sur les atomes et les molécules.

Ces actions sont les forces répulsives, s'exerçant entre les atomes, en vertu de leurs chocs intermittents, les forces répulsives analogues s'exerçant entre les molécules par la même cause, et les forces répulsives s'exerçant entre atomes et molécules.

Le travail des actions atomiques et moléculaires est égal et de signe contraire au travail des *forces d'inertie* correspondantes des atomes et des molécules. C'est ce travail des atomes et des molécules que nous appellerons le *travail intérieur* du corps, dans la région considérée ; et alors le principe des forces vives appliqué aux mouvements atomiques et moléculaires sera formulé ainsi : la somme de l'*énergie calorifique* et du *travail intérieur* d'un corps est équivalente au *travail extérieur*.

Comme les actions atomiques et moléculaires sont des forces répulsives, le travail intérieur des atomes

et des molécules est négatif, lorsque leur distance réciproque augmente, et positif lorsque cette distance diminue.

43. Lorsque, par une influence quelconque, intérieure ou extérieure, l'énergie calorifique augmente ou diminue dans un corps, la loi de sa variation infiniment petite, d'un point à un autre voisin, est celle suivant laquelle la force vive totale d'une molécule se communique, par le choc, aux molécules voisines. Or l'augmentation ou la diminution de force vive du double mouvement d'une molécule, de ses atomes composants et ambiants, doit être accompagnée d'un agrandissement ou d'un rétrécissement de son orbite de circulation et de l'espace qu'elle occupe, donnant lieu à une dilatation ou à une contraction cubique du corps en ce point; elle doit donc avoir pour effet de modifier le mouvement des molécules voisines en augmentant ou diminuant le volume qu'elles occupent et l'amplitude de leur orbite. Il est naturel d'admettre que dans cette transmission de mouvements, la quantité de force vive communiquée, pendant un temps infiniment petit, est proportionnelle à l'excès de la force vive totale de la molécule sur celles des molécules voisines, le coefficient de proportionnalité pouvant varier avec la direction.

La *force vive totale d'une molécule* est la somme de la force vive de son double mouvement de translation et de gyration, et de celle du double mouvement de translation et de gyration de ses atomes constitutifs et des atomes ambiants.

De là résulte l'équation différentielle partielle du second ordre connue de la propagation de la chaleur dans un corps solide, qui comprend, comme cas particulier, celle de l'équilibre permanent. Cette dernière équation est identique à celles qui régissent la variation du *potentiel de masses*, sur un point en dehors d'elles, et la *variation de la dilatation cubique* d'un corps élastique, déformé sous des efforts extérieurs. Cette identité n'est point fortuite, elle tient à ce que, la chaleur étant la force vive d'un mouvement circulatoire et gyratoire équivalente à une énergie potentielle, celle des forces intérieures et extérieures, doit être, dans l'état d'équilibre, soumise aux mêmes lois de variation que le potentiel. D'autre part, la variation de la force vive totale d'une molécule du corps étant accompagnée de la variation de l'espace occupé par cette molécule en mouvement, la chaleur et la dilatation cubique doivent être, dans l'état d'équilibre, régies par la même équation différentielle.

§ II. — CHALEUR RAYONNANTE.

44. Le mouvement circulatoire et gyratoire des molécules et de leurs atomes composants et ambiants, qui donne lieu à l'énergie calorifique, se communique en partie au milieu éthéré qui les entoure. Cet ébranlement y produit des vibrations calorifiques analogues aux vibrations lumineuses, n'en différant que par la *longueur d'onde*, qui est généralement plus grande, se

propageant suivant les mêmes lois, et constituant ce qu'on appelle la *chaleur rayonnante*. C'est cette chaleur qui accompagne les rayons de lumière provenant des corps lumineux.

Lorsqu'un ébranlement se produit en un point de l'éther, il donne lieu à des rayons lumineux, calorifiques, chimiques et phosphorogéniques.

A la rencontre d'un corps *diathermane*, les rayons *calorifiques* se comportent comme les rayons lumineux à la rencontre d'un corps diaphane : ils se réfléchissent, pour une part, à la surface du corps, et continuent, pour l'autre part, à se propager dans l'éther plus condensé qui entoure les molécules, en modifiant leur vitesse de propagation, par suite leur direction et en communiquant en même temps une très faible partie de leur force vive aux molécules, c'est-à-dire en augmentant d'autant l'énergie calorifique potentielle de celles-ci.

A la rencontre d'un corps *athermane*, les rayons *calorifiques* se comportent de la même manière que les rayons lumineux à la rencontre d'un corps opaque : comme ils ne se propagent pas dans l'éther intérieur par voie de rayonnement, la force vive de leur mouvement vibratoire se partage seulement dans le mouvement réfléchi, et dans le mouvement circulatoire et gyrotoire des molécules du corps et de leurs atomes constituants et ambiants ; cette dernière communication de mouvement a pour effet d'augmenter l'énergie calorifique potentielle du corps.

On peut donc dire que la chaleur ne se distingue de

la lumière que dans l'intérieur des corps athermanes. A l'extérieur des corps, et dans les corps diathermanes, elle consiste, comme la lumière dans un certain mouvement vibratoire de l'éther ; mais à l'intérieur des corps athermanes, elle consiste dans un accroissement de force vive ou d'énergie potentielle des molécules pondérables, qui est produit, soit par la communication d'un mouvement vibratoire extérieur de l'éther, soit par une autre action extérieure quelconque exercée sur ces molécules.

En tant que se propageant dans l'éther, elle est soumise aux mêmes lois que la lumière, et en tant que se communiquant aux molécules des corps, elle est soumise aux lois de l'énergie *potentielle*.

Nous avons déjà employé plusieurs fois le mot de *potentielle* appliqué à l'énergie calorifique, sans l'avoir défini. Gauss a désigné par *potentiel* d'une masse infiniment petite dm , sur un point, le rapport $\frac{dm}{r}$ de la masse dm à la distance r de la masse au point, et par $V = \int \frac{dm}{r}$, le *potentiel* d'une somme de masses. Si l'on suppose que la masse dm exerce une action attractive ou répulsive, selon son signe — ou +, sur une masse infiniment petite + 1, située en ce point, proportionnellement aux deux masses et suivant la raison inverse du carré de la distance, l'unité d'action étant celle exercée entre deux masses + 1, à la distance 1, et si les positions du point et de la masse sont exprimées par leur distance (x, y, z) , (x_1, y_1, z_1) à trois

plans coordonnés rectangulaires, les dérivées partielles prises en signe contraire du potentiel

$$\frac{dm}{\sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2}}$$

par rapport à x, y, z représentent les composantes parallèles aux axes coordonnés de l'action attractive ou répulsive de la masse dm sur la masse $+ 1.$; de telle sorte que le potentiel $\frac{dm}{r}$ est égal au travail élémentaire de l'action de la masse dm sur la masse $+ 1.$, ou, d'après le principe des forces vives, à la variation infiniment petite de force vive de la masse $+ 1.$

D'après cela, on voit le lien qui unit une *énergie quelconque* ou une variation de force vive au *potentiel* de Gauss, lorsque les forces qui la produisent suivent la même loi des distances que la gravitation.

On appelle surface de niveau une surface le long de laquelle le potentiel est constant, ou la résultante des forces est normale.

§ III. — PRINCIPES DE THERMODYNAMIQUE.

45. L'état d'un corps libre, en l'une quelconque de ses régions, dépend à la fois : 1° de *la force vive totale moyenne* du mouvement des atomes qui constituent les molécules, du mouvement des molécules, et du mouvement des atomes ambiants ; 2° du *travail intérieur* en cette région. Si l'on désigne par V et W ces deux

énergies, on peut regarder le volume spécifique v , la température t et la pression p du corps en cette région, qui en dépendent, comme de certaines fonctions de V et W ; de telle sorte qu'il existe une relation entre les trois quantités v, t, p , ou que chacune d'elles est une fonction des deux autres.

On ne connaît pas la forme de cette relation, pour un corps quelconque; mais pour les gaz parfaits soumis aux lois de Mariotte et de Gay-Lussac, on peut en avoir l'expression approximative. Car, d'après la loi de Gay-Lussac, tous les gaz ont le même coefficient de dilatation, $\frac{1}{273}$, sensiblement, et ce coefficient est indépendant de la pression; d'après la loi de Mariotte, les volumes d'une même masse de gaz, à la même température, sont en raison inverse des pressions; d'où il résulte la relation

$$v p = v_0 p_0 \left(1 + \frac{t - t_0}{273} \right),$$

v_0 désignant le volume spécifique du gaz à la température t_0 de la glace fondante sous la pression p_0 . (Nous supposons la température t mesurée par le thermomètre à air, le zéro de l'échelle thermométrique restant arbitraire.)

46. Si l'on suppose complètement libre d'action extérieure le corps où se produit l'énergie calorifique, cette énergie, ou la variation de la force vive totale moyenne des molécules du corps, et de leurs atomes constitutifs et ambiants, est égale au *travail intérieur*

pris en signe contraire. Mais si le corps n'est pas libre, c'est-à-dire s'il est soumis à des actions extérieures, la variation de la force vive moléculaire ou l'énergie calorifique est égale à la différence du travail extérieur et du travail intérieur.

Le travail intérieur est inconnu, mais le travail extérieur peut toujours être mesuré ; on le rapporte au travail nécessaire pour élever un kilogramme d'eau à la hauteur de 1 mètre, qui est l'unité de travail appelée *kilogrammètre*.

De la relation entre l'énergie calorifique, le travail intérieur et le travail extérieur, résulte le principe de l'*équivalence* de la chaleur et du travail mécanique. On appelle *équivalent mécanique* de la chaleur le nombre E de kilogrammètres qui équivaut à une *calorie*, c'est-à-dire à la quantité de chaleur nécessaire pour élever de t_0 à $t_0 + 1$ la température de 1 kilogramme d'eau. Par des expériences de M. Joule, sur la chaleur que développe le frottement de deux corps l'un contre l'autre, de M. Hirn, sur le travail accompli par la communication d'une certaine quantité de chaleur dans une machine à vapeur à condensation, cet équivalent a été trouvé, en moyenne, égal à 425 ; c'est le nombre qu'avait déterminé, avant eux, le docteur Meyer, en se fondant sur la différence des chaleurs spécifiques des gaz sous pression constante, et à volume constant, comme nous le verrons plus loin.

47. La différence des travaux extérieur et intérieur augmentant ou diminuant, l'énergie calorifique augmente ou diminue de la même quantité. Et si le tra-

vail intérieur est constant, l'énergie calorifique augmente ou diminue de la quantité dont augmente ou diminue le travail extérieur. Il se fait comme un échange de chaleur et de travail mécanique extérieur, qui constitue le principe de la *transformation mécanique* de la chaleur. C'est ce qui a lieu lorsqu'un corps, après avoir été soumis à des actions extérieures qui font varier d'une manière quelconque sa force vive moléculaire, revient à son état primitif. Comme les atomes et les molécules reprennent leurs positions initiales, la variation du travail intérieur, dans cette période de transformation, est nulle ; par suite la variation d'énergie calorifique, ou la quantité de chaleur absorbée ou dégagée par le corps, est équivalente à la quantité de travail extérieur accompli ou reçu par ce corps.

C'est là le principe servant de base aux machines thermiques, qui transforment la chaleur en travail ou, inversement, le travail en chaleur.

48. Dans le changement d'état physique des corps, c'est-à-dire dans leur passage de l'état solide à l'état liquide, de l'état liquide à l'état gazeux, et *vice versâ*, le travail intérieur des molécules subit une variation brusque considérable, qui représente ce qu'on appelle la *chaleur latente* absorbée ou dégagée, suivant le sens du changement. Comme la même énergie calorifique se maintient dans le corps, puisque la température reste constante pendant la transformation, et que le travail intérieur augmente ou diminue, le corps doit recevoir ou accomplir un travail extérieur égal à la

variation du travail intérieur, ou bien absorber ou dégager une quantité de chaleur équivalente.

49. Dans le changement d'état chimique, il y a à considérer le cas de la décomposition d'un corps composé, celui de la combinaison de deux ou plusieurs corps simples mis en présence, et celui de l'action de deux ou plusieurs corps composés l'un sur l'autre. Dans le premier cas, la séparation des molécules de nature différente, qui ont été unies, dans leur rencontre, par l'affinité de leurs figures géométriques et de leurs mouvements, et ont ensuite formé, sous la pression de l'éther ambiant, une molécule composée, est accompagnée d'un travail intérieur négatif considérable, auquel doit correspondre une augmentation équivalente d'énergie calorifique, si le travail extérieur est nul ou constant; de telle sorte que la décomposition d'un corps, pour se produire dans ces conditions, exige une *absorption* considérable de chaleur.

Il en résulte que la recombinaison de ses éléments, qui est la transformation inverse, *dégage* cette même quantité de chaleur.

Dans le troisième cas, où les molécules complexes de deux ou plusieurs corps viennent se mêler et se choquer entre elles, et où le choc, dû à des actions extérieures, désagrègeant en quelque sorte leurs assemblages, donne lieu à d'autres affinités de forme et de mouvement plus puissantes, et, par suite à d'autres modes de groupement des molécules simples, le travail intérieur est lui-même complexe; la séparation de certains éléments correspond à un travail négatif, la réu-

nion d'autres éléments correspond à un travail intérieur positif ; par conséquent, l'énergie calorifique augmente ou diminue suivant que le travail intégral est négatif ou positif ; et le phénomène chimique est accompagné d'une absorption ou d'un dégagement de chaleur.

L'absorption ou le dégagement de chaleur qui se produisent dans les réactions chimiques sont dues à un travail négatif ou positif des molécules des corps simples en présence qui se désagrègent ou s'agrègent. Quand la réaction a pour résultat la substitution d'un métal à un autre dans une solution saline, comme le travail intérieur ne s'accomplit que dans la base du sel, la chaleur dégagée pour un même métal est la même quel que soit l'acide. C'est ce qui a été constaté récemment par M. Tommasi.

La chaleur rayonnante et la lumière du soleil, qui sont dues à des mouvements de la matière éthérée de son atmosphère, se propageant dans tous les sens autour de sa surface, sont entretenues par l'énergie calorifique qu'y dégagent les combinaisons chimiques des molécules des corps qui émanent continuellement de sa masse et se répandent dans son atmosphère, et en même temps par la force vive qu'y apportent incessamment les innombrables météorites, répandus dans l'espace planétaire, qui, en gravitant vers lui, viennent rencontrer et choquer sa surface.

Il n'est pas possible d'admettre cette autre explication de l'alimentation du soleil qu'a proposée récemment M. Siemens.

Ce physicien, ayant constaté par l'expérience que,

lorsque la lumière du soleil agit sur le mélange gazeux de notre atmosphère, réduit à un degré extrême de raréfaction, à une basse température, elle dissocie ses éléments et forme des hydrocarbures aux dépens de la vapeur d'eau et de l'acide carbonique qu'il renferme, a cru pouvoir tirer de là une explication de l'alimentation du soleil. Il admet que l'espace éthéré est rempli de cette matière raréfiée, que les rayons du soleil la dissocient en formant des hydrocarbures combustibles, et que ces matériaux pondérables sont ensuite attirés par lui dans sa masse superficielle, où ils subissent une combustion qui développe de la chaleur et répare ainsi les pertes qu'il fait par une émission continuelle.

Cette explication est inadmissible, parce que cette matière raréfiée qui, selon ce physicien, remplirait l'espace éthéré, fût-elle réduite à $\frac{1}{2000}$ d'atmosphère, comme il le suppose, produirait par sa résistance aux mouvements des corps célestes, des perturbations qui, avec le temps, prenant des proportions considérables troubleraient l'équilibre du système solaire ; contrairement à l'observation astronomique, qui ne constate aucune trace de ces perturbations produites par la résistance d'un milieu pondérable.

50. Le principe des forces vives, appliqué aux systèmes atomiques et moléculaires, peut s'exprimer sous la forme

$$\Delta V + \Delta W = \Delta Te,$$

où V désigne l'énergie calorifique, W le *travail inté-*

rieur, T_e le travail des forces extérieures, Δ étant le symbole des différences ; et, si l'on pose $V + W = U$, cette formule devient

$$\Delta U = \Delta T_e,$$

la quantité U étant dite l'énergie intérieure du corps.

Lorsqu'il s'introduit dans ce corps une énergie calorifique équivalente à Q calories, son énergie intérieure est augmentée d'autant, et on a

$$\Delta U = \Delta T_e + E Q,$$

$$\text{ou } Q = \frac{1}{E} (\Delta U - \Delta T_e) = A (\Delta U - \Delta T_e).$$

Cette formule, appliquée à une transformation infiniment petite du corps, prend la forme

$$d Q = A (d U - d T_e),$$

qui, dans le cas où le travail des forces extérieures est celui d'une pression constante p exercée uniformément sur la surface du corps transformé de volume v , devient

$$(I) \quad d Q = A (d U + p d v),$$

ou, si U est regardé comme une fonction de p et v ,

$$d Q = A \left(\frac{d U}{d p} d p + \left(\frac{d U}{d v} + p \right) d v \right),$$

ou, si U est fonction de v et t ,

$$d Q = A \left(\left(\frac{d U}{d v} + p \right) d v + \frac{d U}{d t} d t \right),$$

ou, si U est fonction de p et t ,

$$dQ = A \left(\left(\frac{dU}{dp} + p \frac{dv}{dp} \right) dp + \left(\frac{dU}{dt} + p \frac{dv}{dt} \right) dt \right),$$

expressions de dQ qui ne sont point des différentielles exactes, comme on s'en assure aisément.

Cette formule (I) traduit l'un des deux principes fondamentaux de la théorie mécanique de la chaleur.

51. Le second principe fondamental consiste en ce que la fonction λ qui rend la valeur de $\frac{dQ}{\lambda}$ une différentielle exacte est une fonction de la température seule, la même pour tous les corps, et qu'on peut supposer servir de mesure à leur température absolue ; c'est-à-dire, qu'en regardant T comme l'expression de la température absolue, on a l'équation

$$(II) \quad \frac{dQ}{T} = d\mu,$$

μ étant une fonction déterminée de deux des variables p , v , T , quand l'une d'elles est exprimée au moyen des deux autres.

52. Ce principe résulte, pour les gaz parfaits, de leur propriété, déduite de l'expérience, d'avoir une énergie intérieure U dépendant uniquement de leur température.

Gay-Lussac et M. Joule après lui ont, en effet, constaté que lorsque deux ballons de capacité égale, réunis par un tube à robinet, sont l'un rempli d'un gaz, l'autre vide d'air et de gaz, si on les fait commu-

niquer entre eux, le gaz du ballon plein se précipite dans le ballon vide en effectuant un certain travail intérieur, sans aucun travail extérieur, de manière à se partager également entre les deux ballons ; que, par cette transformation, la température s'abaisse d'autant dans le premier qu'elle s'élève dans le second, de telle sorte que le système des deux ballons ne reçoit du dehors et n'y communique aucune chaleur, et que dès lors la température du système, après la transformation, est la même qu'avant.

En vertu de la formule

$$Q = A (\Delta U - \Delta T_e),$$

comme ici, $Q = 0$ et $\Delta T_e = 0$, on a $\Delta U = 0$; or généralement U dépend du volume v et de la température t ; mais dans cette transformation v seul a varié, et U est resté constant ; donc U ne dépend que de la température.

L'équation (I) prise sous la forme

$$dQ = A \left(\left(\frac{dU}{dv} + p \right) dv + \frac{dU}{dt} dt \right),$$

ou $dQ = c dt + l dv$,

donne alors, puisque $\frac{dU}{dv} = 0$, pour la chaleur spécifique c à volume constant,

$$c = A \frac{dU}{dt},$$

ou une fonction de t seul, et pour l ,

$$l = A p.$$

Cette même équation, prise sous la forme

$$d Q = A \left(\frac{d U}{d t} + p \frac{d v}{d t} \right) d t + A \left(\frac{d U}{d p} + p \frac{d v}{d p} \right) d p,$$

ou
$$d Q = C d t + h d p,$$

donne pour la chaleur spécifique C sous pression constante,

$$C = A \left(\frac{d U}{d t} + p \frac{d v}{d t} \right), \text{ ou,}$$

en vertu de la formule $p v = p_0 v_0 \left(1 + \frac{t - t_0}{273} \right),$

$$C = A \left(\frac{d U}{d t} + \frac{1}{273} p_0 v_0 \right),$$

ou une fonction de t seul, et pour h ,

$$h = - A v.$$

(On en déduit

$$C - c = A \cdot \frac{1}{273} p_0 v_0 \quad \text{ou}$$

$$\frac{C - c}{v_0} = A \cdot \frac{1}{273} \cdot p_0$$

formule au moyen de laquelle on peut déterminer

l'équivalent mécanique de la chaleur $E = \frac{1}{A}$: c'est la méthode employée par Meyer.)

Alors on peut écrire

$$dQ = c dt + A p dv \quad \text{ou}$$

$$dQ = c dt + A \cdot \frac{1}{273} p_0 v_0 (273 + t - t_0) \frac{dv}{v}$$

d'où

$$\frac{dQ}{273 + t - t_0} = \frac{c}{273 + t - t_0} dt + A \frac{1}{273} p_0 v_0 \frac{dv}{v}.$$

Le second membre est une *différentielle exacte*, puisque c est une fonction de t seul.

On arriverait à un résultat analogue en prenant, comme variables indépendantes, soit t et p , soit p et v .

Ainsi, pour tous les gaz parfaits, il y a une valeur de λ , fonction de t seulement, de la forme $273 + t - t_0$ qui rend la valeur de $\frac{dQ}{\lambda}$ une différentielle exacte

d'une certaine fonction μ de deux des quantités t, v, p , prises pour variables indépendantes.

Comme tous les gaz, par des compressions très fortes et des abaissements considérables de température, peuvent être amenés successivement à l'état liquide et à l'état solide, et comme inversement tous les corps solides et liquides, par des températures élevées, sous de basses pressions, peuvent être réduits à l'état de gaz, il est permis, pour la raison de conti-

nuité, d'étendre cette propriété à tous les corps, soit solides, soit liquides, soit gazeux.

Si l'on prend, pour le 0 de l'échelle de la température absolue T, le degré $- 273^{\circ}$ du thermomètre centigrade à air, dont le 0 correspond à la température de la glace fondante, on a $273 + t - t_0 = T$; et par suite la formule

$$(II) \frac{dQ}{T} = d\mu.$$

53. Lorsque la transformation s'accomplit à une température constante, on a, pour le passage d'un état (1) à un état (2),

$$\frac{Q}{T} = \mu_2 - \mu_1.$$

Pour un *cycle* de Carnot, qui est formé de deux lignes isothermes de températures t_2, t_1 , comprises entre deux lignes μ_2, μ_1 de nulle transmission de chaleur, on en déduit

$$\frac{Q_2}{T_2} = \frac{Q_1}{T_1} = \mu_2 - \mu_1, \quad \text{d'où} \quad \frac{Q_2 - Q_1}{Q_2} = \frac{T_2 - T_1}{T_2}.$$

C'est là l'expression du *théorème* dit *de Carnot*, qui consiste en ce que le rapport de la quantité de chaleur transformée, le long du cycle, en travail extérieur, à la quantité de chaleur puisée à une source de température supérieure T_2 , est constant, pour *tous* les cycles de même nature, et pour *tous* les corps transformés, et est égal au rapport de la différence des

températures absolues T_2 , T_1 , à celle T_2 qui est la plus élevée.

54. L'expérience indique que la chaleur spécifique C , sous pression constante, est indépendante de la température t elle-même, et que c'est une constante pour chaque gaz. Comme d'ailleurs $C - c$ est aussi, d'après l'expérience, une constante pour chaque gaz, il en résulte que c est aussi une constante. Dès lors l'équation $\frac{dQ}{T} = \frac{c}{T} dT + (C - c) \frac{dv}{v}$, par l'intégration de son second membre, peut se mettre sous la forme

$$\frac{dQ}{T} = d \cdot \log B T^c v^{C-c},$$

ou, si l'on remplace T par $\frac{p v}{\frac{1}{273} p_0 v_0}$,

$$\frac{dQ}{T} = d \cdot \log \frac{B}{\frac{1}{273} p_0 v_0} p^c v^C;$$

d'où il résulte que, quand $dQ = 0$, on a $p^c v^C =$ constante; c'est le *théorème de Poisson*.

De l'équation $c = A \frac{dU}{dt}$, on déduit par l'intégration $U = U_0 + E c (t - t_0)$, c'est-à-dire que la variation de l'énergie intérieure d'un gaz est proportionnelle à la variation de la température.

CHAPITRE V.

Electricité statique et dynamique.

§ I^{er}. — ELECTROSTATIQUE.

55. Les molécules des corps, comme leurs atomes constituants, ne se touchent que par instants, lors des chocs auxquels donnent lieu leurs mouvements ; elles sont séparées par des intervalles comparables à leur étendue et qui renferment des atomes sphériques d'éther. Ces atomes, se pressant autour d'elles, y forment des sortes d'*atmosphères* plus ou moins condensées, suivant la nature du corps, dont la densité va décroissant à partir de leur surface.

La variation de condensation moyenne de ces atmosphères, produite par des actions extérieures qui viennent modifier les rapports de position des molécules voisines entre elles, et, par suite, l'intensité de leurs chocs réciproques, donne lieu aux phénomènes d'*électricité statique*.

Pour une certaine condensation moyenne de ces couches éthérées, le corps est dit à l'état *neutre* ; pour une condensation plus grande, en certains points, il y est dit électrisé *positivement*, et pour une condensation moindre, il y est dit électrisé *négativement* ; en d'au-

très termes, dans le premier cas, le fluide éthéré des atmosphères est neutre ; dans le second, il est, par rapport à l'état neutre, à l'état excédent ou positif ; dans le troisième, à l'état déficient ou négatif. L'excès positif ou négatif de la masse *électrisée* sur la masse neutre, en chaque point, constitue ce qu'on appelle le *fluide électrique* ou l'*électricité libre*, positive ou négative.

56. Deux masses infiniment petites, l'une de matière pondérable, l'autre d'éther condensé, s'attirent, et deux masses d'éther condensé se repoussent, proportionnellement aux masses et en raison inverse du carré de la distance ; car, dans le premier cas, le phénomène est le même que celui de la gravitation entre deux molécules ; la force attractive produite s'ajoute à la gravitation ; et dans le second, comme les deux masses condensées d'éther ont une plus grande élasticité que l'éther ambiant, l'obstacle que leur présence, en regard l'une de l'autre, met aux chocs des atomes éthérés qui se meuvent entre elles, est plus que contrebalancé par cet excès d'élasticité, qui a pour effet d'augmenter considérablement la vitesse des atomes se mouvant entre leurs faces intérieures ; par suite, la pression qu'ils exercent sur ces faces l'emporte sur la pression qui a lieu le long des faces extérieures ; ce qui produit une répulsion au lieu d'une attraction. Cette répulsion diminue la gravitation.

Si on considère deux molécules pondérables m, m' entourées respectivement de deux masses $k m + \mu, k m' + \mu'$ d'éther condensé, leur attraction réciproque

égale à $\frac{f' m m'}{r^2} + \frac{f'' (k m + \mu) m'}{r^2} + \frac{f' (k m' + \mu') m}{r^2}$
 — $\frac{f'' (k m + \mu) (k m' + \mu')}{r^2}$, se réduisant à

$$\left(f + \frac{f'^2}{f''} \right) \frac{m m'}{r} - \frac{f'' \mu \mu'}{r^2},$$

lorsqu'on suppose $k = \frac{f'}{f''}$, (condition nécessaire pour assurer la neutralité des masses $k m$, $k m'$ d'éther condensé autour des molécules m , m' , puisque la masse m de la molécule doit exercer, sur une masse étherée + 1 une action attractive $\frac{f' m}{r^2}$, égale à l'action répulsive $\frac{f'' k m}{r^2}$ exercée sur la même masse étherée + 1 par la masse étherée $k m$), on en déduit que deux masses infiniment petites μ , μ' , d'électricité libre, sur deux molécules matérielles, s'attirent ou se repoussent proportionnellement à leurs quantités et en raison inverse du carré de leur distance, suivant qu'elles sont de signe contraire ou de même signe. C'est la loi de Coulomb, qui est la base de l'électrostatique.

57. A l'énergie calorifique d'un corps, qui est due à la force vive du mouvement circulatoire et gyrotoire des molécules et de leurs atomes constituants et ambiants, s'ajoute l'énergie lumineuse, lorsque ce mouvement devient assez intense pour ébranler l'éther qui remplit les interstices moléculaires

L'augmentation d'énergie calorifique d'un corps est

produite par plusieurs causes : 1° l'absorption de la chaleur reçue du dehors par voie de conductibilité et de rayonnement, de la part de corps en contact, ou par voie de rayonnement seulement, de la part de corps qui ne le touchent pas ; 2° un travail mécanique extérieur exercé sur le corps, comme celui qu'engendrent le frottement et le choc d'un autre corps ; 3° une action chimique, comme la combustion ; 4° une action électrique, comme le travail exercé sur ses molécules par le passage d'un courant électrique, ainsi que nous le verrons plus loin.

L'énergie lumineuse, qui est la force vive du mouvement vibratoire de l'éther, a pour source ordinaire l'ébranlement considérable produit dans l'éther intermoléculaire des corps par un accroissement énorme de chaleur qui fait de ces corps à la fois des foyers de chaleur et des foyers de lumière.

A l'énergie calorifique et à l'énergie lumineuse se joint aussi une autre énergie, l'énergie électrique, lorsque le mouvement moléculaire, modifiant, par les chocs des molécules entre elles, l'état de condensation des atmosphères éthérées qui les entourent donne lieu au développement des fluides électriques libres.

L'énergie électrique consiste dans le travail des forces d'attraction et de répulsion des masses électriques. Le travail élémentaire de deux masses $d\mu$, $d\mu'$ a pour expression $dT = \frac{\Sigma f d\mu d\mu'}{r^2} dr$ ou $-d \frac{\Sigma f d\mu d\mu'}{r}$, le symbole Σ s'appliquant à toutes les combinaisons des masses $d\mu$, $d\mu'$ deux à deux. Si l'on pose $\frac{\Sigma d\mu d\mu'}{r} = W$

on a $d T = - d W$; et si le système des masses électriques passe de l'état 1 à l'état 2, le travail total des forces électriques est $T = W_1 - W_2$. La valeur de la fonction W , dans un état quelconque du système, est le travail que développeraient les forces électriques, si le système revenait à l'état neutre, puisqu'on aurait dans ce cas $W_2 = 0$. C'est l'énergie électrique latente du système électrisé.

Lorsqu'on développe de l'électricité sur des conducteurs, comme dans la charge d'une machine électrique, d'un condensateur, d'une bouteille de Leyde, d'une batterie électrique, on transforme une certaine quantité de travail mécanique en une quantité égale d'énergie électrique et d'énergie calorifique; réciproquement, dans la décharge d'une batterie, une certaine quantité d'énergie électrique se transforme en une quantité égale de travail mécanique et d'énergie calorifique.

58. V désignant le *potentiel* $\frac{\Sigma d \mu}{r}$ d'un système de masses électriques sur un point, on reconnaît facilement que W est égale à $\frac{1}{2} \Sigma V d \mu$, c'est-à-dire que l'énergie électrique est la moitié du potentiel total des masses électriques sur leurs différents points.

Si l'on considère un système de corps conducteurs A , B , C , . . . sur lesquels sont répandues des charges électriques Q_1 , Q_2 , Q_3 , . . . , l'équilibre électrique étant établi, ces charges sont distribuées en couches infiniment minces, sur les surfaces de ces conducteurs, leur intérieur étant à l'état neutre, de telle façon que le poten-

tiel V a une valeur constante dans chacun des corps, différente de l'un à l'autre. En effet, si le potentiel V avait une valeur variable dans l'un d'eux, une masse m d'électricité libre située dans le corps serait sollicitée par une force égale à $-m \frac{dV}{dn}$, et se mouvrait dans la direction de cette force ; par suite, les deux quantités $+m$ et $-m$ d'électricités contraires qui forment une masse infiniment petite de fluide neutre, étant sollicitées par deux forces égales et contraires, se mouvraient en sens opposés et le fluide neutre serait décomposé ; ce qui résulte de cette propriété du potentiel électrique V , que, lorsqu'il est exprimé en fonction des coordonnées x, y, z d'un point, ses dérivées premières $\frac{dV}{dx}, \frac{dV}{dy}, \frac{dV}{dz}$, prises en signe contraire, représentent les composantes parallèles aux axes de coordonnées de l'action exercée par l'ensemble des masses électriques d'un système sur une masse $+1$, qui serait située en ce point ; de plus, les dérivées secondes de V , $\frac{d^2V}{dx^2}, \frac{d^2V}{dy^2}, \frac{d^2V}{dz^2}$, ayant une somme égale à $-4\pi k$, où k désigne la densité du fluide électrique au point x, y, z ; comme V est constant, ces dérivées secondes sont nulles, et, par suite, $k = 0$.

On a alors pour le système de conducteurs

$$W = \frac{1}{2} (V_1 Q_1 + V_2 Q_2 + V_3 Q_3 + \dots).$$

Il en résulte que si l'un des corps est resté complè-

tement isolé pendant la charge du système, et par conséquent n'a été électrisé que par influence, comme il contient alors des quantités égales d'électricité positive et d'électricité négative, la charge Q est nulle, et par suite est nul aussi le terme correspondant $V Q$ de l'énergie W .

De même pour un corps qui communique avec le sol, le potentiel constant V étant nul, et la charge Q finie, le terme correspondant de l'énergie électrique est nul.

59. Dans une bouteille de Leyde dont l'armature intérieure communique avec une source d'électricité de potentiel V_1 et l'armature extérieure avec le sol, lorsqu'elle est chargée à refus, l'armature intérieure prend le même potentiel V_1 que la source, en se chargeant d'une quantité Q_1 d'électricité, l'armature extérieure a un potentiel V_2 nul, et une charge égale à $-Q_1$ d'électricité contraire. La bouteille ayant un potentiel nul à sa surface extérieure, a son potentiel nul en tout point de l'espace extérieur, et par suite n'exerce aucune action sur les corps conducteurs environnants. Cependant elle renferme une quantité d'énergie électrique latente

$W = \frac{1}{2} V_1 Q_1$. Si l'on désigne par k_1 la densité d'une

couche électrique, de potentiel constant V_1 , et par dn l'élément de normale extérieure à cette couche, on a

$k_1 = - \frac{1}{4 \pi} \frac{dV}{dn}$, comme on le reconnaît aisément en

évaluant l'action d'une couche, d'épaisseur infiniment petite ϵ , sur un point de masse $+1$ de sa surface extérieure. On trouve, en effet, cette action égale à $4 \pi \epsilon$,

ou $4 \pi k$, la densité d'une couche infiniment mince en chaque point étant mesurée par son épaisseur ; et elle est, d'autre part, représentée par $-\frac{dV}{dn}$.

Par suite, dans le cas actuel, où l'on peut prendre pour dn l'épaisseur e du verre de la bouteille et pour dV , $0 - V_2$, on a $k_1 = \frac{V_1}{4 \pi e}$; si S_1 désigne la surface de la couche, comme $Q_1 = S_1 k_1$, on a

$$Q_1 = \frac{V_1 S_1}{4 \pi e}$$

d'où, en posant $\frac{4 \pi e}{S_1} = \lambda$, quantité constante pour une même bouteille,

$$V_1 = \lambda Q_1, \text{ et}$$

$$W = \frac{1}{2} \lambda Q_1^2,$$

formule qui montre que l'énergie électrique d'une bouteille de Leyde est proportionnelle au carré de sa charge.

Cette énergie latente se manifeste lorsqu'on réunit les deux armatures par un excitateur. La bouteille se décharge instantanément, en produisant une quantité de travail égale à $\frac{1}{2} \lambda Q_1^2$ qui se traduit par une étincelle électrique et par un échauffement du fil de communication. C'est-à-dire qu'une partie de l'énergie

électrique de la bouteille est employée à vaincre la résistance de l'air, ce qui donne lieu à l'étincelle, et que le reste en est transformé en énergie calorifique.

Quand le fil de communication est gros et court, l'étincelle est considérable et l'échauffement du conducteur très faible. Quand le fil est long et fin, l'étincelle est faible, mais le fil s'échauffe davantage.

60. Pour une batterie électrique formée de n bouteilles identiques, qui sont chargées séparément avec une même source de potentiel V_1 , la charge totale Q_1 est la même que si elle avait été mise directement en relation avec la source, et l'énergie électrique est encore donnée par la formule $W = \frac{1}{2} V_1 Q_1$, c'est-à-dire qu'elle est équivalente à celle d'une bouteille unique de même épaisseur dont la surface serait n fois plus grande que la surface de chacune des n bouteilles.

60. Pour plusieurs batteries réunies en *cascade*, c'est-à-dire disposées en file de telle sorte que l'armature extérieure de chacune d'elles communique avec l'armature intérieure de la suivante, l'armature extérieure de la dernière communiquant avec le sol et l'armature intérieure de la première avec une source de potentiel V_1 , on a encore $W = \frac{1}{2} V_1 Q_1$, Q_1 étant la charge de la première batterie ; et comme alors

$$V_1 = \lambda \left(\frac{Q_1}{n_1} + \frac{Q_1}{n_2} + \frac{Q_1}{n_3} + \dots + \frac{Q_1}{n_K} \right),$$

n_1, n_2, \dots, n_K étant les nombres de bouteilles des dif-

férentes batteries, l'énergie électrique W est donnée par la formule

$$W = \frac{1}{2} \lambda Q_1^2 \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} + \frac{1}{n_3} + \dots + \frac{1}{n_K} \right)$$

Tel est le travail qu'il faut dépenser pour charger l'ensemble des batteries, ou l'énergie calorifique qui se dégage dans le fil de communication pendant la décharge, jointe au travail extérieur qui produit l'étincelle.

§ II. — ELECTRO-DYNAMIQUE.

62. Si l'on considère un corps conducteur de l'électricité, c'est-à-dire permettant au fluide éthéré condensé qui entoure ses molécules, comme des atmosphères, de se mouvoir entre elles, et qu'on le suppose soumis à l'influence de masses électriques fixes ou en mouvement, le potentiel de ces masses $\Sigma \frac{d_\mu}{r}$ ou V a généralement une valeur variable d'un point à l'autre du corps. Dès lors, le fluide éthéré neutre qui entoure chaque molécule pondérable ne peut y rester en repos ; car, si l'on regarde une molécule de fluide neutre comme formée de deux masses égales et de signe contraire de fluide libre, l'unité de masse du fluide positif recevra de ces masses extérieures une action normale à la surface de niveau correspondante, représentée

par $-\frac{dV}{dn}$, où dn est la portion de normale comprise entre deux surfaces de niveau infiniment voisines (V) et ($V + dV$), qui est dirigée du côté où le potentiel V diminue.

L'expérience apprend que, dès que cette force cesse d'agir, c'est-à-dire aussitôt que le potentiel devient constant, le mouvement du fluide s'arrête instantanément ; ce qui montre que la résistance opposée à ce mouvement par le milieu pondérable est très considérable ; ce mouvement donne lieu à la production d'un *travail intérieur* négatif qui a pour effet d'accroître la force vive des mouvements moléculaires, c'est-à-dire de développer de la chaleur. — Il en résulte que la variation de la force vive du mouvement du fluide, pendant un temps très petit, est insensible, et que la résistance du milieu, qui est de direction contraire à celle de la vitesse du fluide, est sensiblement elle-même de direction contraire à celle de la force électro-motrice, par conséquent, que la vitesse a sensiblement le même sens que cette force, et que la masse fluide décrit dans le conducteur une trajectoire sensiblement orthogonale aux surfaces de niveau. Comme le mouvement sur la surface du conducteur doit s'effectuer le long de cette surface, elle coupe sensiblement à angle droit toutes les surfaces de niveau.

La quantité de fluide qui traverse, pendant l'unité de temps, un élément $d\omega$ d'une surface de niveau, est regardée comme proportionnelle à la force électro-motrice en ce point. En la désignant par di , on a

$d i = - k \frac{d V}{d n} d \omega$, où k est une constante. C'est la loi de Ohm.

63. Ce mouvement du fluide éthéré à travers les surfaces de niveau constitue ce qu'on appelle un *courant électrique*, et la quantité $d i$ relative à la section $d \omega$ mesure l'intensité du courant en ce point. Elle est proportionnelle à la vitesse.

Si l'on suppose le courant de vitesse ou d'intensité égal d'un point à l'autre, le fluide en mouvement reste à l'état neutre. Cela résulte de l'hypothèse de la proportionnalité de l'intensité du courant à la force électromotrice, et de cette propriété du potentiel que le long d'une surface fermée quelconque, l'intégrale $-\frac{1}{4 \pi} \int \int \frac{d V}{d n} d \omega$ est égale à la quantité de *fluide libre* contenue dans l'intérieur de cette surface ; car si l'on considère le canal infiniment petit orthogonal aux surfaces de niveau, compris entre deux de ces surfaces, on voit que cette intégrale est *nulle* pour toute l'étendue de ses parois.

Pour démontrer la formule $-\frac{1}{4 \pi} \int \int \frac{d V}{d n} d \omega = q$, dans laquelle V désigne le potentiel, sur un point d'une masse électrique q répandue dans l'intérieur d'une surface fermée S , $d \omega$ un élément de cette surface, $d n$ l'élément de la normale, il suffit de considérer l'action de la masse électrique $d q$ sur une masse électrique $+ 1$, en un point de la surface. Sa composante suivant la normale extérieure à la surface

est égale à $\frac{dq \cos u}{r^2}$, u désignant l'angle que forme cette normale avec la ligne joignant le point de la surface au point dq . Si l'on représente par $d\sigma$ l'ouverture du cône ayant pour sommet dq et pour base $d\omega$, on a $-d\omega \cos u = r^2 d\sigma$, d'où $-\frac{dq \cos u d\omega}{r^2} = dq d\sigma$.

L'intégration le long de la surface S donne $4\pi dq$; ensuite l'intégration dans toute la masse q donne $4\pi q$. Comme V décroît vers l'intérieur de la surface, $-\frac{dV}{dn}$ est la composante suivant la normale extérieure de l'action de la masse q sur la masse $+1$ de l'élément $d\omega$; on a donc $-\int \int \frac{dV}{dn} d\omega = 4\pi q$.

Il n'y a donc pas de fluide libre à l'intérieur du conducteur. Il s'ensuit que l'électricité *libre* nécessaire à la production du potentiel doit être située à la surface même du conducteur ou à son extérieur. Quand elle est tout entière sur la surface du conducteur, ce qui est le cas des piles productrices d'électricité, elle y est nécessairement en mouvement, puisque le potentiel n'y est pas constant. Mais sa masse doit être très petite par rapport à la masse fluide qui est en mouvement dans l'intérieur du conducteur; et son mouvement, d'ailleurs sans doute peu rapide, est négligeable par rapport à celui du courant intérieur.

La résistance opposée en un point par le conducteur au mouvement du fluide est proportionnelle à la vitesse u du courant en ce point; car en représentant par

$m \varphi(u)$ la résistance qui s'exerce sur une masse m positive de fluide, comme elle est à peu près égale et opposée à la force électro-motrice $-m \frac{dV}{dn}$, on a

$$\varphi(u) = - \frac{dV}{dn},$$

et, d'autre part, si l'on désigne par ρ la densité du fluide neutre, la quantité qui traverse l'élément de surface $d\omega$ pendant l'unité de temps est $di = \epsilon u d\omega$; par suite, d'après la loi de Ohm, $-\frac{dV}{dn} = \frac{\epsilon}{k} u$; d'où $\varphi(u) = \frac{\epsilon}{k} u$.

On emploie ordinairement des conducteurs de forme allongée et de section très petite. Dans ce cas la section normale ω du conducteur peut être regardée comme un élément d'une surface de niveau. En appelant i l'intensité du courant, on a

$$i = -k \frac{dV}{dn} \omega, \text{ ou } \frac{dV}{dn} = - \frac{i}{k\omega}.$$

Si la section ω du fil conducteur est constante, on en déduit par l'intégration, $V_1 - V_2 = \frac{i}{k\omega} l$, l étant la longueur du fil entre les points 1 et 2, dans le sens du courant, ou $i = \frac{V_1 - V_2}{\left(\frac{l}{k\omega}\right)}$. La différence

$V^1 - V^2$ des valeurs du potentiel aux deux extrémités du fil, lorsqu'elles se rapprochent pour former le circuit, représente la *force électro-motrice du courant entier*, et la quantité constante $\frac{l}{k\omega}$ est la *résistance du*

conducteur. En la désignant par λ , on a $i = \frac{V_1 - V_2}{\lambda}$.

Lorsque la section est variable, on a la même formule, en posant $\int \frac{l}{k\omega} = \lambda$.

Pendant un temps infiniment petit dt , une molécule électrique de masse dq , parcourant un élément dn normal à une surface de niveau, le travail élémentaire de la force électro-motrice qui agit sur cette masse est $- dq \frac{dV}{dn} dn = - dq dV$, et le travail total du point A au point B est $dq (V_1 - V_2)$, V_1 et V_2 étant les valeurs du potentiel en A et B. De là résulte l'expression du travail effectué pendant un temps infiniment petit dt par les forces électro-motrices qui agissent sur la masse électrique totale comprise entre deux surfaces de niveau $abcd$, du conducteur. En effet, au bout du temps dt , cette masse $\overline{ab} \overline{cd}$ vient en $a'b'c'd'$; une molécule quelconque dq parcourant un petit arc mm' . Le travail élémentaire de la force qui agit sur cette molécule est $dq (V - V')$, V et V' étant les valeurs du potentiel aux points m et m' . Pour la masse entière le travail est $dT = \int dq (V - V')$ ou $\int V dq - \int V' dq$. Comme V est la valeur du potentiel au point où se trouve une molécule électrique dq au temps t , V' la valeur du potentiel au point où se trouve la même molécule au temps $t + dt$, la première intégrale s'étend à l'espace $abcd$, la seconde à l'espace $a'b'c'd'$. Le potentiel étant indépendant du temps, les termes qui se rapportent à la partie commune $a'b'cd$ sont égaux ;

par suite on peut borner la première au volume infiniment petit $a b a' b'$, la seconde au volume $c d c' d'$, où le potentiel a des valeurs sensiblement constantes V_1 , V_2 , et l'on a pour les intégrales $V_1 \int d q$, $V_2 \int d q$, le signe d'intégration s'appliquant aux masses égales $i d t$ comprises dans ces deux volumes infiniment petits.

Par suite $d T = (V_1 - V_2) i d t$, et le travail, pendant l'unité de temps,

$$T = (V_1 - V_2) i.$$

D'après le principe général des forces vives, la variation de force vive de la masse électrique considérée $a b c d$, pendant le temps $d t$, est égale au travail $d T$ des forces électro-motrices, moins le travail extérieur accompli. Or, ce travail extérieur consiste en une certaine quantité d'énergie calorifique communiquée aux molécules du conducteur, moins le *travail intérieur* du conducteur, si celui-ci éprouve quelque changement d'état ou une transformation chimique, plus enfin le travail mécanique extérieur proprement dit, si les pièces du conducteur sont mobiles et accomplissent un travail extérieur. En supposant que le conducteur n'éprouve aucune variation de travail intérieur et n'accomplit aucun travail extérieur proprement dit, comme la variation de la force vive de la masse électrique paraît être très petite et négligeable, on en conclut que le travail $d T$ des forces électro-motrices est égal à l'énergie calorifique développée dans le conducteur.

Pour un conducteur linéaire, si l'on remplace V_1 —

V_2 par sa valeur tirée de l'équation $i = \frac{V_1 - V_2}{\lambda}$, on a $T = \lambda i^2$. Donc la quantité de chaleur développée dans le conducteur est proportionnelle à la résistance du conducteur et au carré de l'intensité du courant. C'est la loi que Joule a trouvée par l'expérience.

De même que nous avons déduit la loi de Joule de celle de Ohm, nous aurions pu déduire la loi de Ohm de celle de Joule, car la formule intermédiaire $T = (V_1 - V_2) i$ n'exige aucune hypothèse autre que celle du mouvement de l'électricité suivant une ligne orthogonale aux surfaces de niveau.

64. Le mouvement du fluide éthère dans les conducteurs donne lieu à des actions mécaniques entre ces conducteurs. Si l'on considère, en effet, deux conducteurs linéaires voisins parcourus par des courants électriques, le mouvement des atmosphères condensées qui entourent leurs molécules, modifie l'action de gravitation qui s'exerce d'un conducteur à l'autre, car les chocs d'atomes éthérés sphériques qui se produisent sur deux éléments respectifs de ces conducteurs, de l'un à l'autre, reçoivent des augmentations ou des diminutions d'intensité, des vitesses mêmes de leurs atmosphères. Par suite, il se produit entre ces éléments une action attractive ou répulsive, proportionnelle aux longueurs de ces éléments, variant comme la gravitation, pour le même motif, avec la distance, et dépendant en outre, suivant une certaine loi, de la vitesse et de la direction des courants sur ces éléments. Pour découvrir cette loi, il suffit de remarquer, *à priori*, que l'ac-

tion doit être proportionnelle à deux fonctions impaires semblables des vitesses respectives du fluide éthéré sur les deux éléments, puisque le changement de signe de chacune des vitesses, correspondant au renversement de sens du courant, doit entraîner un changement de sens dans l'action mutuelle des deux éléments ; et ensuite que ces fonctions peuvent être, dans une première approximation, supposées proportionnelles aux vitesses elles-mêmes. Alors, si l'on décompose chaque vitesse, suivant la ligne qui joint les milieux des deux éléments, suivant une perpendiculaire à cette ligne, menée dans le plan de celle-ci et de l'un des éléments, et suivant une perpendiculaire aux deux autres, en désignant par ds, ds' les longueurs des deux éléments, par v, v' les vitesses respectives des courants sur les éléments, par φ l'angle des plans menés par la ligne des milieux et chacun des éléments, par θ, θ' les angles qu'ils forment avec cette ligne, on a, pour l'action des deux uniques éléments composants parallèles, l'expression

$$\frac{kvv' ds \cdot ds' \sin \theta \sin \theta' \cos \varphi,}{r^2}$$

et pour celle des éléments composants situés sur la même droite

$$\frac{l v v' ds \cdot ds' \cos \theta \cos \theta'}{r^2}$$

Quant aux éléments composants perpendiculaires entre eux, ils n'exercent aucune action l'un sur l'autre,

car, vu la situation relative de ces éléments, il n'y a pas de raison pour qu'il y ait entre eux une action plutôt attractive que répulsive, *et vice versa* ; ce que l'on peut d'ailleurs reconnaître de la manière suivante. Considérons les éléments symétriques de deux éléments donnés, par rapport à un plan ; la force qui s'exerce entre eux et celle qui s'exerce entre ces éléments doivent être symétriques l'une de l'autre. Or, ici, l'un des deux éléments composants perpendiculaires entre eux étant situé dans le plan perpendiculaire à l'autre en son milieu, si l'on prend ce plan pour plan de symétrie l'un d'eux est à lui-même son symétrique, l'autre change seulement de sens, la force dès lors doit changer de signe elle-même ; mais d'autre part la force qui s'exerce entre les deux premiers éléments étant contenue dans le plan et par conséquent symétrique à elle-même, ne change pas.

Ces deux conclusions seraient contradictoires, si la force n'était pas nulle.

L'action totale est en conséquence

$$\frac{v v' d s d s'}{r^2} (k \sin \theta \sin \theta' \cos \varphi + l \cos \theta \cos \theta'),$$

ou désignant par ϵ l'angle que forment entre elles les deux directions des vitesses v , v' , et posant $\frac{k-l}{k} = h$

$$k v v' d s d s' k (\cos \epsilon - h \cos \theta \cos \theta').$$

Telle est la formule qui exprime, *à priori*, la loi de

l'action de deux éléments de courant, les constantes k et h devant être déterminées par l'expérience.

65. Si l'on regarde l'attraction comme une quantité positive, la répulsion étant alors une quantité négative, l'expérience donne pour la constante k une valeur positive. Quant à la constante h , en exprimant analytiquement, à l'aide de cette formule qu'un courant de forme rectangulaire, assujetti à tourner autour de l'un de ses côtés, reste en équilibre sous l'action d'un courant circulaire, qui a son centre sur l'axe de rotation et son plan perpendiculaire sur cette axe, on reconnaît qu'elle doit avoir pour valeur le nombre $\frac{3}{2}$.

De telle sorte que l'action élémentaire de deux courants électriques linéaires, d'intensités i, i' est exprimée par la formule

$$F = \frac{k i i' d s_1 d s'}{r^2} \left(\cos \varepsilon - \frac{3}{2} \cos \theta \cos \theta' \right)$$

(i, i' pouvant être substitués à v, v' qui leur sont proportionnelles).

C'est la formule électro-dynamique trouvée par Ampère.

66. On peut la mettre sous une autre forme, en regardant les éléments de courant comme faisant partie de deux courants et en exprimant $\cos \theta, \cos \theta', \cos \varepsilon$ au moyen de variations que la distance r éprouve avec les longueurs s, s' , comptées sur ces courants, et dont elle est fonction, savoir :

$$F = - \frac{2 k i \cdot i' d s \cdot d s'}{\sqrt{r}} \frac{d^2 \sqrt{r}}{d s d s'}$$

67. Mais il est permis de supposer que la *force électromotrice*, au lieu de mettre tout d'un coup en mouvement la masse d'éther condensée autour de chaque molécule du corps conducteur, commence, en raison de la résistance du milieu pondérable, par orienter cette masse, en l'accumulant du côté de la molécule vers lequel agit la force, et la raréfiant d'autant sur le côté opposé. (C'est même ainsi que s'explique *l'électrisation par influence* ; la couche de fluide neutre qui entoure chaque molécule doit être considérée comme se décomposant sous l'action de *masses électriques*, en deux parties, l'une plus, l'autre moins condensée que le fluide neutre, c'est-à-dire, comme formée de l'ensemble de deux masses électriques libres, égales et de signes contraires, qui sont, l'une, attirée, l'autre, repoussée par ces masses influentes.) Dès lors, au lieu d'une masse unique *neutre* de fluide éthéré en mouvement dans le courant, on peut considérer deux masses d'électricité *libre*, égales et de signes contraires, qui, sous l'action de la force électromotrice, se meuvent dans le conducteur en sens contraire avec la même vitesse absolue ; de telle sorte que le courant électrique peut être regardé comme constitué par les mouvements égaux et contraires de masses électriques égales et de signes contraires.

Dans cette conception des courants, les masses électriques en mouvement exercent entre elles, d'un courant à l'autre, des actions, attractives et répulsives qui ne dépendent plus seulement de leur distance, suivant la loi de Coulomb, relative à l'électricité stati-

que, mais encore de la manière dont cette distance varie avec le temps, en vertu du mouvement.

68. Pour déterminer ces actions, il suffit de former la valeur de la dérivée seconde, relative au temps de la racine carrée de la distance r considérée comme une fonction des longueurs s, s' , elles-mêmes fonctions du temps, et de la comparer à la seconde forme de la formule d'Ampère. On obtient ainsi

$$\frac{d^2 \sqrt{r}}{dt^2} = v^2 \frac{d^2 \sqrt{r}}{ds^2} + 2 v v' \frac{d^2 \sqrt{r}}{ds ds'} + v'^2 \frac{d^2 \sqrt{r}}{ds'^2}$$

$$\text{ou } - \frac{k \mu \mu'}{\sqrt{r}} \frac{d^2 \sqrt{r}}{dt^2} = - \frac{k v^2 \mu \mu'}{\sqrt{r}} \frac{d^2 \sqrt{r}}{ds^2}$$

$$- \frac{2k v v' \mu \mu'}{\sqrt{r}} \frac{d^2 \sqrt{r}}{ds ds'} - \frac{k v'^2 \mu \mu'}{\sqrt{r}} \frac{d^2 \sqrt{r}}{ds'^2}$$

Le second terme du second membre étant semblable à la seconde expression de la formule d'Ampère, on est conduit à examiner si l'on ne pourrait pas représenter l'action de deux masses électriques μ, μ' en mouvement par la formule

$$- \mu \mu' \left(\frac{1}{r^2} + \frac{k}{\sqrt{r}} \frac{d^2 \sqrt{r}}{dt^2} \right)$$

qu'on obtient en ajoutant à la formule de Coulomb un terme proportionnel à $-\frac{\mu \mu'}{\sqrt{r}} \frac{d^2 \sqrt{r}}{dt^2}$.

En calculant, au moyen de cette dernière formule, où $-\frac{k \mu \mu'}{\sqrt{r}} \frac{d^2 \sqrt{r}}{dt^2}$ est remplacé par sa valeur donnée ci-dessus, les actions des deux masses $\mu, -\mu$ qui

se meuvent suivant ds respectivement avec les vitesses $v, -v$, sur les deux masses $\mu', -\mu'$ qui se meuvent suivant ds' respectivement avec les vitesses $v', -v'$, et en les ajoutant entre elles, on obtient précisément l'expression
$$-\frac{2kvv'\mu\mu'}{\sqrt{r}} \frac{d^2\sqrt{r}}{dsds'}$$
 qui, puisque μ, μ' sont respectivement proportionnelles à $i dt, i' dt$, et que $\frac{ds}{dt} = v, \frac{ds'}{dt} = v'$, n'est autre que la seconde forme de la formule d'Ampère.

Cette nouvelle formule est due à Weber.

Voilà donc trois formules équivalentes pour représenter l'action élémentaire de deux courants. La première s'applique plus particulièrement, comme l'a fait Ampère, à la théorie des *Solénoïdes*, c'est-à-dire des systèmes de courants élémentaires, égaux entre eux, de même sens, infiniment petits et infiniment voisins, dont les centres de gravité sont distribués sur une portion de courbe déterminée, et dont les plans sont normaux à cette courbe. La seconde convient de préférence au calcul du travail des courants entre eux et sur eux-mêmes lorsqu'ils sont constants et fixes ; mais lorsqu'ils sont d'intensités variables avec le temps, et que leurs circuits sont mobiles et variables de forme, c'est la formule de Weber qui seule explique complètement ces phénomènes d'induction des courants.

Nous nous bornerons, dans cette Introduction, à l'application de la première formule d'Ampère à la théorie des solénoïdes, les deux autres applications étant développées dans l'Ouvrage qui y fait suite.

69. Pour déterminer l'action réciproque de deux solénoïdes, il faut commencer par évaluer l'action d'un courant fermé sur un élément de courant.

Si l'on prend pour origine de coordonnées rectangulaires (x, y, z) le milieu O de l'élément $d s'$, on a, pour la composante X parallèle à l'axe des x de l'action du courant fermé sur cet élément,

$$X = k i i' d s' \int \frac{(\cos \varepsilon - l \cos \theta \cos \theta') x d s}{r^3};$$

l désignant la fraction $\frac{3}{2}$, ou, puisque $\cos \theta = \frac{d r}{d s'}$,

$X = k i i' d s' \int \left(\frac{x \cos \varepsilon}{r^3} d s - \frac{l x' \cos \theta'}{r^4} d r \right)$, ou en intégrant par parties,

$$\begin{aligned} X &= k i i' d s' \int \frac{x \cos \varepsilon}{r^3} d s - \frac{k l i i' d s'}{3} \int \frac{d(x r \cos \theta')}{r^3} \\ &= k i i' d s' \int \frac{x \cos \varepsilon}{r^3} d s - \\ &\quad \frac{k l i i' d s'}{3} \int \frac{x d(r \cos \theta') - r \cos \theta' d x}{r^3}, \end{aligned}$$

ou, en remplaçant $d(r \cos \theta')$ par $d s \cos \varepsilon$, et l par $\frac{3}{2}$,

$$X = \frac{k i i' d s'}{2} \int \frac{x \cos \varepsilon d s - r \cos \theta' d x}{r^3}.$$

Si l'on représente par a, b, c , les cosinus des angles que fait $d s'$ avec les axes, on a

$$r \cos \theta' = a x + b y + c z,$$

$$\cos \varepsilon d s = a d x + b d y + c d z, \text{ d'où}$$

$$r \cos \varepsilon d s - r \cos \theta' d x = b(x d y - y d x) - c(z d x - x d z).$$

Par suite

$$X = \frac{b}{2} k i i' ds' \int \frac{x dy - y dx}{r^3} -$$

$$\frac{c}{2} k i i' ds' \int \frac{z dx - x dz}{r^3}.$$

On a des expressions analogues pour Y, Z.

En posant $A = \int \frac{y dz - z dy}{r^3}$, $B = \int \frac{z dx - x dz}{r^3}$,

$$C = \int \frac{x dy - y dx}{r^3},$$

on peut écrire

$$X = \frac{k i i' ds'}{2} (b C - c B), \quad Y = \frac{k i i' ds'}{2} (c A - a C),$$

$$Z = \frac{k i i' ds'}{2} (a B - b A)$$

d'où l'on déduit

$$a X + b Y + c Z = 0, \quad A X + B Y + C Z = 0$$

La 1^{re} formule indique que la résultante est normale à l'élément ds' , et la seconde qu'elle est perpendiculaire à une droite O G faisant avec les axes des angles dont les cosinus sont proportionnels à A, B, C.

Le plan mené par ds' et O G est le *plan directeur* d'Ampère, auquel la résultante est perpendiculaire.

Si l'on pose $A^2 + B^2 + C^2 = G^2$ et qu'on appelle δ l'angle de la droite O G avec ds' on a pour valeur de la

$$\text{résultante } R = \frac{k i i' ds'}{2} G \sin \delta.$$

Si l'on imagine une portion de surface continue S limitée par le courant et qu'on désigne par u et φ le

rayon vecteur et l'angle polaire, rapportés à l'origine de la projection de l'un de ses points x, y, z , sur le plan des xy , on a $x dy - y dx = u^2 d\varphi$,

par suite $C = \int \frac{u^2}{r^3} d\varphi = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \left(\frac{u_2^2}{r_2^3} - \frac{u_1^2}{r_1^3} \right) d\varphi$, (en supposant le point o en dehors de la projection du courant), ou

$$C = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} d\varphi \int \frac{u^2}{r^3} d\varphi \quad (2)$$

$$(1) \frac{d}{du} d u.$$

$$\text{Or } \frac{d}{du} \frac{u^2}{r^3} = \frac{2ru - 3u^2 \frac{dr}{du}}{r^4}, \text{ et } r^2 = u^2 + z^2,$$

d'où $\frac{dr}{du} = \frac{u}{r} + \frac{z}{r} \frac{dz}{du}$; et $\frac{dz}{du} = \frac{z - \frac{p}{\gamma}}{u}$, p étant

la distance de l'origine au plan tangent à la surface S au point (u, φ, z) , et α, β, γ les cosinus des angles que forme avec les axes la normale à cette surface, menée du côté d'où l'on voit le courant tourner de droite à gauche.

On en déduit $\frac{dr}{du} = \frac{\gamma r^2 - px}{\gamma u r}$, par suite

$$\frac{d}{du} \frac{u^2}{r^3} = u \left(-\frac{1}{r^3} + \frac{3pz}{\gamma r^5} \right) \text{ et}$$

$$C = \iint \left(-\frac{1}{r^3} + \frac{3pz}{\gamma r^5} \right) u du d\varphi, \text{ ou}$$

en remarquant que $\frac{u du d\varphi}{\gamma}$ est l'élément dS de la

$$\text{surface, } C = \iint \left(-\frac{\gamma}{r^3} + \frac{3pz}{r^5} \right) dS.$$

Si l'on appelle C' la valeur moyenne de la quantité $-\frac{\gamma}{r^3} + \frac{3pz}{r^5}$ sur toute la surface S , on peut écrire $C = C' S$.

On a de même $A = A' S$, $B = B' S$, A' et B' étant les valeurs moyennes des quantités

$$-\frac{\alpha}{r^3} + \frac{3px}{r^5}, \quad -\frac{\beta}{r^3} + \frac{3py}{r^5}.$$

Pour un courant élémentaire, les valeurs moyennes ci-dessus sont sensiblement égales à celles que prennent les quantités correspondantes pour un point quelconque de la surface infiniment petite ω limitée au contour du courant.

On a donc, pour les composantes de l'action d'un courant élémentaire sur un élément de courant, les valeurs trouvées précédemment où A , B , C doivent être remplacés respectivement par

$$\left(-\frac{\alpha}{r^3} + \frac{3px}{r^5}\right)\omega, \quad \left(-\frac{\beta}{r^3} + \frac{3py}{r^5}\right)\omega, \quad \left(-\frac{\gamma}{r^3} + \frac{3pz}{r^5}\right)\omega.$$

70. Comme un solénoïde est le système formé par des courants élémentaires, égaux entre eux, normaux à une même courbe directrice et infiniment rapprochés les uns des autres, si l'on désigne par g la distance de deux courants élémentaires consécutifs, et par $d\sigma$ l'élément de la courbe directrice, l'action totale du solénoïde sur un élément de courant ds' a pour composante parallèle à l'axe des x

$$X = \frac{1}{2} i' ds' \frac{i \omega}{g} (b \int C' d\sigma - c \int B' d\sigma),$$

la courbe directrice σ devant être parcourue, pour l'intégration, dans le sens par rapport auquel le courant tourne de droite à gauche.

On peut regarder x, y, z comme les coordonnées d'un point de la directrice ; et l'on a alors $\gamma = \frac{dz}{d\sigma}$, et $\frac{p}{r} = \frac{dr}{d\sigma}$, par suite $C' = -\frac{1}{r^3} \frac{dz}{d\sigma} + \frac{3z}{r^4} \frac{dr}{d\sigma}$, et $\int C' d\sigma = \int \left(-\frac{1}{r^3} dz + \frac{3z}{r^4} dx \right)$, ou, en réduisant, $\int C' d\sigma = -\left(\frac{z}{r^3} \right)_{(1)}^{(2)} = \frac{z_1}{r_1^3} - \frac{z_2}{r_2^3} z_1$ et z_2 étant les z des deux extrémités du solénoïde.

On a de même $\int B' d\sigma = \frac{y_1}{r_1^3} - \frac{y_2}{r_2^3}$,

et $\int A' d\sigma = \frac{x_1}{r_1^3} - \frac{x_2}{r_2^3}$; d'où, en posant $\frac{i \omega}{g} = \mu$,

$$X = \frac{1}{2} \mu i' d s' \left(\frac{b z_1 - c y_1}{r_1^3} - \frac{b z_2 - c y_2}{r_2^3} \right),$$

$$Y = \frac{1}{2} \mu i' d s' \left(\frac{c x_1 - a z_1}{r_1^3} - \frac{c x_2 - a z_2}{r_2^3} \right),$$

$$Z = \frac{1}{2} \mu i' d s' \left(\frac{a y_1 - b x_1}{r_1^3} - \frac{a y_2 - b x_2}{r_2^3} \right).$$

On voit que la force ne dépend que de la position des extrémités P_1, P_2 du solénoïde ; Ampère leur a donné le nom de *pôles*.

On peut regarder cette force comme la résultante de deux forces appliquées toutes deux sur ds' , l'une F_1 ayant pour composantes

$$X_1 = \frac{1}{2} \mu i' d s' \frac{b z_1 - c y_1}{r_1^3}$$

$$Y_1 = \frac{1}{2} \mu i' d s' \frac{c x_1 - a z_1}{r_1^3}$$

$$Z_1 = \frac{1}{2} \mu i' d s' \frac{a y_1 - b x_1}{r_1^3}$$

et se rapportant au pôle P_1 ; l'autre F_2 , ayant pour composantes,

$$X_2 = - \frac{1}{2} \mu i' d s' \frac{b z_2 - c y_2}{r_2^3},$$

$$Y_2 = - \frac{1}{2} \mu i' d s' \frac{c x_2 - a z_2}{r_2^3},$$

$$Z_2 = - \frac{1}{2} \mu i' d s' \frac{a y_2 - b x_2}{r_2^3}$$

et se rapportant au pôle P_2 .

Des formules précédentes on déduit

$$a X_1 + b Y_1 + c Z_1 = 0_1$$

$$x_1 X_1 + y_1 Y_1 + z_1 Z_1 = 0 :$$

d'où l'on conclut que la force F_1 est perpendiculaire au plan qui passe par l'élément $d s'$ et la droite $O P_1$.

On a d'ailleurs

$$F_1 = \sqrt{X_1^2 + Y_1^2 + Z_1^2} = \frac{1}{2} \frac{\mu i' d s'}{r_1^3} \times \\ \times \sqrt{r_1^2 - (a x_1 + b y_1 + c z_1)^2} = \frac{1}{2} \frac{\mu i d s' \sin \delta_1}{r_1^2},$$

δ_1 désignant l'angle que fait l'élément $d s'$ avec la droite $O P_1$; ce qui montre que la force F_1 varie en raison inverse du carré de la distance $O P_1$.

Quant au sens de cette force, pour le trouver, on fait coïncider l'axe OZ avec l'élément ds' , et passer le plan ZY par le pôle P_1 . Alors $a = 0$, $b = 0$, $c = 1$, $x_1 = 0$, $Y_1 = 0$, $Z_1 = 0$, $X_1 = -\frac{1}{2} \mu i' ds' \frac{y_1}{r_1^3}$; et un observateur placé sur OZ , c'est-à-dire sur l'élément de courant ds' , de manière que le courant entre par ses pieds, et regardant le pôle, verra le pôle F_1 à sa gauche.

De même la force F_2 est perpendiculaire au plan qui passe par l'élément de courant ds' et la droite OP_2 , et égale à $\frac{1}{2} \mu i' ds' \frac{\sin \delta_2}{r_2^2}$, δ_2 désignant l'angle de ds' avec OP_2 ; et un observateur, placé comme précédemment, en regardant le pôle P_2 verra cette force à sa droite.

On appelle P_1 le pôle boréal, et P_2 le pôle austral du solénoïde.

L'élément du courant ds' exerce réciproquement sur les deux pôles P_1 , P_2 du solénoïde des actions égales et directement opposées aux deux forces F_1 et F_2 .

71. De là on déduit l'action intégrale d'un courant fermé sur un solénoïde.

Les axes de coordonnées étant placés d'une manière quelconque, soient x_1, y_1, z_1 les coordonnées du pôle P_1 , x', y', z' celles du milieu d'un élément ds' du courant; l'action de cet élément sur le pôle P_1 a pour composantes

$$X_1 = -\frac{1}{2} \mu i' ds' \frac{b(z_1 - z') - c(y_1 - y')}{r_1^3},$$

$$Y_1 = -\frac{1}{2} \mu i' d s' \frac{c(x_1 - x') - a(x_1 - z')}{r_1^3},$$

$$Z_1 = -\frac{1}{2} \mu i' d s' \frac{a(y_1 - y') - b(x_1 - x')}{r_1^3};$$

et si l'on place l'origine des coordonnées au pôle P_1 , ces expressions deviennent,

$$X_1 = \frac{1}{2} \mu i' d s' \frac{b z' - c y'}{r_1^3},$$

$$Y_1 = \frac{1}{2} \mu i' d s' \frac{c x' - a z'}{r_1^3},$$

$$Z_1 = \frac{1}{2} \mu i' d s' \frac{a y' - b x'}{r_1^3}.$$

a, b, c étant alors égaux respectivement à

$$\frac{d x'}{d s'}, \frac{d y'}{d s'}, \frac{d z'}{d s'}.$$

Toutes les forces appliquées au milieu des différents éléments du courant fermé ont une résultante passant par le point P_1 ; car la somme des moments de toutes ces forces par rapport à chacun des trois axes, ayant pour expression

$$\begin{aligned} \Sigma(x' Y_1 - y' X_1) &= \frac{1}{2} \mu i' \int \frac{x' (x' d z' - z' d x') + y' (y' d z' - z' d y')}{r_1^3} \\ &= \frac{1}{2} \mu i' \int \frac{r_1 d z' - z' d r_1}{r_1^2} = \frac{1}{2} \mu i' \int d \frac{z'}{r_1} = \frac{1}{2} \mu i' \left(\frac{z'}{r_1} \right)_{(1)}^{(2)}, \end{aligned}$$

$$\Sigma(y' Z_1 - z' Y_1) = \frac{1}{2} \mu i' \left(\frac{y'}{r_1} \right)_{(1)}^{(2)},$$

$$\Sigma(z' X_1 - x' Z_1) = \frac{1}{2} \mu i' \left(\frac{y'}{r_1} \right)_{(1)}^{(2)},$$

est nulle, lorsque le courant est fermé.

Les projections de la résultante sur les trois axes sont :

$$\int X_1 = X = \frac{1}{2} \mu i' \int \frac{x' dy' - y' dx'}{r'^3},$$

$$\int Y_1 = Y = \frac{1}{2} \mu i' \int \frac{x' dz' - z' dx'}{r'^3},$$

$$\int Z_1 = Z = \frac{1}{2} \mu i' \int \frac{y' dz' - z' dy'}{r'^3}.$$

Ces intégrales ont la même forme, au signe près, que les intégrales A, B, C qui ont servi à trouver l'action d'un courant fermé sur un élément de courant.

On peut de même les transformer dans les intégrales doubles suivantes

$$X = \frac{1}{2} \mu i' \iint \left(\frac{\alpha}{r'^3} - \frac{3 p x'}{r'^5} \right) S',$$

$$Y = \frac{1}{2} \mu i' \iint \left(\frac{\beta}{r'^3} - \frac{3 p y'}{r'^5} \right) S',$$

$$Z = \frac{1}{2} \mu i' \iint \left(\frac{\gamma}{r'^3} - \frac{3 p z'}{r'^5} \right) S'.$$

Telle est l'action d'un courant fermé sur le pôle boréal P_1 d'un solénoïde ; c'est une force appliquée au point P_1 et dont les composantes sont exprimées par ces formules. De même, l'action du courant sur le pôle austral P_2 s'exprime par les mêmes formules, l'origine des coordonnées étant en P_2 , sauf le changement de signe de la quantité μ .

Lorsque le courant fermé est infiniment petit, ces formules deviennent

$$X = \frac{1}{2} \mu i' \omega' \left(\frac{\alpha}{r'^3} - \frac{3 p x'}{r'^5} \right),$$

$$Y = \frac{1}{2} \mu i' \omega' \left(\frac{\beta}{r'^3} - \frac{3 p y'}{r'^5} \right),$$

$$Z = \frac{1}{2} \mu i' \omega' \left(\frac{\gamma}{r'^3} - \frac{3 p z'}{r'^5} \right),$$

ω' désignant la portion infiniment petite de surface comprise dans le courant, et x', y', z' les coordonnées d'un point quelconque de cette portion de surface.

72. De là on déduit l'action d'un solénoïde sur un solénoïde.

En effet, si l'on considère un second solénoïde $P'_1 P'_2$ formé de courants élémentaires d'aire ω' et d'intensité i' , l'action de chacun de ces courants fermés sur le pôle P_1 du premier solénoïde étant une force appliquée en P_1 et donnée par les dernières formules, l'action totale du second solénoïde sur le même pôle se réduit à une force unique appliquée en P_1 , et comme il y a sur chaque élément $d\sigma'$ de la courbe directrice $P'_1 P'_2$ un nombre de petits courants marqué par $\frac{d\sigma'}{g'}$, les composantes de cette force sont

$$X = \frac{1}{2} \mu i' \frac{\omega'}{g'} \int \left(\frac{\alpha}{r'^3} - \frac{3 p x'}{r'^5} \right) d\sigma'$$

$$Y = \frac{1}{2} \mu i' \frac{\omega'}{g'} \int \left(\frac{\beta}{r'^3} - \frac{3 p y'}{r'^5} \right) d\sigma'$$

$$Z = \frac{1}{2} \mu i' \frac{\omega'}{g'} \int \left(\frac{\gamma}{r'^3} - \frac{3 p z'}{r'^5} \right) d\sigma'.$$

α, β, γ désignant les cosinus des angles que fait l'élé-

ment $d\sigma'$ avec les axes coordonnés, et p la perpendiculaire abaissée de l'origine P_1 sur le plan de chaque courant élémentaire.

$$\text{On a donc } \alpha = \frac{dx'}{d\sigma'}, \beta = \frac{dy'}{d\sigma'}, \gamma = \frac{dz'}{d\sigma'}, \frac{p}{r} = \frac{dr'}{d\sigma'},$$

d'où, en posant $\frac{i'\omega'}{g'} = \mu'$, intensité du second solénoïde, on obtient,

$$X = \frac{1}{2} \mu \mu' \int \left(\frac{dx'}{r'^3} - \frac{3x' dr'}{r'^4} \right) = \frac{1}{2} \mu \mu' \left(\frac{x'}{r'^3} \right)_{(1)}^{(2)},$$

$$Y = \frac{1}{2} \mu \mu' \int \left(\frac{dy'}{r'^3} - \frac{3y' dr'}{r'^4} \right) = \frac{1}{2} \mu \mu' \left(\frac{y'}{r'^3} \right)_{(1)}^{(2)},$$

$$Z = \frac{1}{2} \mu \mu' \int \left(\frac{dz'}{r'^3} - \frac{3z' dr'}{r'^4} \right) = \frac{1}{2} \mu \mu' \left(\frac{z'}{r'^3} \right)_{(1)}^{(2)}.$$

C'est-à-dire que l'action du second solénoïde sur le pôle boréal P_1 du premier est une force appliquée en P_1 et ayant pour composantes

$$X = \frac{1}{2} \mu \mu' \left(\frac{x'_2}{r'^2_2{}^3} - \frac{x'_1}{r'^1_1{}^3} \right),$$

$$Y = \frac{1}{2} \mu \mu' \left(\frac{y'_2}{r'^2_2{}^3} - \frac{y'_1}{r'^1_1{}^3} \right),$$

$$Z = \frac{1}{2} \mu \mu' \left(\frac{z'_2}{r'^2_2{}^3} - \frac{z'_1}{r'^1_1{}^3} \right).$$

On peut regarder cette force comme la résultante de deux forces appliquées en P_1 et ayant pour composantes,

$$\text{l'une } \frac{1}{2} \mu \mu' \frac{x'_2}{r'^2_2{}^3}, \frac{1}{2} \mu \mu' \frac{y'_2}{r'^2_2{}^3}, \frac{1}{2} \mu \mu' \frac{z'_2}{r'^2_2{}^3},$$

l'autre $-\frac{1}{2} \mu \mu', \frac{x'_1}{r'^3_1}, -\frac{1}{2} \mu \mu', \frac{y'_1}{r'^3_1}, -\frac{1}{2} \mu \mu', \frac{z'_1}{r'^3_1}$;

la première dont l'intensité est le $\frac{1}{2} \frac{\mu \mu'}{r'^2_2}$, est dirigée suivant la droite $P_1 P'_2$, et est *attractive* en raison inverse du carré de la distance $P_1 P'_2$; la seconde dont l'intensité est $\frac{1}{2} \frac{\mu \mu'}{r'^2_1}$, est dirigée suivant le prolongement de la droite $P'_1 P_1$, et est *répulsive* en raison inverse du carré de la distance $P_1 P'_1$.

On en déduit l'action du second solénoïde sur le pôle austral P_2 du premier par le seul changement de signe de μ , et en supposant l'origine des coordonnées en P_2 . Cette action se composera donc de deux forces appliquées en P_2 , l'une répulsive suivant $P_2 P'_2$, l'autre attractive suivant $P_2 P'_1$.

Tout se passe comme si, les solénoïdes étant réduits à leurs pôles, ces pôles s'attiraient et se repoussaient proportionnellement au produit de leurs intensités, et en raison inverse du carré de leur distance, ceux de même nom se repoussant et ceux de nom contraire s'attirant.



CHAPITRE VII.

Magnétisme. — Diamagnétisme. Electro-magnétisme.

§ I^{er}. — MAGNÉTISME. — DIAMAGNÉTISME.

73. Cette théorie mathématique des solénoïdes ayant ainsi révélé à Ampère des analogies frappantes entre leurs propriétés et celle des aimants le conduisit à assimiler les aimants à des solénoïdes, et à expliquer les phénomènes magnétiques au moyen de courants électriques infiniment petits, circulant autour des molécules des corps. Ces courants sont constitués par le mouvement de gyration des *atmosphères* éthérées qui se continuent autour des molécules lorsqu'on les suppose idéalement immobiles. Dans les corps non magnétiques, ces mouvements de rotation autour des diverses molécules n'ont aucune coordination, c'est-à-dire qu'ils ont lieu dans tous les sens, tandis que dans les corps magnétiques ils sont orientés parallèlement à un même plan dans un même sens de rotation. Si au lieu de supposer les molécules rendues immobiles, on leur laisse leur mouvement effectif de gyration, ces courants électriques moléculaires sont dus alors aux mouvements de gyration des molécules qui entraînent avec

elles leurs atmosphères éthérées. Dans les aimants permanents, les mouvements de gyration des diverses molécules s'exécutent autour d'axes de même direction.

Lorsqu'un fil conducteur entouré d'une enveloppe isolante est enroulé en spirale autour d'une bobine cylindrique (de bois ou de carton), s'il est parcouru par un courant électrique, il agit extérieurement comme un corps aimanté et constitue ce que l'on appelle un *électro-aimant*. Sa puissance magnétique est augmentée par l'introduction dans l'intérieur de la bobine d'un cylindre de fer doux, et cela en vertu de l'action que le courant solénoïdal de la bobine exerce sur les courants électriques moléculaires du fer doux, action qui a pour effet d'orienter l'axe de rotation de ces courants parallèlement à l'axe de la bobine, et de constituer le cylindre de fer doux en un véritable aimant dont la puissance magnétique se joint à celle du courant solénoïdal.

Si l'on courbe le solénoïde de manière à rapprocher ses deux extrémités polaires, on obtient une forme d'électro-aimant, réalisée par le constructeur Ruhmkorff, dont la puissance magnétique peut être portée à un très haut degré.

74. C'est avec cet appareil que Faraday reconnut qu'un grand nombre de substances autres que le fer doux se comportent comme lui, vis-à-vis de ses deux pôles, c'est-à-dire deviennent magnétiques avec une énergie plus ou moins grande, telles que le nickel, le cobalt, le manganèse, le chrome, le cerium, le titane,

le palladium, le platine, l'osmium, le lanthane, le molybdène, l'uranium et généralement les sels de ces métaux.

75. Mais en même temps il constata que d'autres substances, comme le bismuth, suspendues sous forme de barreau par leur milieu, entre les deux pôles de l'électro-aimant, au lieu d'être dirigées par ces pôles dans la direction de la ligne qui les joint, à l'instar d'un barreau de fer doux, sont dirigées dans la direction perpendiculaire. Il se produit une répulsion au lieu d'une attraction. Il distingua ces dernières substances des premières, en les nommant *diamagnétiques* ; telles sont, 1° parmi les métaux, après le bismuth, dans l'ordre d'énergie décroissant, l'antimoine, le zinc, l'étain, le cadmium, le mercure, le plomb, l'argent, le cuivre, l'or, le tungstène ; 2° les métalloïdes et leurs composés, comme le soufre, le phosphore, le charbon, la cire, le bois et, en général, les matières organiques.

76. Pour expliquer ce fait que les corps peuvent être magnétiques ou diamagnétiques, suivant leur nature, il faut admettre que les atmosphères éthérées qui tournent autour de leurs molécules dans toutes les orientations possibles, en constituant par ce mouvement de rotation autant de petits courants électriques, se meuvent dans de tels sens divers, qu'une partie d'entre elles, en s'orientant parallèlement sous l'action des courants de l'électro-aimant, exécutent finalement leurs mouvements de rotation dans le même sens qu'eux, et qu'une autre partie les exécute en sens contraire. Suivant que la première partie est supérieure

ou inférieure à la seconde, le corps est *magnétique* ou *diamagnétique*.

Tous les corps de la nature qui, en passant successivement, par un abaissement de température, de l'état fluide à l'état liquide et à l'état solide, n'ont pas cessé d'être animés d'un mouvement de rotation de même sens, autour d'un axe, ont dû finir par devenir *magnétiques* par l'effet même de ce mouvement; car en vertu des chocs continuels des molécules du corps entre elles, les atmosphères éthérées qui participent à leur mouvement de gyration ont dû, avec le temps, amener ces molécules, par leurs frottements entre elles, dans leur déplacement commun autour de l'axe de révolution, à exécuter leur mouvement gyrotoire sensiblement dans un sens contraire à celui du mouvement de rotation du corps.

Ainsi la Terre et très probablement tous les corps célestes sont magnétiques. Ils forment comme de vastes aimants dont l'axe polaire coïncide sensiblement avec l'axe de révolution, le sens de tous les courants électriques moléculaires étant sensiblement contraire à celui du mouvement de rotation, c'est-à-dire que l'axe magnétique fait un petit angle avec l'axe de rotation.

C'est par le magnétisme du Soleil que peuvent s'expliquer la période diurne des variations des boussoles, leur inégalité horaire qui s'accomplit en douze mois, leur variation annuelle, et leur période d'environ 26 jours, durée de la rotation apparente du Soleil. Car, en vertu des mouvements de rotation du Soleil et de la Terre autour de leurs axes de révolution, la direction

relative de leurs axes magnétiques ou de leurs courants électriques moléculaires, et par suite l'action exercée par les courants solaires sur les courants terrestres varie elle-même suivant ces diverses périodes.

Outre cette action directrice, il y a l'action magnétique qui s'exerce entre les pôles magnétiques du Soleil et les pôles magnétiques de la Terre, considérés comme de vastes aimants. Cette action réciproque très faible d'un corps sur l'autre, qui suit la loi de la gravitation, a pour effet d'augmenter ou de diminuer la gravitation de la Terre vers le Soleil, comme si les masses des deux corps subissaient une légère variation, et de changer légèrement la direction de l'axe de rotation de la Terre. Le second effet doit être insensible, puisque la durée de la précession et l'étendue de la nutation données par l'observation astronomique sont vérifiées par la théorie dynamique, qui ne tient pas compte de cette action magnétique. Quant au premier, s'il a une valeur sensible, il ne peut que modifier excessivement peu les valeurs admises pour les masses de la Terre et du Soleil.

Le magnétisme de la Lune produit aussi de légères variations périodiques de déclinaison de la boussole.

76. L'action d'un courant élémentaire de surface ω peut être assimilée à celle d'un solénoïde infiniment petit $p_1 p_2$ normal au plan du courant. Si, en effet, on désigne par l la longueur très petite $p_1 p_2$, on peut remplacer le courant élémentaire dont l'intensité est i par n courants élémentaires égaux entre eux de surface ω , d'intensité $\frac{i}{n}$, disposés perpendiculairement à la droite

$p_1 p_2$, à la distance $g = \frac{l}{n}$ les uns des autres. Ces courants forment un solénoïde dont l'intensité est $\mu = \frac{i}{n} \cdot \omega = \frac{i \omega}{l}$. Ainsi, l'idée d'Ampère, qui supposait un

courant électrique élémentaire autour de chaque molécule d'un corps, dont l'orientation parallèle à un même plan constitue l'état magnétique du corps, se rattache à celle de Coulomb, qui admettait qu'il existait dans les corps aimantés deux *fluides magnétiques*, se séparant dans chaque molécule du corps, sans cesser de rester attachés à elle, de manière à former deux pôles magnétiques contraires dans une même direction parallèle à l'axe de l'aimant, l'un appelé boréal, l'autre austral, jouissant de la même propriété d'attraction et de répulsion que les deux fluides électriques, donnant lieu dans les corps aimantés à une *énergie magnétique* analogue à l'énergie électrique, et produisant la même *action extérieure* qu'une couche répandue sur la surface de l'aimant et formée de quantités égales des deux fluides.

77. On peut aussi substituer à un courant fermé quelconque une série d'aimants infiniment petits. Car, si l'on imagine une surface S limitée à un circuit, et qu'on décompose cette surface par un double système de lignes, infiniment rapprochées, en une infinité de parties infiniment petites $d\omega$, le contour de chacune de ces parties étant parcouru par un courant d'intensité i , dans un sens tel qu'un observateur voie tous les cou-

rants élémentaires circuler dans le même sens de rotation, les actions exercées par les diverses portions intérieures des contours de ces courants se détruisent deux à deux, et il ne reste que les portions extérieures parcourues par des portions de courants de même sens et d'intensité i qui constituent un courant continu, d'intensité i , se mouvant dans le circuit. Or, à chacun des petits courants on peut substituer un petit solénoïde $p_1 p_2$ normal à l'élément $d\omega$ de surface, et d'une intensité égale à $\frac{i d\omega}{l}$. Les deux pôles $p_1 p_2$ peuvent être considérés comme les pôles magnétiques, l'un boréal, l'autre austral, d'un petit aimant.

Le lieu du point p_1 forme une surface magnétique boréale ; le lieu du point p_2 une surface magnétique australe ; et sur chacune de ces surfaces, distantes de l , l'intensité magnétique, rapportée à l'unité de surface, est $\frac{i}{l}$.

Le courant est ainsi remplacé, par deux surfaces magnétiques, l'une boréale, l'autre australe, infiniment rapprochées et limitées au circuit.

§ III. — ÉLECTRO-MAGNÉTISME.

L'action qu'exerce sur un aimant un fil conducteur fixe, traversé par un courant, fut observée pour la première fois par Ørsted, physicien danois. En plaçant un fil métallique, traversé par un courant, dans une di-

rection parallèle à une aiguille aimantée mobile sur un pivot, il vit celle-ci abandonner sa position d'équilibre et tendre à se mettre en croix avec le courant. Lorsque le fil était placé au-dessus de l'aiguille, suivant que le courant allait du nord au sud ou en sens contraire, le pôle austral de l'aiguille était dévié vers l'ouest ou vers l'est. Lorsqu'il était placé au-dessous, c'était le contraire qui avait lieu. Enfin un courant vertical placé en face de l'un des pôles de l'aiguille produisait des effets différents, selon le sens où il se propageait, et selon le pôle en face duquel il était placé.

Ørsted chercha vainement à saisir une relation simple entre ces divers phénomènes.

C'est Ampère qui réunit tous ces résultats dans la loi suivante. Un courant, agissant sur un aimant, tend toujours à le placer dans une position perpendiculaire à la sienne et de manière que le pôle austral soit toujours à la gauche du courant, la gauche d'un courant étant celle d'un observateur étendu le long du fil conducteur, de manière qu'il reçoive le courant des pieds à la tête et qu'il soit tourné du côté de l'aiguille.

Cette loi résulte, comme l'a montré Ampère, de la loi électro-dynamique qui régit l'action des courants sur les courants, les aimants étant assimilés par lui à des faisceaux de solénoïdes parallèles.

CHAPITRE VIII.

Diverses sortes de courants électriques.

§ I. — COURANTS VOLTAÏQUES.

78. Volta a admis que le simple contact intime de deux métaux différents suffit pour leur donner des états électriques contraires, l'un d'eux se chargeant d'électricité positive, l'autre d'électricité négative, en quantités différentes.

Ce fut là une intuition de génie de cet illustre physicien, qui le conduisit à l'admirable découverte de la pile électrique, dite de Volta.

L'hypothèse que nous avons admise sur la nature de l'électricité, à savoir qu'elle consiste dans un état *plus* ou *moins* condensé que celui d'un état intermédiaire dit neutre, de la matière éthérée condensée qui entoure, comme une atmosphère, chacune des molécules d'un corps, rend compte de cette conception de Volta. En effet, le contact intime de deux corps conducteurs de l'électricité, de nature différente, le long d'une certaine étendue de surface commune, a pour résultat de mêler les atmosphères, de densités différentes des molécules des deux corps voisines de la section de contact.

Ce mélange est nécessairement accompagné d'une

augmentation de densité moyenne de celles qui appartiennent à l'un des corps et d'une diminution de densité moyenne de celles qui appartiennent à l'autre, c'est-à-dire du développement du fluide électrique positif d'un côté, et du fluide négatif de l'autre, en quantités différentes. Ces deux masses électriques agissent sur le fluide neutre qui entoure les autres molécules des deux corps, comme nous l'avons expliqué précédemment ; et si l'on réunit les deux métaux en un circuit par un nouveau contact, de surface moindre, cette action produit un courant électrique dans ce circuit ; mais quand la réunion n'a pas lieu, cette action a pour effet, dans les deux corps, une distribution des deux fluides à leur surface, avec un potentiel différent de l'un à l'autre des deux côtés de la surface de contact.

D'après la définition du potentiel, c'est sur le corps qui, par le contact, s'électrise positivement que le potentiel est le plus petit ; dès lors, dans le circuit, la force électro-motrice s'exerce du métal négatif au métal positif, et le courant traverse la surface de contact dans le sens qui va du potentiel le plus grand au potentiel le plus petit, comme cela devait être.

Le fait, affirmé par Volta, du développement d'un courant dans le circuit que forment deux métaux mis en double contact par des surfaces d'étendue différente, n'a pas paru jusqu'alors suffisamment prouvé par ses expériences. Dans la pile à colonne qu'il construisit d'après sa conception, comme il imbibait d'eau acidulée les rondelles de drap qui séparaient les uns des autres les couples de disques égaux de cuivre et

de zinc soudés entre eux, à l'effet du contact du cuivre et du zinc s'ajoutait celui du contact du liquide avec ces deux métaux, et en outre celui de l'action chimique de l'acide sur le zinc. Volta ne tenait pas compte de ces deux derniers effets, ou plutôt il ne voyait dans l'eau acidulée qui imbibait les rondelles qu'un moyen d'accroissement de leur conductibilité électrique. Il resterait donc à vérifier directement, à l'aide d'un galvanomètre très sensible, cette conséquence de la théorie, à savoir que, lorsque le second contact de deux métaux s'opère le long d'une surface beaucoup moindre que celle du premier, les quantités de fluides électriques que développe le contact devant être proportionnelles à son étendue, les deux actions contraires des deux contacts ne se détruisent qu'en partie, et qu'un courant électrique se produit dans le circuit.

Depuis que ceci a été écrit, nous avons appris que nos prévisions avaient été confirmées par le physicien Thomson. En répétant les expériences de Volta, avec des appareils délicats, il démontra que, lorsque le cuivre et le zinc sont mis en contact intime, le cuivre s'électrise positivement et le zinc négativement. Pour prouver que l'action chimique de l'humidité de l'atmosphère, n'était pas la cause de ce phénomène, il démontra que, quand une goutte d'eau met en contact le cuivre et le zinc, il ne se produit aucune charge électrique. D'après le résultat de ses expériences nombreuses et variées, il est bien établi qu'une différence de potentiel électrique se développe toujours aux surfaces de contact des milieux hétérogènes. Cela est vrai

non-seulement pour les solides en contact avec les solides, mais aussi pour les solides en contact avec les liquides, et pour les liquides en contact entre eux.

Cette création d'*énergie électrique* par le contact est corrélative, d'après notre théorie, à la diminution équivalente du *travail intérieur* des deux côtés de la surface de contact.

79. Dans la pile à colonne de Volta, où les couples cuivre et zinc se succédaient dans le même ordre, l'un des métaux extrêmes était le cuivre, l'autre le zinc ; à ces deux extrémités étaient attachés des fils métalliques minces, dont l'effet de contact avec les deux métaux était négligeable par rapport à ceux de ces métaux entre eux. En réunissant ces deux fils, il obtenait un courant électrique. Dans chaque élément de cette pile, le fluide positif se développait sur le cuivre et le fluide négatif sur le zinc ; dès lors le courant allait, à l'intérieur de la pile, du zinc au cuivre, et par suite à l'extérieur, du cuivre au zinc, le cuivre constituant le pôle positif, le zinc le pôle négatif de la pile.

§ II. — COURANTS THERMO-ÉLECTRIQUES.

80. Si à l'effet du contact on ajoute celui d'une action calorifique exercée sur la surface de contact, les molécules des deux corps, situées sur cette surface, étant animées, sous cette influence, d'un mouvement circulaire plus rapide, leurs chocs mutuels sont plus in-

tenses ; par suite, leurs atmosphères sont plus troublées dans leurs densités, et un développement plus considérable d'électricité libre se produit. Dans ce cas la différence des potentiels sur les deux corps en contact est augmentée, et si l'on forme un circuit en réunissant les deux corps par un second contact où la température soit moins élevée qu'au premier, l'effet de ce second contact, qui est de sens contraire à celui du premier, ne le détruisant qu'en partie, il se forme dans le circuit un courant électrique.

Voilà donc une seconde source de courants électriques. Comme c'est, en apparence, une source purement calorifique, ces courants sont appelés courants thermo-électriques.

81. Pour les produire on réunit deux métaux différents A et B par deux soudures S, S', de manière à former un circuit. On chauffe l'une S' de ces soudures, qui se trouve ainsi à une température T', supérieure à celle T de l'autre S. Si l'on désigne par V_a et V'_a les valeurs du potentiel sur le métal A aux points S et S', et par V_b , et V'_b les valeurs sur le métal B aux mêmes points ; si l'on suppose que les deux métaux A et B sont de telle nature qu'aux points de contact le potentiel ait sur B une valeur plus grande que sur A, c'est-à-dire que les deux différences $V'_b - V'_a$, $V_b - V_a$ soient positives, c'est-à-dire que le courant parcourt le métal A en allant de S vers S' ; si de plus l'on représente par λ_a et λ_b les résistances des conducteurs A et B, et par λ la résistance totale $\lambda_a + \lambda_b$ du circuit, d'après la loi de Ohm pour les courants linéaires, l'intensité

du courant a pour expression, dans le conducteur A, $i = \frac{V_a - V'_a}{\lambda_a}$, et dans le conducteur B, $i = \frac{V'_b - V_b}{\lambda_b}$; ces deux quantités étant égales, on en déduit :

$$i = \frac{(V'_b - V'_a) - (V_b - V_a)}{\lambda},$$

et, si l'on pose $H = V_b - V_a$, $H' = V'_b - V'_a$, on obtient la formule

$$i = \frac{H' - H}{\lambda}.$$

Lorsque les deux soudures sont de même surface et à la même température, on a $H = H'$ et par suite $i = 0$, le courant est nul. Mais si la soudure S' est, comme nous l'avons admis, à une température plus élevée que S, et de même surface ou de surface plus grande, la différence H' est plus grande que H, i est positif, c'est-à-dire que le courant a bien lieu, dans A, de S à S', comme nous l'avons admis.

Ainsi, par exemple, pour le bismuth et le cuivre, le courant traverse la soudure la plus chaude, du cuivre au bismuth, parce que sur le bismuth le potentiel est plus petit que sur le cuivre, le fluide électrique positif que développe la soudure se portant sur le bismuth, et le fluide négatif sur le cuivre. — Les métaux suivants sont rangés dans l'ordre positif-négatif, du premier au dernier : bismuth, nickel, platine, palladium, cobalt, manganèse, argent, étain, plomb, rhodium, laiton, cuivre, or, zinc, fer, arsenic, antimoine.

82. Le travail des forces électro-motrices entre deux surfaces de niveau, pendant l'unité de temps, étant égal au produit de l'intensité du courant par la différence des valeurs du potentiel sur ces deux surfaces, on a, pour le travail des forces électro-motrices dans le voisinage du contact S', $i(V'_a - V'_b) = -iH'$. Il est négatif ; cela veut dire qu'il faudra placer en S' un corps extérieur K₂ à la température absolue t' qui fournisse, pendant chaque unité de temps une quantité de chaleur équivalente $Q_2 = A i H'$. A désignant l'inverse $\frac{1}{E}$ de l'équivalent mécanique de la chaleur. Au contraire, dans le voisinage du contact S, les forces électro-motrices produisent un travail positif et égal à

$$i(V_b - V_a) = iH ;$$

elles développent donc en cet endroit une quantité de chaleur $Q_1 = A i H$, qui sera absorbée par un corps extérieur K₁ à la température absolue t et placé en cet endroit. Il se dégage en outre le long des deux conducteurs A et B des quantités de chaleur égales à $A i (V_a - V'_a)$ et $A i (V'_b - V_b)$, dont la somme est $A i (H' - H) = A \lambda i^2$. Ainsi, il entre dans le circuit une quantité de chaleur Q_2 par la soudure S', et il en sort une quantité Q_1 par la soudure S. La différence $Q_2 - Q_1$ est transformée en un travail électrique, qui lui-même se change en chaleur se dégageant le long des deux conducteurs. On peut donc appliquer à cet appareil le théorème de Caruet, et l'on a $\frac{Q_2 - Q_1}{Q_1} = \frac{t' - t}{t}$ ou

$$\frac{H' - H}{H} = \frac{t' - t}{t}.$$

Si t' diffère infiniment peu de t , c'est-à-dire si $t' = t + dt$, alors $H' = H + dH$, et cette équation donne

$$\frac{dH}{H} = \frac{dt}{t} \text{ ou}$$

$$H = a t$$

le coefficient a étant un nombre constant pour deux métaux donnés.

La différence du potentiel qui s'établit au contact de deux métaux est donc proportionnelle à la température absolue du contact.

On en déduit encore

$$H' - H = H a (t' - t) \text{ et par suite}$$

$$i = \frac{a (t' - t)}{\lambda}$$

L'intensité du courant est proportionnelle à la différence des températures, qui se produisent aux deux soudures, températures qui, comme il y a des actions voltaïques de contact, sont différentes de T et T' .

C'est Socheck qui le premier réalisa les courants thermo-électriques, au moyen d'un couple de bismuth et de cuivre.

83. Si l'on forme un conducteur de deux métaux A et B en contact au point S, et qu'on fasse traverser le conducteur de A en B par un courant, que produit une cause quelconque, en désignant par V_1 et V_2 les valeurs

du potentiel aux deux extrémités de l'arc, par V_a et V_b , les valeurs de ce même potentiel sur les deux métaux au contact, on aura $i = \frac{V_1 - V_a}{\lambda_a} = \frac{V_b - V_2}{\lambda_b}$ et par suite

$$i = \frac{(V_1 - V_2) + (V_b - V_a)}{\lambda}.$$

Lorsque la différence de potentiels $V_b - V_a$ est négative, les forces électro-motrices produisent au contact un travail positif $i (V_a - V_b)$, ou une quantité de chaleur $A i (V_a - V_b)$ et l'intensité $\frac{V_1 - V_2}{\lambda}$ est diminuée. Si un réfrigérant n'enlève pas cette chaleur à chaque instant, la soudure *s'échauffe*. Au contraire, lorsque la différence $V_a - V_b$ est positive, les forces électro-motrices produisent en S un travail négatif $i (V_a - V_b)$ correspondant à l'absorption d'une quantité de chaleur $A i (V_a - V_b)$ et l'intensité $\frac{V_1 - V_2}{\lambda}$ est augmentée. Si la soudure n'est pas en communication avec une source qui lui fournisse constamment cette quantité de chaleur, la chaleur sera empruntée au conducteur lui-même et il se produira au point de contact un *abaissement* de température. — Ce phénomène a été pour la première fois observé par Peltier.

§ III. — COURANTS ÉLECTRO-CHIMIQUES.

84. Les combinaisons et les décompositions des corps, qui sont des agrégations et des désagrégations de leurs

systèmes atomiques et moléculaires, donnent lieu à des mouvements intérieurs des atomes et des molécules, qui ont pour effet d'augmenter ou de diminuer la densité moyenne des atmosphères éthérées de ces molécules, par suite, de produire de l'électricité libre. Cette électricité se distribue sur les surfaces des corps en réaction chimique, suivant les lois de l'électrostatique. Mais si ces corps font partie d'un circuit conducteur, elle y produit un courant électrique ; de telle sorte que les combinaisons et les décompositions chimiques, qui sont accompagnées de dégagement et d'absorption de chaleur donnent aussi naissance à des courants électriques.

85. Lorsqu'un liquide, renfermant en dissolution un corps composé, est traversé par un courant électrique constant, qui le décompose, ce corps, en se décomposant, absorbe une certaine quantité de chaleur, qui est produite par les forces électro-motrices. Si on appelle Q la quantité de chaleur absorbée par l'opération chimique, pendant l'unité de temps, et H l'abaissement du potentiel électrique à l'endroit où elle s'accomplit, le travail des forces électro-motrices en ce point étant $i H$, on aura l'équation $E Q = i H$.

86. Inversement, si deux corps susceptibles de se combiner sous l'influence d'un courant électrique sont placés dans un liquide traversé par un courant, leur combinaison en s'opérant dégage une certaine quantité de chaleur qui correspond à l'élévation du potentiel électrique à l'endroit où se fait la combinaison. On a encore la même relation entre la quantité Q de chaleur

dégagée et l'élévation H du potentiel, $E Q = i H$ ou $Q = A i H$.

L'expérience montre que, pour des corps donnés, les poids décomposés ou combinés sont proportionnels à l'intensité du courant. Or, la quantité de chaleur dégagée ou absorbée est évidemment proportionnelle au poids combiné ou décomposé. Donc elle est proportionnelle à l'intensité i du courant ; et comme elle est égale à $A H i$, on en conclut que la différence de potentiel électrique H est une constante pour chaque système de corps mis en présence. Ainsi des corps dissociés ou combinés produisent comme le contact de deux métaux différents, à une température et à une pression données, une variation déterminée H dans le potentiel électrique, aux points où s'opère la réaction chimique.

87. Faraday, en plaçant sur le trajet d'un même courant, à la suite l'un de l'autre, des appareils renfermant des combinaisons différentes, a reconnu que les poids décomposés sont proportionnels à leurs équivalents chimiques. La même loi se vérifie pour les corps qui se combinent sur le passage d'un courant électrique.

On peut définir, d'après cela, les équivalents électrochimiques des corps comme les poids de ces corps qui se combinent ou se dissocient, pendant l'unité de temps, sur le trajet d'un courant dont l'intensité est égale à l'unité ; ils sont proportionnels aux équivalents chimiques.

88. Si l'on considère un élément de pile alimenté par la dissolution du zinc dans un liquide acide quel-

conque, q étant la quantité de chaleur produite par la dissolution d'un kilogramme de zinc dans ce liquide, i l'intensité du courant, et a l'équivalent électro-chimique du zinc, le poids du zinc dissous est $a i$ et le travail chimique correspondant est $E q a i$. Si la pile est formée de n éléments placés les uns à la suite des autres, et traversés par le même courant, le travail chimique est $n E q a i$.

Supposons les deux pôles de la pile réunis par un fil conducteur homogène, et à la même température dans toute sa longueur, λ' étant la résistance du fil, et λ'' celle de chacun des éléments, la résistance totale du circuit sera $\lambda = \lambda' + n \lambda''$. En égalant l'action chimique de la pile à la quantité d'énergie calorifique qui se dégage dans le circuit fermé, et qui est égale au travail des forces électro-motrices et par suite à λi^2 , suivant la loi de Joule, on a $n a E q i = \lambda i^2$; d'où l'on déduit $i = \frac{n a E q}{\lambda}$ ou $i = \frac{n a E q}{\lambda' + n \lambda''}$.

Lorsque le nombre des éléments n'est pas trop grand et que la résistance $n \lambda''$ de la pile est très petite par rapport à celle du fil, on a approximativement

$$i = \frac{n a E q}{\lambda'};$$

l'intensité est alors à peu près proportionnelle au nombre des éléments et en raison inverse de la résistance du fil conducteur.

89. Si l'on considère maintenant un corps composé sur le trajet du courant et qu'on désigne par a' l'équi-

valent électro-chimique du composé dissous, et q' la quantité de chaleur nécessaire pour décomposer 1 kilogramme de ce corps, le poids décomposé pendant l'unité de temps est $a' i$, et la chaleur absorbée est $a' q' i$. L'action chimique de la pile étant égale ici à l'énergie calorifique qui se dégage dans le circuit fermé, plus celle qui a servi à décomposer le corps, on a l'équation

$$n a E q i = \lambda i^2 + a' E q' i$$

où λ désigne la résistance de *tout* circuit. On en déduit

$$i = \frac{E (n a q - a' q')}{\lambda}.$$

On voit que la présence du corps composé diminue l'intensité du courant ; elle produit en ce point un *abaissement* du potentiel électrique ; on voit ensuite que pour que le courant existe il faut que la condition $n a q > a' q'$ soit remplie, c'est-à-dire que l'action chimique de la pile soit plus grande que celle du corps composé. En augmentant le nombre des éléments de la pile, on peut toujours effectuer la décomposition.

Remarquons que les courants électro-chimiques tiennent à la fois des courants voltaïques et des courants thermo-électriques ; car dans les courants électro-chimiques il y a toujours des corps conducteurs solides et liquides en contact, et sur certains contacts, où a lieu l'action chimique, il y a ou une élévation de température ou un abaissement, suivant qu'il s'y opère une combinaison ou une décomposition, ou les deux choses à la fois.

C'est le cas de la pile à colonne, dont les rondelles de drap sont imprégnées d'eau acidulée ; outre l'effet du contact du cuivre et du zinc, il y a les effets du contact de ces deux métaux avec le liquide, et, comme effet prédominant, l'action chimique qui se produit au contact de l'eau acidulée et du zinc, consistant dans la décomposition de l'eau en ses deux éléments, oxygène et hydrogène, et dans la combinaison de l'oxygène avec le zinc et de l'oxyde de zinc formé avec l'acide, actions chimiques accompagnées d'une variation de température. C'est le cas aussi de la pile à auges, et généralement de toutes les piles. Le fluide électrique négatif que dégage le contact aidé de l'action chimique se porte toujours alors sur celui des deux corps conducteurs sur la surface de contact duquel s'opère l'action chimique du liquide.

90. Remarquons, en outre, que lorsqu'un courant préexistant rencontre sur son trajet des corps composés, susceptibles d'être décomposés, ou des corps en présence susceptibles de se combiner sous son action, il subit dans son intensité une augmentation ou une diminution due au courant que développeraient seuls dans le circuit l'action chimique et les contacts nouveaux que ces corps y introduisent.

§ IV. — COURANTS D'INDUCTION.

91. Un courant électrique constant et fixe n'exerce aucun travail sur lui-même, ni sur un autre courant,

constant et fixe, parce que la résultante des *forces électro-dynamiques* émanant de ce courant sur chacun de ces éléments ou sur chaque élément de l'autre, est normale à cet élément. Mais il n'en est pas de même si ces courants sont variables d'intensité, ou s'ils cessent d'être fixes, soit en changeant de forme, soit en se déplaçant. Dans ces cas, les forces électro-dynamiques exprimées par la formule de Weber

$$F = - m m' \left(\frac{1}{r^2} + \frac{k}{\sqrt{r}} \frac{d^2 \sqrt{r}}{dt^2} \right) \text{ où } r \text{ est à la fois}$$

fonction de $s, s', \frac{ds}{dt}, \frac{ds'}{dt}$ c'est-à-dire des arcs et des

vitesse, n'ont plus leur résultante normale à chaque élément de ce courant, ni à chaque élément du courant voisin ; cette résultante, faisant un angle aigu avec l'élément, a une composante tangentielle, qui est une *force électro-motrice*, modifiant la vitesse du fluide électrique sur cet élément, et par suite l'intensité du courant auquel il appartient. C'est là ce qui constitue l'induction du courant sur lui-même ou sur un autre courant, phénomène instantané qui accompagne l'instant où la variation d'intensité, ou la déformation, ou le déplacement relatif se produit dans le même sens.

92. Mais il y a plus ; un courant fixe dont l'intensité est variable, ou un courant qui se déforme ou se déplace, donne lieu à une force électro-motrice tangentielle dans un conduit voisin, et y développe un courant dit d'induction. C'est là une source nouvelle de courants, découverte par Faraday. Si la variation d'intensité, ou la déformation ou le déplacement du courant

inducteur sont infiniment petits, le courant induit est instantané, et cesse avec la cause qui le produit ; mais par une variation d'intensité, une déformation ou un déplacement continu du courant inducteur, le courant induit sera rendu lui-même continu, avec une vitesse variable qui pourra changer de signe.

93. Le sens du courant induit, par rapport à celui du courant inducteur, sens qui dépend de la direction de la résultante des actions électro-dynamiques exercées par le courant inducteur, sur les éléments du courant induit, peut être exprimé par la loi suivante, due à Lenz :

Le sens du courant induit est tel que l'action instantanée qu'exercerait ce courant induit sur le courant inducteur, produirait sur ce dernier une modification d'intensité, de déplacement ou de forme, contraire à celle qui a donné lieu à l'induction.

Cette loi, vérifiée par l'expérience, s'explique par la théorie mathématique de l'induction, que nous avons développée dans l'ouvrage inédit dont ces pages forment l'introduction.

D'après la loi de Lenz, lorsque le courant inducteur s'approche d'un circuit, il y induit un courant de sens contraire au sien ; et lorsque le courant inducteur s'en éloigne, le courant induit est du même sens. De même, lorsque le courant inducteur commence ou finit, et plus généralement subit une augmentation ou une diminution infiniment petite d'intensité, le courant instantané induit est de sens contraire ou de même sens.

Lorsque l'induction est due à une déformation du circuit inducteur, suivant que la déformation tend à rapprocher ou à éloigner du circuit voisin les parties du circuit inducteur qui en sont les moins distantes, le courant induit est de sens contraire à celui du courant inducteur ou de même sens.

94. Comme l'aimantation des corps est due au parallélisme des courants électriques infiniment petits que forment en tournant autour de leurs molécules, dans le même sens, les atmosphères éthérées qui les entourent, le rapprochement ou l'éloignement d'un aimant permanent d'un circuit conducteur induit dans ce circuit un courant de sens contraire ou de même sens, par rapport à ceux de l'aimant. Comme un aimant permanent peut être assimilé à un ensemble de solénoïdes, de même axe, et que l'aimantation du fer doux sous l'influence d'un aimant permanent ou d'un arc solénoïde, consiste dans l'orientation parallèle des courants électriques qui circulent dans toutes les directions autour de ses molécules, le rapprochement ou l'éloignement d'un aimant ou d'un solénoïde, d'un morceau de fer doux, y produit une diminution ou une augmentation de l'intensité de tous ces courants, c'est-à-dire un décroissement ou un accroissement de pouvoir magnétique qui constitue une nouvelle forme de l'induction ; et cette variation d'intensité magnétique est elle-même une cause d'induction dans un circuit conducteur voisin ; elle y produit un courant de même sens ou de sens contraire, par rapport à ceux de l'aimant. C'est sur cette induction que sont fondées les machines ma-

gnéto-électriques, électro-dynamiques et tous les systèmes téléphoniques.

95. L'action magnétique de la Terre étant assimilable à celle d'un vaste aimant orienté sensiblement du nord au sud, ou à celle d'un courant dirigé de l'est à l'ouest, si l'on fait occuper successivement à des circuits conducteurs des positions diverses par rapport à la Terre, ces circuits sont parcourus, à chacun de ces changements de position, par des courants induits, de sens contraire ou de même sens, par rapport au courant terrestre, suivant qu'il y a rapprochement ou éloignement. De même, le déplacement d'une tige de fer doux y produit sous l'influence terrestre, dans l'intensité de ses courants électriques moléculaires, ou dans son intensité magnétique, une variation, qui dans un circuit conducteur fixe voisin induit un courant de même sens ou de sens contraire, suivant qu'il y a diminution ou augmentation du magnétisme de la tige.

Les machines magnéto-électriques engendrent des courants induits dans une ou plusieurs bobines solénoïdales par le déplacement relatif d'un aimant et de ces bobines ; elles sont de deux sortes, selon que l'un ou l'autre de ces deux éléments est seul mobile. Dans les deux cas, c'est le travail mécanique extérieur nécessaire pour produire ce déplacement qui est transformé en courant électrique.

Les machines électro-dynamiques transforment d'abord du travail mécanique en énergie électrique, puis celle-ci en un autre travail mécanique. Elles consistent essentiellement en bobines solénoïdales que l'on

fait mouvoir avec une grande vitesse en face des branches d'un aimant (qui pourrait être remplacé, moyennant un faible courant initial produit dans les bobines, par l'aimant terrestre) et sur lesquelles se développent des courants induits qui, au moyen de fils conducteurs, peuvent être *transportés* à toute distance pour y être transformés en travail mécanique.

Le téléphone de Graham Bell, dit à aimant, consiste, d'une part, en une plaque mince de fer doux placée en regard du pôle d'une bobine solénoïdale qui entoure un aimant et fait partie d'un circuit, d'autre part, à distance, dans le circuit d'une autre bobine entourant un aimant, placée elle-même en face d'une autre plaque. La parole, articulée près de la première plaque, y produit des vibrations transversales, dont les mouvements donnent lieu dans le circuit à des courants induits, qui, agissant sur la seconde plaque, y engendrent les mêmes mouvements que ceux de la première et par suite font sur une oreille appliquée à cette plaque la même impression que la voix directe. On peut ainsi transporter la parole à toute distance avec la vitesse du courant électrique. Le circuit est formé par un fil conducteur dont les extrémités, au point de départ et au point d'arrivée, communiquent avec le sol.

Le microphone de Hughes a pour principe les inductions alternatives que produisent sur un circuit les interruptions et rétablissements successifs d'un courant inducteur, ces interruptions et rétablissements étant dues aux mouvements vibratoires qu'éprouve sous l'action d'un bruit une tige de charbon qui pose,

verticalement, par l'une de ses extrémités, et s'appuie, par l'autre, sur deux corps faisant partie du circuit inducteur. Les courants induits recueillis dans une bobine solénoïdale reproduisent sur une membrane de fer doux placée devant l'un des pôles de cette bobine les mêmes vibrations que produirait l'action directe du bruit émis sur cette membrane, et dès lors transmettent ce bruit à une oreille dirigée vers la membrane.

L'appareil d'induction qui produit les effets les plus intenses est dû au constructeur Ruhmkorff. Les courants induits qu'il donne dans un circuit solénoïdal sont développés par les alternatives rapides de rupture et de rétablissement d'un courant inducteur de même forme, produites par un interrupteur, et renforcés par l'action d'un faisceau de fils de fer doux qui est placé dans son intérieur. Sur un cylindre de bois qui contient le faisceau de fils de fer, s'enroulent d'abord le fil inducteur, puis, par-dessus, le fil induit, tous deux isolés par une enveloppe de gomme laque, le premier de 40 millimètres de longueur et de 2 millimètres de diamètre, le second de $\frac{1}{4}$ de millimètre de diamètre, et faisant de 25 à 30,000 tours autour du cylindre. *L'interrupteur*, consistant dans une enclume et un marteau levier de fer doux qui font partie du circuit, est placé de manière que la tête du marteau soit au-dessus de l'extrémité du faisceau de fils de fer saillant du cylindre, de telle sorte que, lorsque le courant commence dans le fil inducteur, il soulève par son attraction la tête du marteau, et interrompt momentanément le courant in-

ducteur, puis le laissant alors retomber, rétablit ce courant, et ainsi de suite alternativement.

96. Enfin un courant produit une induction sur lui-même, lorsqu'il varie d'intensité, et en particulier lorsqu'il s'établit ou lorsqu'il se rompt ; au moment où le courant s'établit, il se produit dans le circuit un courant induit de sens contraire, et au moment de la rupture, un courant induit de même sens ; c'est ce qu'on appelle un *extra-courant*.

97. D'après notre hypothèse sur la formation des corps, ils sont des agrégats de molécules, composées elles-mêmes d'atomes d'éther, de nombre, de volume, de forme et de mouvements divers, particuliers à chaque corps, et entourées d'atmosphères d'éther à éléments sphéroïdaux. Ces molécules, ces atomes sont animés de mouvements gyrotoires et de translation. Ces atmosphères sont en mouvement relatif de rotation autour des molécules supposées immobiles. Le nombre, la forme, le volume, le mouvement et le mode de groupement des atomes constitutifs des molécules dans les corps simples et des molécules simples dans les corps composés différencient la *nature* de ces corps. Le mode de groupement et le mouvement des molécules différencient leur *état*. Pour les corps simples, la molécule est composée d'atomes de même forme, de même volume, de même mouvement, et son atmosphère éthérée a autour d'elle une condensation moyenne constante. Pour les corps composés, les molécules simples constitutives de la molécule composée sont les unes d'une certaine forme, d'un certain volume et d'un certain

mouvement, les autres d'une autre forme, d'un autre volume et d'un autre mouvement, les premières appartenant à un certain corps simple, et les autres à un autre ; l'atmosphère de chaque molécule composée n'a plus alors une condensation constante tout autour d'elle, ce qui revient à dire que cette atmosphère est plus condensée sur un point que sur un autre, ou, en d'autres termes, que cette atmosphère comporte deux états de condensation, l'un supérieur à l'état neutre, et l'autre inférieur, correspondant aux molécules composantes de corps simples différents, ou que, dans chaque molécule composée, il y a séparation des deux fluides électriques, l'électricité positive étant sur un des corps simples et l'électricité négative sur un autre.

98. Cette considération rend compte de l'action exercée par un courant électrique qui traverse, d'une électrode à l'autre, une dissolution d'un corps composé. Chaque point de la surface de l'électrode positive en contact avec le liquide repousse le fluide positif de la 1^{re} molécule voisine du corps en dissolution ; ce fluide positif va neutraliser le fluide négatif de la 2^e, le fluide positif de cette 2^e repoussé par l'électrode va neutraliser le fluide négatif de la 3^e et ainsi de suite. Après toutes ces neutralisations, d'une électrode à l'autre, il ne restera libre, pendant le trajet du courant, que le fluide négatif de la première molécule au contact de l'électrode positive et le fluide positif de la dernière molécule au contact de l'électrode négative. Si l'on suppose, en raison de l'adhérence, que les fluides électriques, dans leurs répulsions et leurs attractions de proche en

proche, entraînent, sous l'action du courant, la portion de molécule composée qu'ils enveloppent on voit qu'à chaque instant la portion de corps simple enveloppée par le fluide électrique de signe contraire à celui de chaque électrode, dans les deux molécules extrêmes, se fixera, si elle est solide, ou se dégagera, en tout ou en partie, si elle est gazeuse, sur la surface de l'électrode voisine. C'est là le principe de la décomposition par un courant électrique des corps composés conducteurs, liquides, ou dissous dans un liquide conducteur.

Dans la décomposition de l'eau, l'oxygène se dégage sur l'électrode positive et l'hydrogène sur l'électrode négative ; l'oxygène est dit électro-négatif par rapport à l'hydrogène.

§ V. — COURANTS DUS A LA POLARISATION DES ÉLECTRODES.

99. Nous avons considéré les courants électriques comme produits par le double mouvement de même vitesse en sens contraire, dans les circuits, de masses électriques égales et de signe contraire, de telle sorte qu'en chaque point du conducteur il y a, à chaque instant, deux masses électriques de signe contraire qui en se rencontrant se neutralisent instantanément. On peut donc aussi dire qu'un courant électrique est produit, après l'orientation des atmosphères éthérées neutres des molécules du conducteur sous l'influence de la force électro-motrice, par une série successive de neutralisations du fluide libre positif de chaque molécule

et du fluide libre négatif de la molécule suivante. Ces neutralisations successives constituent comme des *ondulations* électriques qui se propagent dans le circuit avec la vitesse du courant.

100. Cette nouvelle conception du courant électrique rend compte de la décomposition des corps composés liquides ou dissous dans un liquide par un courant traversant les corps d'une électrode à une autre, comme nous venons de l'expliquer. Elle rend compte aussi du courant contraire qui se produit dans le même circuit, lorsque le premier courant est interrompu par la suppression de sa cause électro-motrice. Car des éléments électro-positifs et électro-négatifs du corps composé liquide ou dissous dans un liquide, provenant de la décomposition de ce corps, qui se portent sur les surfaces des deux électrodes en contact avec le liquide, y restent fixés plus ou moins longtemps après l'interruption du premier courant, donnent lieu à des orientations, en sens contraire, des deux masses de signe contraire de fluide libre de chaque molécule de liquide conducteur compris entre les deux électrodes, et par suite à des neutralisations successives ou à des ondulations électriques se propageant dans le liquide conducteur et, dans tout le circuit, quand il est fermé, en sens contraire du premier courant.

101. C'est là le phénomène de la polarisation des électrodes, qui est le principe des piles Planté. C'est une nouvelle source de courants électriques, qui, en vertu de leur origine, ont l'avantage de rester constants pendant un temps très long. Les électrodes du cou-

rant direct primitif sont alors, pour ainsi dire, des *emmagasineurs* ou des *accumulateurs* d'électricité dynamique.

Ces courants sont d'une intensité d'autant plus grande et d'une constance d'autant plus prolongée qu'ils proviennent d'un courant direct plus intense, et que la surface des électrodes en contact avec le liquide conducteur est plus étendue.

Les électrodes dont se sert M. G. Planté pour produire des courants secondaires sont deux lames de plomb immergées dans l'eau acidulée d'acide sulfurique. Sous l'influence d'un courant direct qui traverse le liquide et les électrodes, l'une se couvre de molécules d'hydrogène, l'autre de peroxyde de plomb. Etant ainsi chargées, puis éloignées de la pile qui a fourni le courant, elles forment comme une réserve et un magasin de force électro-dynamique. En réunissant plusieurs couples semblables par la communication des lames de même nom électrique, ou en disposant ces mêmes couples en série, par la jonction d'une lame de l'un avec la lame de nom contraire de l'autre, on a une pile secondaire chargée en tension qui fournit un courant de sens contraire à celui du courant direct générateur, lorsqu'on reforme le circuit primitif.

Les courants électriques, par la résistance qu'ils éprouvent dans leur propagation, de la part des molécules des corps plus ou moins conducteurs formant leur circuit, développent dans ces diverses portions du circuit une quantité d'énergie calorifique d'autant plus grande que cette portion est moins conductrice et a une

section orthogonale plus petite. Dans le cas où l'énergie calorifique développée est très considérable, elle donne lieu par transformation en ces points du circuit à des vibrations lumineuses qui constituent la lumière dite *électrique*. C'est ce qui a lieu lorsque, le circuit étant interrompu en un point, les deux électrodes se trouvent en regard l'une de l'autre à une certaine distance. Le courant, pour vaincre la résistance énorme que l'air interposé, peu conducteur, lui oppose, développe sur le trajet intermédiaire une énergie calorifique qui se transforme en lumière. C'est une série d'étincelles, si le gaz interposé n'est pas très raréfié, et un trait continu de lumière si le gaz est au contraire très raréfié.

Remarquons en outre que des trois conceptions différentes de la nature d'un courant électrique que nous avons admises, c'est la dernière, celle d'ondulations successives produites dans le fil conducteur par la neutralisation des deux fluides électriques d'une molécule à sa voisine, qui donne du courant électrique la notion la plus claire et la plus expressive. On peut comparer le mouvement de l'électricité dans un courant aux ondulations qui se produisent à la surface d'une nappe liquide lorsqu'elle est ébranlée sur une portion linéaire de cette surface. Ces ondulations forment de petites vagues à la surface, séparées par de petits intervalles creusés en vallée, qui se propagent par un mouvement ondulatoire de part et d'autre de la ligne d'ébranlement. Les vagues représentent le fluide positif, les creux représentent le fluide négatif. Dans cette hypothèse, les

deux fluides n'éprouvent pas d'autre transport que celui d'une molécule du conducteur à la molécule voisine suivante, pour neutraliser sur place les deux fluides.

Ces ondulations électriques se manifestent dans les gaz très raréfiés par les stratifications lumineuses qu'on y observe lorsqu'ils sont traversés par une décharge électrique.

102. Ajoutons encore, que tout ébranlement violent des molécules d'un corps, soit par le frottement ou le choc d'un autre corps contre sa surface, soit par une agrégation ou une désagrégation de ses molécules due à un changement d'état ou à une action chimique, donne lieu, en même temps qu'à une variation de l'énergie calorifique et lumineuse, à un développement d'énergie électrique.

Toutes ces causes développent à la surface de la Terre de l'électricité que l'observation constate comme positive dans son atmosphère et, par suite, négative dans sa masse.

L'air et la vapeur d'eau qui constituent cette atmosphère étant chargés constamment d'électricité, lorsque cette vapeur se condense en globules vésiculaires pour former des *brouillards* ou *nuages*, l'électricité, qui se répand d'abord sur la surface de chaque vésicule, sous l'action électrique de toutes les vésicules et de l'air intercepté, se distribue, en admettant que le nuage a une surface extérieure nette et définie, tout entière sur cette dernière surface, et y acquiert une tension électrique considérable, en proportion du nombre de globules vésiculaires que renferme le nuage. De là, si

ce nuage passe dans le voisinage d'un autre nuage aussi électrisé à sa surface, ou s'il se rapproche suffisamment du sol, il y a, par influence, composition des deux électricités contraires, par suite éclair et tonnerre. Telle était jusqu'en ces derniers temps la cause admise pour les orages.

103. Mais, comme l'a remarqué un physicien de Liège, M. Spring, si les globules d'un même nuage, recevant l'électricité de l'air où ils se forment, étaient d'abord tous électrisés dans le même sens, ils se repousseraient et se fuiraient les uns les autres ; le nuage prendrait, par conséquent, une densité de plus en plus faible, pour finir par s'évaporer complètement ; et cela est contraire à ce qui se passe en temps d'orage. De plus, un nuage n'a pas de limite *nette et définie* comme on le constate sur les *brouillards*, qui ne sont que des *nuages* reposant sur le sol ; sa surface n'est autre chose que la dégradation lente de sa masse : il n'y a pas autour d'un nuage une couche d'air sec adossée à sa surface. D'ailleurs si l'électricité s'accumulait même dans les régions extérieures du nuage, les globules d'eau de ces dernières devraient sous leur action répulsive se disperser rapidement, ou, au milieu d'un air humide, *déperdre* bientôt leur électricité qui ne pourrait ainsi atteindre une tension assez grande pour produire des étincelles ayant souvent plusieurs lieues de longueur. D'autre part, la condensation brusque de la vapeur d'eau de l'air ne peut être regardée comme l'unique cause de l'électricité du nuage orageux : il n'y aurait pas de proportionnalité entre la cause et l'effet.

Il faut donc chercher dans l'atmosphère elle-même une autre source d'électricité.

Le siège de l'électricité n'est pas à la surface des nuages, il est à la surface sèche des grêlons qui se forment dans le milieu de basse température, beaucoup au-dessous de 0°, où s'accomplit le phénomène.

Son origine se trouve dans l'anéantissement de surface libre qui accompagne la formation des grêlons, ainsi que dans le frottement de ceux-ci contre l'air *sec* qui les entoure. Les grêlons prennent l'une des deux électricités, l'air atmosphérique, qui joue le rôle de frottoir, prend l'autre. Si la vitesse de formation et la vitesse de chute des grêlons sont assez grandes, la tension électrique à la surface des grêlons peut devenir considérable ; mais elle ne peut dépasser une certaine limite au-delà de laquelle une partie des électricités contraires du frottoir et du corps frotté se recompose, comme on le reconnaît, dans les laboratoires, lorsqu'on tourne trop rapidement le plateau en verre d'une machine électrique.

Pour se rendre compte de cette double origine de l'électricité des nuages orageux, il suffit de considérer le grêlon à sa naissance, c'est-à-dire au moment où deux particules de grésil, chargées d'électricité, s'unissent par le regel (dont il sera parlé dans un chapitre suivant). Il se produit alors de nouvelles électricités, par suite de la diminution de la surface de contact des particules de givre avec l'air ; de plus, quand deux facettes de deux cristaux de grésil s'appliquent l'une sur l'autre pour se souder par le regel, il y a non-seu-

lement une diminution dans la surface de contact du grésil avec l'air, mais une véritable expulsion de l'air entre les facettes qui vont se souder. Il se produit ainsi, en réalité, une destruction de l'adhérence de l'air au grésil, pour faire place à l'adhérence de deux particules de grésil, c'est-à-dire un frottement véritable d'un gaz contre un corps solide qui a pour effet de développer de l'électricité.

D'après cela, il est évidemment nécessaire d'admettre que si une région sèche de l'air, d'une étendue considérable, est le siège, grâce à un grand abaissement de température, d'une légion de grêlons, il doit s'y produire une quantité d'électricité suffisante pour donner lieu aux phénomènes particuliers qu'on observe en temps d'orage.

Mais comment se répartit cette électricité dans un milieu semblable, où l'air sec, aussi bien que les grêlons eux-mêmes, est mauvais conducteur de l'électricité?

Comme l'indique la théorie de la distribution du fluide électrique sur les surfaces de corps voisins isolés, et comme l'a vérifié Faraday par l'expérience, si un nombre très grand de sphères électrisées sont voisines l'une de l'autre et séparées par un milieu isolant, en vertu de l'influence des sphères les unes sur les autres, celles qui forment en quelque sorte la surface de cette région prennent une charge électrique égale à la somme des charges des sphères centrales. Il en résulte que la région extérieure d'un lieu de l'atmosphère où se forment des grêlons devra acquérir une tension électrique énorme.

Les grêlons de cette région extérieure, étant électrisés de même sens, se repoussent les uns les autres ; de là, ces mouvements désordonnés que l'on observe au moment où les grêlons sortent des nuages.

Si le lieu de la production de l'électricité est assez éloigné du sol, et surtout si la différence de tension entre l'électricité du sol et celle de même sens des grêlons est faible, la décharge électrique a lieu dans l'atmosphère, entre l'air sec et les grêlons ; c'est le cas général. Dans le cas contraire, plus rare, une décharge se fait entre les parties élevées du sol et la région des grêlons électrisés.

Comme la tension électrique des grêlons dépend de leur vitesse et doit par conséquent varier d'un lieu à l'autre, la décharge ne se fait pas, généralement, dans une région rectiligne ou plane, mais parcourt une ligne quelconque, un zigzag, par exemple.

Ainsi, en résumé, l'apparition d'un orage est subordonnée à une condensation brusque de la vapeur d'eau de l'atmosphère, non pas à l'état de *brouillard*, mais à l'état de *grésil sec*. La source de l'électricité est dans les ruptures d'adhérence de l'air sec aux particules du grésil, et dans l'anéantissement de surface libre des cristaux de grésil produit par leur réunion en grêlons. L'électricité accumulée sur chaque grêlon est portée ensuite sur les grêlons formant la limite de la région glacée.

En été, les orages doivent avoir leur siège dans les régions les plus élevées de l'atmosphère, tandis qu'en hiver ils se rapprochent d'avantage du sol. C'est ce qui explique le danger plus grand des orages d'hiver.

104. Dans les régions froides du nord où les courants d'air régnants n'ont pas une grande différence de température, la production de l'électricité ne se fait pas instantanément, mais lentement. La décharge électrique n'est pas brusque alors, mais lente et silencieuse : il se produit alors une *aurore boréale*.

L'apparition des aurores boréales est accompagnée, le plus souvent, de *gelées blanches et de chutes de neige*. Cette circonstance prouve la coexistence des aurores et des particules *glacées* dans l'atmosphère.

Les mouvements des fluides électriques, qui donnent lieu aux décharges lentes caractérisant les aurores boréales, constituent des courants instantanés qui agissent sur les courants électriques moléculaires de la Terre, et par suite, produisent des variations dans son état magnétique, se traduisant par des mouvements de déclinaison et d'inclinaison de l'aiguille aimantée ou boussole.

105. Aux sources d'énergie électrique, que nous avons déjà signalées, savoir, le frottement, le choc des corps les uns contre les autres, le contact intime de deux corps hétérogènes, les actions chimiques de toutes sortes : combinaison, décomposition, dissolution, liquéfaction, vaporisation et les changements d'état inverses, il faut joindre l'anéantissement de surface libre de corps électrisés, la capillarité, l'osmose, l'imbibition, la diffusion, dans lesquelles le développement de l'électricité est dû à une action de contact accompagnée d'un changement de surface libre et de contact.

Toutes les fois que l'on électrise la surface libre d'un liquide, courbée par la capillarité, elle change de

forme ; et réciproquement, lorsque par des moyens mécaniques on change la forme d'une telle surface, on y développe de l'électricité.

C'est sur ce principe que M. Lippmann a construit une machine électro-capillaire réversible et un électromètre capillaire extrêmement sensible. La machine développe du travail mécanique et fonctionne comme moteur, lorsqu'on y applique un courant électrique. Mue par la main, elle devient électro-moteur.

M. Gove a montré que ce même phénomène se manifeste entre deux liquides en contact ; leurs limites se modifient par l'électrisation.

106. Enfin, le courant électrique n'a pas, à proprement parler, de vitesse *déterminée*, puisque l'apparition d'une commotion électrique à l'extrémité d'un fil conducteur dépendant de la production d'une décharge à l'autre extrémité, le temps nécessaire à cette apparition dépend à la fois de la *capacité électrique* du conducteur et de sa *résistance* (la *capacité électrique* étant le quotient de la masse électrique répandue sur la surface d'un conducteur en communication avec une source électrique divisée par le potentiel). Comme chacune de ces quantités est directement proportionnelle à la longueur du conducteur, il s'ensuit que le temps de la transmission varie selon le carré de cette longueur.

Wheatstone ayant trouvé, par une expérience, qu'il faut à l'électricité environ un millionième de seconde pour traverser 400^m d'un certain fil métallique, en concluait qu'elle traverserait 400,000 kilomètres de ce fil

par seconde. C'était une erreur ; car on reconnaît facilement que dans les conditions où il a opéré le chemin parcouru aurait, en vertu de la loi ci-dessus, été seulement, dans une seconde, de 2 k. 5.

Gaugain a mesuré le temps de la transmission du courant électrique dans un fil de coton de 1^m,65 de long ; il a trouvé 11 secondes. Deux fils semblables, placés à la suite l'un de l'autre, formant ainsi un conducteur deux fois plus long, ont exigé 44 secondes pour le passage du courant, c'est-à-dire quatre fois autant, suivant la loi ci-dessus. Dans le fil le plus court, la vitesse apparente n'est en moyenne que de 0^m,15 par seconde, et dans le plus long, elle n'est évidemment qu'environ la moitié de cette moyenne.

D'où l'on voit que la vitesse de l'électricité est une chose variable suivant la nature, la longueur et l'épaisseur du fil conducteur.

Cependant il n'est pas rare de lire et d'entendre dire que l'électricité a une vitesse, comparable à celle de la lumière, de 300,000 kilomètres à la seconde. Cette idée préconçue vient sans doute de l'ancienne hypothèse des particules lumineuses, calorifiques, électriques, qu'on supposait lancées dans l'espace et à travers les corps, avec une vitesse presque infinie.

CHAPITRE IX.

Différents états des corps.

§ 1^{er}. — ÉTAT GAZEUX.

107. Au lieu de supposer que les molécules des gaz gravitent autour de positions d'équilibre, comme celles des corps solides et liquides, on admet aujourd'hui, d'après J. Bernoulli, qu'elles sont animées de mouvements de translation très rapides, rectilignes et uniformes, dans toutes les directions autour de chaque point, comme nous l'avons déjà admis pour les atomes de l'éther.

108. Dans cette manière d'envisager les gaz, la pression qu'un fluide gazeux exerce contre la paroi du vase qui le contient est due aux chocs répétés et multipliés de ses molécules contre tous les points de cette paroi.

En calculant cette pression p pour un volume v , on trouve, d'après Clansius, $p v = \frac{2}{3} \Sigma \frac{m u^2}{2}$, u désignant la vitesse de translation d'une molécule m , la somme Σ s'étendant à toutes les molécules renfermées dans le volume v .

En effet, si l'on considère, dans cette masse de gaz, la portion qui est comprise entre deux plans parallèles

P, Q, situés à la distance très petite a , et qu'on y suppose un certain nombre de molécules de masses différentes m , se mouvant en chaque point avec des vitesses différentes u dans toutes les directions, une molécule de vitesse u et d'angle de direction φ avec la normale aux plans, venant dans son mouvement choquer le plan P, s'y réfléchit, va choquer ensuite le plan Q, s'y réfléchit, et revient choquer le plan P, et ainsi de suite ; l'intervalle de temps écoulé entre deux chocs consécutifs sur le plan P est $\frac{2 a}{u \cos \varphi}$; de sorte que le nombre des chocs de la molécule sur ce plan, pendant le temps θ , est $\frac{\theta u \cos \varphi}{2 a}$. Si l'on désigne par f la réaction du plan sur cette molécule, comme on a $m \frac{d u}{d t} \cos \varphi = f$, pendant la durée du choc, ou en intégrant, $2 m u \cos \varphi = \int f d t$, on obtient pour tous ses chocs sur le plan P, dans le temps θ ,

$$2 m u \cos \varphi \frac{\theta u \cos \varphi}{2 a} = \int f f d t,$$

$$\text{ou } \frac{m u^2 \cos^2 \varphi}{a} \theta = \int f f d t,$$

et pour l'ensemble des molécules

$$\Sigma \frac{m u^2 \cos^2 \varphi}{a} \theta = \Sigma \int f f d t = F \theta.$$

$$\text{ou } \Sigma \frac{m u^2 \cos^2 \varphi}{a} = F,$$

F étant la réaction du plan P sur l'ensemble des mo-

lécules, et le signe Σ s'étendant aux diverses molécules comprises entre P et Q.

Or, si l'on désigne par $\Sigma_1 \frac{m u^2}{2}$ la somme des forces vives des molécules dont les vitesses forment avec la normale des angles compris entre φ et $\varphi + d\varphi$, et entre $\pi - \varphi$, et $\pi - \varphi - d\varphi$,

$$\text{on a } \frac{\Sigma_1 \frac{m u^2}{2}}{\Sigma \frac{m u^2}{2}} = \frac{2 \cdot 2 \pi \sin \varphi d\varphi}{4 \pi} = \sin \varphi d\varphi ;$$

$$\text{d'où } \Sigma_1 \frac{m u^2 \cos^2 \varphi}{a} = \Sigma \frac{m u^2}{2} \cdot \frac{2}{a} \cos^2 \varphi \sin \varphi d\varphi,$$

et, par suite,

$$\Sigma \frac{m u^2 \cos^2 \varphi}{a} = \frac{2}{a} \Sigma \frac{m u^2}{2} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos^2 \varphi \sin \varphi d\varphi,$$

$$\text{ou } F = \frac{2}{3 a} \Sigma \frac{m u^2}{2}.$$

En appelant ω la surface de chacun des plans P et Q, et v le volume de gaz qu'ils renferment entre eux, on a $p = \frac{F}{\omega}$ et $v = a \omega$; d'où il résulte $p v = \frac{2}{3} \Sigma \frac{m u^2}{2}$.

Si n est le nombre des molécules, $\frac{\Sigma m}{n}$ est la masse moyenne m_1 de ces molécules. Si l'on pose ensuite $n \frac{m_1 u_1^2}{2} = \Sigma \frac{m u^2}{2}$, u_1 peut être regardé comme leur vitesse moyenne, et on peut alors écrire la formule précédente sous la forme

$$p v = \frac{n m_1 u_1^2}{3}.$$

On a d'ailleurs, d'après les lois de Mariotte et de Gay-Lussac, $p v = \frac{1}{273} p_0 v_0 t$, t désignant la température absolue, c'est-à-dire la température comptée à partir du degré — 273° centigrade, et p_0, v_0 la pression atmosphérique normale et le volume à la température de la glace fondante.

Il en résulte

$$\Sigma \frac{m u^2}{2} = \frac{3}{2} \frac{1}{273} p_0 v_0 t = \frac{n m_1 u_1^2}{3};$$

d'où l'on peut déduire la valeur de la vitesse moyenne u_1 des molécules du gaz.

On a en effet, pour un poids 1 de gaz, $n m_1 = \frac{1}{g}$,
 $p_0 = 10333$, $g_0 = \frac{0,7733}{\epsilon}$, ϵ étant la densité du gaz par rapport à l'air, $g = 9,8096$, $t = 273$; par suite
 $u_1 = 485 \sqrt{\frac{1}{\epsilon}}$. On trouve :

- pour l'air $u_1 = 485^m$,
- l'oxygène $u_1 = 461^m$,
- l'azote $u_1 = 492^m$,
- l'hydrogène $u_1 = 1848^m$.

Si l'on suppose que deux gaz différents soient mélangés, sans travail extérieur, et sans action chimique réciproque, la force vive du mouvement de translation des molécules du mélange sera égale à la somme des forces vives de ceux des deux gaz.

En désignant par $\Sigma \frac{m' u'^2}{2}$, $\Sigma \frac{m'' u''^2}{2}$ les forces vives des deux gaz, et par $\Sigma \frac{m u^2}{2}$ la force vive du mélange, on aura $\Sigma \frac{m u^2}{2} = \Sigma \frac{m' u'^2}{2} + \Sigma \frac{m'' u''^2}{2}$.

Si le premier gaz occupait seul le volume v du mélange, il exercerait une pression donnée par l'équation

$p' v = \frac{2}{3} \Sigma \frac{m' u'^2}{2}$. De même, si le second gaz occupait seul le même volume, il exercerait une pression

p'' donnée par l'équation $p'' v = \frac{2}{3} \Sigma \frac{m'' u''^2}{2}$. Or, en

appelant p la pression exercée par le mélange, on a

$$p v = \frac{2}{3} \Sigma \frac{m u^2}{2}.$$

On en déduit la relation $p v = p' v + p'' v$, ou $p = p' + p''$.

La pression du mélange est égale à la somme des pressions qu'exerceraient les gaz, si chacun d'eux occupait seul le volume du mélange.

109. Dans la réalité (comme nous l'avons déjà dit pour l'éther), chaque molécule d'un gaz, en vertu des chocs qu'elle subit de la part des molécules qu'elle rencontre, décrit une trajectoire en zigzags rectilignes à éléments plus ou moins grands, suivant la densité du gaz. Quand le gaz est très raréfié, comme celui qui reste dans le vide pneumatique, comme ceux qu'a obtenus Crookes pour ses expériences radiométriques et électriques, cette trajectoire est rectiligne sur une étendue relativement considérable. Dans ce cas la ma-

tière pondérable affecte un état particulier, jouissant de propriétés particulières, qu'on appelle *état radiant*. Ce n'est pas le vide absolu, dans lequel il n'y a que la matière éthérée impondérable, mais c'est un état intermédiaire entre la matière pondérable et la matière impondérable, qui est rendu sensible par des manifestations lumineuses, calorifiques et électriques. On peut le considérer comme un nouvel état de la matière autre que l'état gazeux, l'état liquide, l'état solide. La matière éthérée libre est le dernier terme de cette série. Elle est la source de toutes les manifestations qui se produisent dans tous les états de la matière pondérable.

Mais, de même que dans les corps l'éther se condense pour former autour des molécules de ces corps des atmosphères, on doit admettre qu'autour de tous les corps et, en particulier, des corps célestes, il y a aussi une atmosphère de densité moyenne et d'épaisseur différentes, suivant la nature et l'état du corps, d'éther condensé qui les enveloppe.

La condensation de cet éther et son élasticité augmentent ou diminuent suivant que la force vive de ses atomes diminue ou augmente. Les variations de force vive se manifestent par des effets lumineux et calorifiques.

Cet éther condensé peut ainsi être considéré comme un nouvel état intermédiaire de la matière, que nous appellerons *l'éther condensé lumineux*.

Dans la théorie de l'électricité nous avons reconnu qu'il s'exerce entre cet éther condensé et la matière

pondérable une action attractive, et entre ses éléments une action répulsive, actions qui sont proportionnelles aux masses et en raison inverse du carré de la distance.

C'est cette matière condensée lumineuse qui constitue certaines nébuleuses non résolubles en étoiles, la lumière zodiacale, et la queue des comètes, comme nous l'avons montré dans deux notes relatives aux comètes que nous avons présentées à l'Institut à l'occasion de l'apparition de la grande comète de 1881.

Les comètes, comme tous les corps célestes, étant entourées d'une atmosphère d'éther condensé, d'une densité moyenne et d'une épaisseur particulières, lorsqu'elles s'approchent du soleil, la matière éthérée condensée lumineuse, qui constitue la lumière zodiacale, exerce sur les éléments de leur atmosphère une action répulsive qui n'est contre-balancée qu'en partie par l'action attractive de la masse pondérable du soleil.

L'éther condensé zodiacal reçoit ses variations de force vive, ou sa lumière, de la force vive même du soleil. L'atmosphère condensée d'éther des comètes, qui ne devient lumineuse qu'à l'approche du soleil, emprunte ses variations de densité ou de force vive atomique, qui la rendent lumineuse, à l'action répulsive émanant de l'éther zodiacal, qui produit, par la dilatation, son allongement en queue opposée au soleil.

Si, pour les planètes, le même effet ne se produit pas ou n'est pas apparent, c'est, sans doute, qu'en raison de leur nature et de leur état, leurs atmosphères d'éther condensé ont une densité moyenne trop faible et une épaisseur trop petite.

Il n'est pas besoin de faire remarquer que la matière éthérée qui constitue la queue des comètes, lorsqu'elle se trouve réduite, par la dilatation, à une condensation infiniment faible, se comporte comme la matière éthérée libre, c'est-à-dire qu'elle n'est pas soumise, surtout dans la partie extrême de la queue, à l'action de la gravitation, et qu'alors l'objection dynamique faite à l'hypothèse d'une queue formée de matière pondérable ne peut être appliquée à cette matière éthérée infiniment peu condensée, en laquelle nous faisons consister la queue des comètes.

Quant à la tête des comètes, elle est formée d'un noyau en partie solide, liquide, gazeux, comme toutes les planètes, et d'une atmosphère gazeuse plus ou moins épaisse. Mais, lorsque dans leur gravitation autour du soleil, elles s'approchent de cet astre, leur atmosphère gazeuse, sous sa puissante action attractive, prend une forme ellipsoïdale allongée dans le sens du rayon vecteur, qui donne lieu, du côté du soleil, à ce qu'on appelle leur *chevelure*, et, du côté opposé, à la portion de la queue attenante à la tête, dans lesquelles la photographie décèle des rayons divergeant de la surface de la tête, et l'analyse spectrale révèle l'existence de certains corps gazeux, entre autres, des vapeurs de sodium, des carbures d'hydrogène et du cyanogène, et qui réfléchissent les rayons du soleil. Le reste épanoui de la queue présente une apparence toute différente : pas de lumière réfléchié ; dès lors, pas de matière pondérable ; la lumière des étoiles vues à travers n'est en aucune façon modifiée par elle, ni pour l'intensité ni

pour la direction. Le mouvement qu'elle exécute autour du soleil, en conservant toujours une direction opposée, malgré sa distance énorme de cet astre, ne peut s'expliquer dynamiquement par la gravitation d'une matière pondérable, et ne peut être comprise que dans l'hypothèse que nous avons faite d'une matière éthérée condensée, repoussée par l'atmosphère zodiacale du soleil, et rendue lumineuse par cette action répulsive même, qui décroît suivant la raison inverse du carré de la distance, et dès lors produit, à toutes les distances, un effet sensible à notre œil, seulement quand la tête n'est pas trop éloignée du soleil.

110. La *répulsion intermittente* des molécules d'un fluide, produite par les chocs qu'elles reçoivent des molécules voisines dans leurs mouvements, peut, comme nous l'avons déjà dit, être remplacée idéalement par une *répulsion permanente* entre les molécules supposées immobiles dans des positions moyennes d'équilibre, répulsion dépendant de leur distance suivant une certaine loi.

Si l'on admet que cette *force répulsive* varie en raison inverse de la distance, avec un coefficient proportionnel à la température absolue, on rend compte, pour les gaz, des lois de Mariotte et de Gay-Lussac. Il suffit, en effet, de concevoir que les molécules du gaz sont distribuées régulièrement suivant trois directions rectangulaires, c'est-à-dire qu'elles sont situées aux sommets de cubes égaux juxtaposés.

Si l'on désigne par a le côté du cube élémentaire, on voit immédiatement que la résultante F des actions

répulsives de toutes les molécules situées d'un côté d'un plan, sur une molécule m située dans ce plan, est exprimée par la formule $F = \frac{m^2}{a} \Sigma \left(\frac{\cos \omega}{l} \right)$, la somme Σ s'étendant à toutes les molécules, ω étant l'angle du rayon vecteur, mené à ces molécules du point m , avec la normale au plan, et l un nombre entier. Cette somme est une fonction k de la température, indépendante de a . Or, sur une surface de 1^{mq} le nombre des molécules étant $\frac{1}{a^2}$, la pression p que supporte cette surface est $p = F \cdot \frac{1}{a^2} = \frac{k m^2}{a^3}$. On a donc $p a^3 = k m^2$; et si l'on considère une masse gazeuse pesant un kilogramme, enfermée dans un cube de côté b , comme le nombre des molécules qu'elle renferme est $n = \left(\frac{b}{a} \right)^3 = \frac{v^3}{a^3}$, et que $n m g = 1$, il en résulte $p v = \frac{k m}{g}$. C'est là l'expression de la loi de Mariotte; et si k est supposé proportionnel à la température absolue, c'est en même temps la loi de Gay-Lussac.

111. Cette conception d'un milieu idéal formé de molécules immobiles dans leurs positions d'équilibre, et exerçant les unes sur les autres une force répulsive fonction de la distance, sert de base à la théorie mathématique des ondulations.

Le calcul indique que s'il y a un centre d'ébranlement dans un pareil milieu, supposé isotrope, il s'y forme trois sortes de vibrations, une longitudinale et deux trans-

versales, qui se propagent, autour de ce centre, avec des vitesses différentes. Quand la force répulsive moléculaire est inversement proportionnelle à la distance, comme dans les gaz, les vibrations transversales sont insensibles, il ne s'y propage que des vibrations longitudinales, qui donnent lieu au phénomène du son. Dans l'éther, la force répulsive doit suivre une loi différente, puisque ce milieu transmet les vibrations transversales auxquelles sont dus les phénomènes de lumière et de chaleur rayonnante. La théorie mathématique de la lumière montre que la force répulsive qui s'exerce entre les atomes d'éther, supposés immobiles, doit être de l'ordre de la sixième puissance de l'inverse de la distance.

112. On a observé, comme nous l'avons déjà dit, que deux gaz simples se combinent entre eux dans un rapport simple de volumes, et que si le composé est gazeux, il existe aussi un rapport simple entre le volume du gaz obtenu et celui des gaz combinés. On a été amené, d'après cela, à penser que des volumes égaux de gaz simples, à la même température et sous la même pression, renferment le même nombre de molécules. Il en résulte que si l'on considère deux gaz simples différents qui, à la même température t , occupent le même volume spécifique v , sous la même pression p , comme $p v = \frac{n m u^2}{3} = \frac{n' m' u'^2}{3}$, et $n = n'$, on a $\frac{m u^2}{2} = \frac{m' u'^2}{2}$. Cette force vive étant en outre

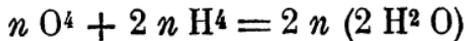
proportionnelle à la température absolue, on a donc pour deux gaz simples à la même température

$$\frac{m u^2}{2} = \frac{m' u'^2}{2} = \lambda t,$$

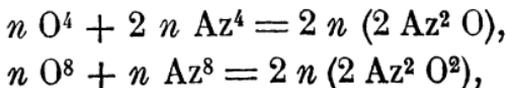
c'est-à dire, que la force vive de translation d'une molécule est la même dans l'un et l'autre gaz, et proportionnelle à la température absolue.

On peut donc dire que deux gaz simples sont à la même température, quand leurs molécules possèdent la même force vive de translation.

Dans les gaz composés, la force vive de translation des molécules est aussi proportionnelle à la température absolue pour un même gaz, mais elle n'est pas la même pour tous, et elle diffère de celle des gaz simples. En effet la relation



montre que dans le volume 1 de vapeur d'eau il y a n molécules, tandis que dans le volume 1 d'oxygène ou d'hydrogène il y en a $4 n$, et que, par suite, la molécule de vapeur d'eau dans les mêmes conditions de pression et de température, a une force vive quatre fois plus grande que celle de la molécule d'oxygène. De même pour le protoxyde et le bioxyde d'azote, l'acide chlorhydrique, l'acide sulphydrique, l'ammoniaque, le chlorhydrate d'ammoniaque, d'après les relations de volumes



$$n \text{ Cl}^8 + n \text{ H}^8 = 2 n (2 \text{ H}^2 \text{ Cl}^2),$$

$$n \text{ S}^4 + 2 n \text{ H}^4 = 2 n (2 \text{ H}^2 \text{ S}),$$

$$n \text{ Az}^8 + 3 n \text{ H}^8 = 2 n (4 \text{ Az H}^3),$$

$$2n(2 \text{ Cl}^2 \text{ H}^2)^2 + 2n(4 \text{ Az H}^3)^2 = 4n(2 \text{ Cl}^2 \text{ H}^2 + 4 \text{ Az H}^3),$$

la force vive des molécules est 4 fois, 8 fois, 8 fois, 4 fois, 8 fois plus grande que celle de la molécule d'oxygène, 2 fois plus grande que celle de la molécule d'acide chlorhydrique.

§ II. — DISSOLUTION DES GAZ DANS LES LIQUIDES.

113. Lorsqu'un gaz est en contact avec un liquide, les molécules qui frappent de leurs chocs la surface, pénètrent en partie dans la masse et s'y dissolvent. A mesure que cette dissolution s'effectue, il y a dégagement de chaleur.

Soit, en effet, un volume u de liquide en contact, à la température absolue t , avec un gaz sous la pression p ; il tient en dissolution un volume αu , de ce gaz mesuré sous cette pression p , α désignant le coefficient de solubilité du gaz dans le liquide à la température t . Soit v le volume du gaz non dissous. On a $p(v + \alpha u) = k t$, d'après les lois de Mariotte et de Gay-Lussac, k étant une constante propre à cette masse gazeuse.

Si le volume v éprouve un accroissement infiniment petit $d v$, par suite d'une diminution de pression, la température restant constante, la quantité de chaleur nécessaire pour produire cette transformation élémen-

taire *réversible* est égale à $l dv$, l ayant la valeur $A t \frac{dp}{dt}$,

où $\frac{dp}{dt}$ se déduit de l'équation précédente, dans laquelle

$v + u$ doit être supposé constant. — Pour le reconnaître, il suffit d'appliquer les deux principes fondamentaux de la thermodynamique, l'un exprimé par la formule $dQ = c dt + l dv$, l'autre par la formule $\frac{dQ}{t} = d\mu$, d'où résulte, comme nous l'avons vu,

le théorème de Carnot, relatif à un cycle formé de deux lignes *isothermes* et de deux lignes de *nulle transmission*.

D'abord, comme t reste *constant*, la première formule donne $dQ = l dv$.

Si l'on représente la transformation par une courbe en prenant p et $v + u$ comme variables indépendantes, elle sera figurée par une ligne *isotherme* MN infiniment petite, correspondant à la valeur constante t de la température. Comme la transformation est réversible, on peut considérer le cycle infiniment petit formé de cette ligne MN , de la ligne *isotherme* PQ correspondant à $t + dt$, et de deux lignes de *nulle transmission* qui relie N à P et Q à M . De M à N la quantité de chaleur absorbée étant q_1 et de P à Q la quantité de chaleur dégagée étant q_2 , $q_2 - q_1$ est la quantité de chaleur consommée en travail extérieur. Elle est égale à l'aire du parallélogramme $MNPQ$ multipliée par A . Cette aire est égale à $d v$ multiplié par la différentielle de p prise relativement à t , $v + u$

restant constant, c'est-à-dire, par $\frac{dp}{dt} dt$; d'après le théorème de Carnot $\frac{q_2 - q_1}{q_1} = \frac{dt}{t}$; d'ailleurs q_1 est égal à $l dv$. Il en résulte

$$A \frac{\frac{dp}{dt} dt dv}{l dv} = \frac{dt}{t}; \text{ d'où } l = A t \frac{dp}{dt} \text{ et par suite}$$

$dQ = A t \frac{dp}{dt} \cdot dv$, $\frac{dp}{dt}$ étant déduit de la relation $p(v + \alpha u) = kt$, dans laquelle on suppose $v + u = \text{const.}$ On trouve,

$$dQ = A p dv + A m k t^2 \frac{dv}{(v + \alpha u)^2}$$

si l'on pose $m = -\frac{d\alpha}{dt} - (\alpha - 1)\delta$, où δ est le coefficient de dilatation $\frac{1}{u} \frac{du}{dt}$ du liquide à la température t .

Le premier terme de la valeur de dQ représente la chaleur consommée par le travail extérieur pendant l'expansion élémentaire du gaz; par suite, le second terme représente la chaleur consommée par le travail intérieur, lorsque le gaz se sépare partiellement du liquide dissolvant pendant cette expansion, *sans que la température varie.*

L'intégration de cette équation donne pour la quantité de chaleur qu'il faut communiquer à la dissolution et au gaz non dissous pour amener la pression de la va-

leur p à la valeur inférieure p_1 , en maintenant la température t constante,

$$Q = A k t \log \left(\frac{p}{p_1} \right) + A k u t (p - p_1).$$

Cette quantité de chaleur est égale à la chaleur dégagée dans l'opération inverse, où l'on ferait croître la pression du gaz non dissous de p_1 à p , en maintenant également la température constante. C'est le cas où, la pression p du gaz augmentant par la diminution du volume v , la dissolution du gaz se produit dans le liquide.

Ainsi, dans le premier cas, il y a absorption de chaleur du dehors, et dans le second, dégagement de chaleur au dehors.

§ III. — ÉTAT SOLIDE ET ÉTAT LIQUIDE.

114. L'état solide et l'état liquide des corps se distinguent de l'état gazeux en ce que leurs molécules, qui sont en mouvement et s'entrechoquent, comme celles des gaz, décrivent des trajectoires fermées très petites d'une amplitude qui ne dépasse pas la distance de deux molécules voisines, et en ce que les répulsions intermittentes de leurs molécules, produites par leurs chocs, s'y traduisent idéalement par une action répulsive, permanente, entre ces molécules, supposées immobiles dans leurs positions d'équilibre, qui est une fonction de leur distance r décroissant très rapidement

lorsque r augmente, jusqu'à devenir nulle pour un rayon d'activité excessivement petit.

C'est cette force répulsive, moléculaire et atomique, qui explique, d'une part, les phénomènes d'élasticité et de capillarité, et d'autre part, les actions et réactions chimiques dans les corps.

Tant que l'état solide d'un corps subsiste, la trajectoire de chaque molécule peut se resserrer ou s'élargir, mais sans jamais cesser d'être fermée et d'être comprise entre les mêmes molécules voisines.

115. Dans l'état liquide, au contraire, qui est intermédiaire entre l'état gazeux et l'état solide, la vitesse de translation des molécules, qui n'est pas assez grande pour séparer les molécules les unes des autres, comme dans l'état gazeux, peut le devenir assez, sous de certaines influences extérieures, pour que chaque molécule, après être restée comprise dans le voisinage d'un groupe de molécules, s'en écarte, et vienne occuper une position semblable au milieu d'un autre groupe.

CHAPITRE X.

Changements d'état des corps.

§ 1^{er}. — FUSION ET SOLIDIFICATION.

116. Lorsque, sous l'influence de la chaleur, le mouvement des molécules d'un corps solide s'est tellement accéléré qu'elles tendent à prendre la mobilité relative qui caractérise l'état liquide, à ce moment une addition nouvelle de chaleur cesse d'augmenter l'énergie calorifique, c'est-à-dire d'accroître la température, elle se transforme en *travail intérieur*, correspondant à la désagrégation moléculaire qui caractérise le passage de l'état solide à l'état liquide. Cette chaleur, transformée ainsi en travail intérieur, est ce qu'on appelle la *chaleur latente de fusion*.

La *température de fusion* d'un corps solide dépend de la pression qu'il supporte, c'est une fonction de la pression : $t = F(p)$.

Le passage inverse du corps de l'état liquide à l'état solide, ou sa solidification, transforme au contraire, par la réagrégation des molécules qui se produit dans ce changement, du *travail intérieur* en énergie calorifique, qui se manifeste par un dégagement de chaleur.

Si L désigne la quantité de chaleur latente de fusion

pour un kilogramme du corps sous la pression p , à la température t , cette même quantité L est aussi celle de la chaleur de solidification, si la solidification s'opère à la même température t , ce qui a lieu normalement. Mais, lorsque le corps est maintenu, par un moyen quelconque, sous la forme liquide, à une température inférieure à t , la chaleur dégagée par la solidification ainsi retardée est plus faible, en général, que la chaleur latente de fusion, en vertu de l'excès de la chaleur spécifique du corps à l'état liquide sur sa chaleur spécifique à l'état solide, comme on le reconnaît aisément.

117. Si l'on considère un mélange de liquide et de solide du poids de 1 kilogramme, en désignant par u et u' les volumes spécifiques du liquide et du solide, par L la chaleur latente, par p la pression et par t la température absolue, on a la relation

$$\frac{L}{t} = A (u - u') \frac{d p}{d t}.$$

En effet, x désignant le poids du solide, une transformation infiniment petite qui fait passer le mélange de l'état (t, x) à l'état $(t + d t, x + d x)$, est exprimée par la formule

$$d Q = (1 - x) \left(C + h \frac{d p}{d t} \right) d t + \left(C' + h' \frac{d p}{d t} \right) d t - L d x,$$

ou, en posant $C + h \frac{d p}{d t} = m$, $C' + h' \frac{d p}{d t} = m'$,

$$d Q = \left(m + (m' - m) x \right) d t - L d x.$$

On a d'ailleurs

$$p \, d v = p \, d [u + (u' - u) x] = p \left(\frac{d u}{d t} + x \frac{d (u' - u)}{d t} \right) d t + p (u' - u) \, d x.$$

Dès lors, la première équation fondamentale $d Q = A (d U + p \, d v)$ de la théorie mécanique de la chaleur donne l'équation

$$A \, d U = \left(m + (m' - m) x - A p \frac{d u}{d t} - A p x \frac{d (u' - u)}{d t} \right) d t - \left(L + A p (u' - u) \right) d x,$$

et, le second membre étant une différentielle exacte, on en déduit

$$- \frac{d L}{d t} + m - m' = A (u' - u) \frac{d p}{d t}.$$

Mais, en vertu de la seconde équation fondamentale

$$\frac{d Q}{t} = d \mu, \text{ on a } \frac{d L}{d t} = \frac{m - m'}{t}; \text{ donc, en élimi-}$$

nant $m - m'$ entre ces deux dernières équations on a la formule

$$\frac{L}{t} = A (u - u') \frac{d p}{d t}.$$

Comme la plupart des corps se dilatent en se liquéfiant, $u - u'$ est positif; par suite, en vertu de cette formule, $\frac{d p}{d t}$ est aussi positif, c'est-à-dire que la tem-

pérature de fusion normale est d'autant plus élevée que la pression est plus forte. Ainsi des roches soumises, à l'intérieur de la terre, à une énorme pression, peuvent rester solides à une très haute température.

118. Mais il y a quelques corps, et la glace est de ce nombre, qui se contractent en se liquéfiant. Alors $u - u'$ est négatif, par suite aussi $\frac{d p}{d t}$: la température de fusion est alors d'autant plus basse que la pression est plus forte.

Ainsi de la glace soumise à une forte pression peut se fondre à une température inférieure à 0°. Si la pression p est 1 atmosphère, comme

$$t = 273, L = 79,25, u = 0,001, u' = \frac{1}{923},$$

$$\text{on a } \frac{d t}{d p} = - 0,007.$$

Donc, à un accroissement de pression de 1 atmosphère correspond un abaissement de 0°,007 environ dans la température de fusion de la glace. C'est ce qu'a vérifié l'expérience ; car on a pu, en exerçant une pression considérable sur la glace, abaisser sa température de fusion à — 18°.

Réciproquement, quand la pression diminue, la température de fusion de la glace devient plus élevée.

M. Helmholtz l'a vérifié, en plaçant dans un vase qui renfermait de la glace fondante à l'air libre un vase métallique qui contenait de l'eau et dans lequel le vide était fait partiellement. Il a constaté la formation de

cristaux de glace dans le vase métallique, tandis que la glace fondait à l'extérieur ; ce qui prouvait que l'eau de ce vase, sous une pression moindre qu'une atmosphère, se congèle à une température un peu supérieure à 0°.

Une autre expérience, sur le même sujet, de Tyndall, consiste à placer de la glace pilée entre deux moules de bois très épais, creusés de cavités lenticulaires dans les deux faces en regard, et à la comprimer énergiquement. Quand les moules sont ensuite écartés, on constate qu'il s'est formé, dans l'espace laissé libre par les cavités, une lentille de glace parfaitement homogène et transparente. Dans ce cas, la glace s'est fondue, en partie au moins, pendant la compression, qui a pour effet d'abaisser la température du point de fusion, et le liquide formé s'est solidifié de nouveau à la pression atmosphérique. Ce phénomène est désigné sous le nom de *regel*. Il explique ce qui se passe quand deux morceaux de glace à 0°, se touchant par un élément de surface, sont pressés l'un contre l'autre ; la pression qui s'exerce au point de contact abaissant la température de fusion, une petite quantité de glace se fond en cet endroit ; l'eau qui en résulte, se répandant à l'entour et n'étant plus soumise à la même pression, se gèle de nouveau.

C'est là ce qui se passe quand on comprime des morceaux de glace à 0° dans un vase : entre les morceaux qui se touchent par leurs aspérités, il s'exerce au point de contact une pression plus forte qui fait fondre ces aspérités ; ils glissent alors les uns sur les autres, et se touchent en de nouveaux points qui fondent à leur tour,

et ainsi de suite ; pendant ce temps l'eau provenant de la fusion se loge dans les vides, où, n'étant plus soumise à la même pression, elle se congèle de nouveau ; à la fin il s'est formé un bloc de glace présentant la forme du vase. Mais ce bloc n'est pas cristallisé comme l'est un bloc de glace naturel : car il se comporte vis-à-vis de la lumière comme un morceau de verre ; il ne produit point de polarisation colorée.

Ces phénomènes produits par la pression paraissent jouer un grand rôle dans la marche des glaciers. La pression exercée par la colonne de glace à sa base peut occasionner une fusion locale et permettre un glissement sur les rochers qui forment le lit du glacier.

119. Le soufre présente dans ses changements d'état sous l'influence de la température des particularités exceptionnelles. Il entre en fusion à 115° et se résout alors en un liquide jaune orangé doué d'une grande fluidité. Si l'on chauffe ce liquide au delà de 115° , il s'épaissit de plus en plus en se colorant davantage. Vers 200° , il devient si épais qu'on peut retourner le vase qui le contient sans qu'il s'écoule. Si l'on continue à le chauffer, sa coloration devient plus intense encore ; mais sa fluidité reparaît. Enfin, vers 400° , redevenu parfaitement fluide, il entre en ébullition et se transforme en vapeur.

Le soufre liquide peut être ramené à l'état solide, soit par un refroidissement lent, auquel cas il cristallise en aiguilles transparentes de couleur ambrée qui ont la forme d'un prisme oblique à base rhombe, soit par un refroidissement brusque. Ce dernier mode

de solidification donne lieu à un phénomène différent.

Si dans une masse d'eau à la température ordinaire on projette du soufre fondu, à une température voisine du point de fusion, c'est-à-dire 115° , il reprend immédiatement l'état solide avec l'aspect du soufre ordinaire.

Mais si l'on fait la même expérience sur du soufre visqueux chauffé à 250° ou 300° , on obtient une matière molle, transparente et susceptible de s'étirer en longs filaments, qu'on appelle *soufre mou*, et qui ne présente aucune trace de cristallisation ; se comportant ainsi comme le verre, ce qui lui fait donner aussi la dénomination de soufre *vitreux*.

Comme le verre, le soufre mou, abandonné à lui-même, subit un retrait, perd sa transparence, sa ductilité, et prend une structure cristalline. Au bout de quelques mois, il est devenu friable et se réduit, sous la pression des doigts, en une poussière dont chaque particule présente la forme microscopique d'un octaèdre. Il en est de même pour le verre qui se dévitriifie à la longue, perd de sa transparence et manifeste une tendance à cristalliser.

120. Lorsque certains corps solides sont mis en contact avec certains corps liquides, il s'opère une désagrégation progressive de leurs molécules, qui s'introduisent dans les interstices des molécules liquides, et forment un mélange liquide homogène, réunissant sans altération tous les caractères du solide et du liquide ainsi mélangés.

Ce phénomène, qui est une sorte de fusion du corps

solide, s'appelle *dissolution*. Il est, comme la fusion, accompagné d'une absorption de chaleur latente, c'est-à-dire que si le mélange ne reçoit aucune chaleur du dehors, une partie de sa chaleur propre est absorbée par le travail de la dissolution, et qu'alors sa température s'abaisse ou qu'il se refroidit, comme on dit vulgairement. C'est là le principe des *mélanges réfrigérants*.

Ainsi, un mélange de poids égaux d'azotate d'ammoniaque cristallisé et d'eau prend par la dissolution une température de -10° à -15° . De même, en mélangeant 8 parties de sulfate de soude et 5 parties d'acide chlorhydrique, on obtient un abaissement de température plus considérable encore.

Les plus simples des mélanges réfrigérants s'obtiennent en faisant dissoudre des sels hydratés dans de l'eau ou des acides étendus d'eau ; tel est le mélange d'azotate d'ammoniaque et d'eau, et celui de sulfate de soude et d'acide chlorhydrique dont nous venons de parler. Ce dernier mélange est souvent employé pour la production artificielle de la glace en été.

En remplaçant l'eau et les acides étendus par de la glace pilée ou même de la neige, on obtient des mélanges réfrigérants plus énergiques, parce qu'alors le refroidissement est dû à la fois à la fusion de la glace et à la dissolution du sel. Même pour des sels anhydres, comme le sel marin, leur mélange avec la glace pilée ou la neige donne un abaissement de température considérable.

Pour certains corps solides, leur dissolution dans un

corps liquide, au lieu d'être accompagnée d'une absorption de chaleur, est, au contraire, accompagnée d'un dégagement de chaleur. Cela tient à ce que, au lieu d'une simple diffusion des molécules du corps solide entre celles du corps liquide, il y a une combinaison chimique, c'est-à-dire que non-seulement le corps solide se désagrège, mais que les molécules elles-mêmes et celles du liquide se désagrègent pour former avec leurs éléments des assemblages moléculaires nouveaux. La chaleur dégagée par ce travail intérieur surpasse alors celle qu'absorbe le travail de désagrégation des molécules du corps solide.

De même que les molécules d'un corps solide se diffusent par dissolution dans un corps liquide, certains liquides imbibent certains corps solides. Il y a là généralement un développement de chaleur.

De même les molécules de certaines vapeurs s'introduisent dans les interstices de certains corps solides, ainsi, par exemple, la vapeur d'eau, dans certaines substances solides organiques, comme un cheveu ou un boyau tordu ; alors le corps solide subit un abaissement de température ; il se dilate ou se détord.

C'est là le principe de *l'hygromètre à cheveu* de de Saussure, instrument qui sert à déterminer le degré d'humidité de l'air atmosphérique.

§ III. — VAPORISATION ET LIQUÉFACTION.

121. Le mouvement circulatoire des molécules d'un

liquide, qui peut devenir, à l'égard de quelques-unes, à l'intérieur, assez rapide pour les faire sortir du groupe de molécules qui les avoisinent, et leur faire occuper une position semblable dans un groupe voisin différent, a pour effet, à la surface libre, d'en faire sortir un certain nombre de la masse liquide dans l'espace environnant. C'est le phénomène de la *vaporisation* du liquide.

Si l'espace est limité par des parois et vide, les molécules qui s'échappent ainsi forment une *vapeur* analogue à un gaz qui remplit cet espace. Les molécules rebondissent contre les parois, se choquent entre elles et viennent rencontrer la surface du liquide : les unes rebondissent contre cette surface, d'autres y pénètrent et rentrent dans l'intérieur de la masse liquide. Il s'établit ainsi un état d'équilibre, dans lequel le nombre des molécules qui entrent est égal au nombre de celles qui sortent. La densité maximum de la vapeur ainsi formée dépend de la vitesse moyenne de translation de ses molécules, et par conséquent de la température.

Lorsqu'un liquide se vaporise, les molécules qui en sortent doivent être celles qui dans le liquide sont animées de la plus grande vitesse ; il en résulte que la force vive totale moyenne des molécules qui y restent doit devenir moindre, c'est-à-dire que la température du liquide doit s'abaisser. Pour conserver au liquide sa température primitive, il faut lui fournir une certaine quantité de chaleur ; c'est là ce qu'on appelle *chaleur latente de vaporisation*.

Un gaz répandu dans l'espace limité qui est au-dessus

du liquide n'empêche pas la vaporisation, mais la rend seulement plus lente ; car lorsque des molécules de vapeur, s'échappant de la surface, rencontrent des molécules de gaz dans le voisinage, elles peuvent rebrousser chemin et rentrer dans le liquide, ce qui diminue le nombre de molécules de vapeur formées dans l'unité de temps ; mais dans le retour de la vapeur vers le liquide, les chocs produits par le gaz sur cette vapeur empêchent aussi un certain nombre de molécules de rentrer dans le liquide. Il y a compensation. L'équilibre définitif s'établit pour la même densité de vapeur qu'il y aurait, s'il n'y avait point de gaz.

Lorsque l'espace qui est au-dessus du liquide est illimité, une molécule du liquide s'échappant verticalement avec la vitesse u ne s'élève, en vertu de la pesanteur, qu'à la hauteur $h = \frac{u^2}{2g}$. Elle retombe alors. Si dans sa chute, elle rencontre une molécule qui monte après elle, les vitesses étant les mêmes en sens contraire, elle sera renvoyée par le choc de bas en haut à la même hauteur h . La vapeur ne dépassera donc pas un certain niveau au-dessus du liquide ; elle y formera une atmosphère de densité décroissante.

122. Les mêmes considérations peuvent être appliquées aux gaz, et expliquent la limitation de l'atmosphère. Si l'on appelle u la vitesse des molécules d'air à la surface de la terre, la hauteur maximum à laquelle elles puissent s'élever est donnée par la formule $h = \frac{u^2}{2g}$, l'intensité de la pesanteur étant supposée constante.

En remplaçant u par la valeur trouvée ci-dessus, $u = \sqrt{3 g \alpha p_0 v_0 t}$, on a $h = \frac{3}{2} \alpha p_0 v_0 t$. Si la couche inférieure est à 0° on a $h = \frac{3}{2} p_0 v_0$, ou, comme

$$p_0 = 10333, v_0 = 0,7732, h = 12000^m.$$

Cette hauteur est trop faible. Mais nous avons négligé, pour l'évaluation de la vitesse u , l'action des rayons solaires, qui fournit à l'atmosphère de l'énergie calorifique, c'est-à-dire augmente la vitesse de ses molécules, et par suite la limite supérieure h .

123. Si l'on considère une vapeur sèche, c'est-à-dire ne contenant aucune gouttelette liquide, et que l'on suppose que son volume soit diminué progressivement par une pression extérieure de plus en plus grande, la température étant maintenue constante, il existe une limite de pression que l'on ne peut dépasser. Dès que cette pression maximum est atteinte, la vapeur est dite *saturée*. Si le volume continue à diminuer, une partie de la vapeur se transforme en liquide et la pression reste constante. Cette tension p *maximum* de la vapeur, à une température donnée t , dépend de la nature du corps ; c'est une fonction de la température, $p = F(t)$.

De même, de la vapeur sèche étant soumise à une pression constante p , si sa température est peu à peu abaissée, il existe une température limite au-dessous de laquelle on ne peut descendre. Dès que cette température minimum est atteinte, la vapeur est saturée. Si l'on continue à enlever de la chaleur, la vapeur se li-

qu'éfie en partie, et tant qu'il subsiste de la vapeur, la température reste constante. En résolvant l'équation $p = F(t)$ par rapport à t , on obtient la température *minimum* de la vapeur sous pression donnée, $t = \omega(p)$.

Ces deux équations donnent la tension de la vapeur saturée à la température t , et inversement la température de la vapeur saturée sous la pression p .

Pendant que la vapeur se liquéfie, elle *dégage* de la chaleur. On appelle *chaleur latente de vaporisation* la quantité de chaleur L que dégage un kilogramme de vapeur saturée, pour se liquéfier sous pression constante, et, par conséquent à température constante. Cette quantité de chaleur dépend de la nature du corps ; c'est une fonction de la température à laquelle s'opère le changement d'état.

Inversement, un liquide que l'on chauffe sous une pression constante p entre généralement en ébullition à la température constante t définie par l'équation $t = \varphi(p)$. Il *absorbe* alors une quantité de chaleur latente égale à L .

Lorsque la masse liquide échauffée n'a pas de surface libre, on peut élever ce liquide, sous la pression p , à une température $t + \theta$ supérieure à la température constante t de la vapeur saturée. Si alors le liquide se vaporise, la chaleur latente absorbée L^1 sera moindre que L , comme cela résulte de l'excès, indiqué par l'expérience, de la chaleur spécifique du liquide sur celle de sa vapeur, au voisinage du point d'ébullition.

D'après les expériences de Regnault, on a pour l'eau $L = 606,50 - 0,695 t^0 - 0,0002 t^{02} - 0,000000 3 t^{03}$,

et pour l'éther $L = 94 - 0,07901 t^{\circ} - 0,0008514 t^{\circ 2}$.

124. Si l'on considère un mélange de liquide et de vapeur saturée, formant un poids total de 1 kilog. à la température t , en désignant par m et m' les chaleurs spécifiques et par u et u' les volumes spécifiques du liquide et de la vapeur, on a, comme nous l'avons montré pour un mélange de liquide et de solide, le signe de L seulement devant être changé,

$$m' - m = t \frac{d \cdot \frac{L}{t}}{dt}.$$

$$u' - u = \frac{EL}{t \frac{dp}{dt}}.$$

La chaleur latente L et la tension p de la vapeur saturée sont des fonctions de la température qui ont été déterminées empiriquement par Regnault pour quelques liquides. Ces deux équations permettent donc de calculer la chaleur spécifique m' de la vapeur saturée au moyen de la chaleur latente L , et son volume spécifique u' au moyen de la chaleur latente L et de la tension p . On peut, sans erreur sensible, remplacer dans la première équation m par la chaleur spécifique C du liquide.

Pour certains liquides la valeur de m' est négative, pour d'autres elle est positive, et pour une troisième catégorie, elle est négative au-dessous d'une certaine température et positive au-dessus.

125. Pour se rendre compte du signe différent que

peut avoir la chaleur spécifique d'une vapeur saturée suivant la nature du liquide dont elle provient, il suffit d'appliquer l'une des formules fondamentales de transformation des corps, qui ont été précédemment rappelés.

On a pour une transformation infiniment petite, en prenant t et u' comme variables, indépendantes,

$$d Q = c d t + l d u'$$

ou, comme u' est une fonction de t ,

$$d Q = \left(c + l \frac{d u'}{d t} \right) d t = m' d t.$$

La chaleur spécifique m' est donc exprimée par $c + l \frac{d u'}{d t}$. Or, quand la température t s'élève, le volume spécifique u' de la vapeur saturée diminue ; la dérivée $\frac{d u'}{d t}$ est donc négative ; l'expression de la chaleur spécifique se compose ainsi de deux termes de signe contraire, ayant des valeurs comparables. On conçoit donc que la chaleur spécifique m' puisse être, suivant les cas, positive ou négative.

La vapeur d'eau et le sulfure de carbone appartiennent à la première catégorie : la chaleur spécifique de leur vapeur saturée est négative, et sa valeur absolue va en diminuant à mesure que la température s'élève. La vapeur d'éther appartient à la seconde ; la valeur de m' est positive et va en augmentant avec la température. La troisième catégorie comprend la benzine, le

chloroforme, le chlorure de carbone. Dans tous les cas, la valeur relative de m' croît avec la température.

126. Le signe de la chaleur spécifique m' a une grande importance dans l'étude des machines à vapeur.

Si l'on suppose qu'une vapeur éprouve une transformation infiniment petite en restant saturée et sèche, la quantité de chaleur nécessaire à cette transformation

est $dQ = m' dt$ ou $dQ = m' \frac{dt}{du'} dt = \frac{m'}{\frac{dt}{du'}} du'$. Or la

dérivée $\frac{du'}{dt}$ est toujours négative. La valeur de m' est aussi négative pour la vapeur d'eau ; il en résulte que pour la vapeur d'eau dQ et du' ont le même signe.

Si cette vapeur est comprimée, du' étant négatif, dQ est aussi négatif, c'est-à-dire que la vapeur dégage de la chaleur. Si la compression est assez rapide pour que cette chaleur dégagée n'ait pas le temps de se répandre sur les corps extérieurs, elle chauffe la vapeur et la porte au-dessus de son point de saturation. Donc la vapeur d'eau est *surchauffée* par la *compression*.

Si, au contraire, la vapeur saturée se dilate, du' et dQ sont tous deux positifs, c'est-à-dire qu'il y a absorption de chaleur ; par suite, pour augmenter son volume, il faut lui fournir de la chaleur. Lorsque la dilatation est assez rapide pour que les corps extérieurs n'aient pas le temps de lui fournir la chaleur nécessaire, les choses se passent comme si, la chaleur ayant été fournie pour maintenir la vapeur saturée sous le volume

$u' + d u'$, on enlevait ensuite cette chaleur, le volume restant le même et égal à $u' + d u'$. Il y a évidemment *condensation partielle* ; donc la vapeur d'eau se *condense* en partie pendant la *détente*.

Pour la vapeur d'éther, m' ayant un signe différent, les phénomènes sont opposés. La compression produit une *condensation partielle*, et la dilatation *surchauffe* la vapeur.

§ IV. — DISSOCIATION.

127. Si l'on chauffe de la vapeur d'eau à une température assez élevée, dans un espace limité, une portion de cette vapeur se décompose en oxygène et hydrogène, et la décomposition partielle, ou *dissociation*, s'arrête lorsque le mélange des deux gaz a acquis une tension déterminée, qui est la *tension de dissociation* à cette température.

Si l'on élève davantage la température, une nouvelle portion de vapeur se *dissocie*, et la décomposition s'arrête lorsque le mélange a acquis une nouvelle tension supérieure à la première et égale à la *tension de dissociation* à cette nouvelle température.

Les phénomènes inverses apparaissent, si l'on refroidit le mélange de vapeur d'eau et des gaz provenant de la dissociation ; un abaissement de température entraîne la recombinaison d'une partie des gaz, et la formation de vapeur d'eau s'arrête lorsque la tension du mélange gazeux est devenue égale à la tension de dissociation qui correspond à la nouvelle température.

C'est là le phénomène de dissociation découvert par Henri Sainte-Claire Deville.

Le spath d'Islande chauffé dans le vide successivement aux températures d'ébullition du mercure, du soufre, du cadmium et du zinc, 350°, 440°, 860° et 1040°, fournit des résultats analogues. La décomposition commence à 440°, où elle est insensible ; elle devient très appréciable à 860° ; elle s'arrête lorsque l'acide carbonique dégagé acquiert la tension de 85 millimètres ; à 1040°, la décomposition est bien plus considérable et ne s'arrête que lorsque la tension de l'acide carbonique est devenue égale à 520 millimètres.

La *tension de dissociation* du carbonate de chaux est donc égale à 85 millimètres à la température de 860°, à 520 millimètres à la température de 1040°. A chacune de ces températures, la tension de dissociation est constante. Elle est indépendante de la quantité de spath décomposée et de la quantité de chaux qui reste dans l'appareil.

Ces résultats ont été obtenus par M. Debray.

Pour certains chlorures ammoniacaux, cette loi de la dissociation est confirmée d'une manière d'autant plus nette que la dissociation de ces chlorures s'effectue à une basse température ; de sorte qu'il est possible de mesurer d'une manière continue, dans une étendue assez considérable de l'échelle thermométrique, les tensions de dissociation. C'est ce qu'a montré M. Isambert.

Il y a une analogie complète entre le phénomène de la dissociation et la formation des vapeurs saturées ; et

ce qui a été dit pour la vaporisation peut se répéter mot pour mot à propos de la dissociation, en remplaçant le liquide par le corps composé, la vapeur par les éléments dissociés, la tension maximum de la vapeur par la tension de dissociation.

Le paracyanogène soumis à l'action de la chaleur, en vase clos, se transforme partiellement en cyanogène, et cette transformation partielle s'arrête lorsque la pression du cyanogène atteint une valeur *déterminée* qui dépend de la température et qui est la *tension de transformation* correspondant à cette température.

Ce mode de transformation isomérique est tout à fait analogue au phénomène de la dissociation. Il a été observé par M. Troost.

§ V. — LOI DE DULONG ET PETIT.

128. Enfin, pour compléter ces considérations sur les différents états des corps, nous ajouterons que Dulong et Petit ont trouvé que pour la plupart des corps simples, solides ou liquides, la chaleur spécifique C , c'est-à-dire la quantité de chaleur nécessaire pour élever d'un degré la température de l'*unité de poids* du corps, est en raison inverse de l'équivalent chimique e , ou bien que le produit $C e$ de la chaleur spécifique d'un corps pour son équivalent est un nombre sensiblement constant, égal à 3, 2, lorsque l'équivalent de l'hydrogène est pris pour unité.

Comme le poids P d'une molécule d'un corps est

proportionnel à son équivalent chimique e , il résulte de cette loi que $C P$ est constant, c'est-à-dire que la capacité calorifique, ou l'énergie calorifique d'une molécule, est la même pour tous les corps simples. Par suite la force vive totale d'une molécule, à une même température, et sous une même pression, est la même pour tous les corps simples, liquides ou solides.

Il doit en être de même, par extension, en vertu du principe de continuité, pour les gaz simples.

Il y a quelques métaux qui ne se conforment pas à cette loi de Dulong et Petit, comme l'argent, le potassium ; mais si l'on réduit à moitié leurs équivalents chimiques, ils rentrent dans la loi générale, de telle sorte que la force vive totale du double mouvement circulaire et gyrotoire des molécules et de leurs atomes, dans un corps simple quelconque, solide, liquide ou gazeux, c'est-à-dire l'énergie calorifique V , est mesurée par la température absolue t .

Comme, dans les gaz simples, la variation de l'énergie intérieure U est proportionnelle à la variation de la température, la variation du *travail intérieur* W l'est elle-même.



CHAPITRE XI.

Transformation générale des corps.

129. Nous savons qu'il existe une relation $\varphi(t, v, p) = 0$ entre la température, le volume spécifique et la pression d'un corps homogène, c'est-à-dire que l'une quelconque de ces trois quantités peut être regardée comme une fonction des deux autres.

Considérons v comme fonction des deux variables indépendantes t et p .

Si on laisse p constant, et qu'on fasse varier t , α_1 étant le coefficient de dilatation cubique sous pression constante, on a $\frac{dv}{dt} = \alpha_1 v$.

Laisant t constant, et faisant varier p , si β est le coefficient de compressibilité cubique, on a :

$$\frac{dv}{dp} = -\beta_1 v.$$

Deux séries d'expériences, dans lesquelles on fait varier t et p , et où l'on détermine les séries de valeurs correspondantes des coefficients α_1 , β_1 , permettent de trouver la valeur de v en fonction de t et p , par l'intégration de la différentielle totale $\frac{dv}{v} = \alpha_1 dt - \beta_1 dp$.

Connaissant v en fonction de t et p , on détermine l'énergie intérieure par l'équation fondamentale

$$d U = E d Q - p d v$$

jointe à l'équation $d Q = C d t + h d p$, où C , chaleur spécifique sous pression constante, est donné par l'expérience, et h par la formule

$$h = - A t \frac{d v}{d t} = - A \alpha_1 v t$$

que l'on déduit des deux équations fondamentales

$$\begin{aligned} d Q &= A (d U + p d v), \\ \frac{d Q}{t} &= \dot{d} \mu, \end{aligned}$$

en mettant la première sous la forme

$$d Q = A \left(\frac{d U}{d t} + p \frac{d v}{d t} \right) d t + A \left(\frac{d U}{d p} + p \frac{d v}{d p} \right) d p,$$

ou $d Q = C d t + h d p$,

qui, comme $C = A \left(\frac{d U}{d t} + p \frac{d v}{d t} \right)$ et

$h = A \left(\frac{d U}{d p} + p \frac{d v}{d p} \right)$, donne d'abord

$$(1) \quad \frac{d h}{d t} - \frac{d C}{d p} = - A \frac{d v}{d t};$$

en exprimant ensuite la condition que $\frac{d Q}{t}$ soit une

différentielle exacte, savoir : $\frac{d\frac{C}{t}}{dp} = \frac{d\frac{h}{t}}{dt}$, qui donne

$$(2) \quad h = t \left(\frac{dh}{dt} - \frac{dC}{dp} \right),$$

et en combinant entre elles ces deux relations (1) et (2).

La valeur de U en t et p est ainsi fournie par l'intégration de la différentielle totale

$$dU = (EC - \alpha_1 v p) dt + v (\beta_1 p - \alpha_1 t) dp.$$

On peut encore prendre dQ sous la forme

$dQ = c dt + l dv$, où c est la chaleur spécifique sous volume constant, et remplacer dv par sa valeur ci-dessus ; on obtient ainsi :

$$dQ = (c + \alpha_1 l v) dt - \beta_1 l v dp ;$$

d'où, par l'identification avec la valeur précédente de dQ ,

$$c + \alpha_1 l v = C, \quad \beta_1 l v = -h = A \alpha_1 v t,$$

$$\text{ou } l = \frac{A \alpha_1 t}{\beta_1}, \quad C - c = \frac{A \alpha_1^2 v t}{\beta_1}.$$

On obtient de cette manière une autre expression de dU , savoir :

$$dU = \left(EC - \frac{\alpha_1^2 v t}{\beta_1} \right) dt + \left(\frac{\alpha_1 t}{\beta_1} - p \right) dv,$$

dont l'intégration donne U.

130. Imaginons que l'on comprime un corps assez rapidement pour qu'un échange de chaleur n'ait pas

le temps de s'établir entre ce corps et le milieu ambiant, on a alors $dQ = C dt + h dp = 0$; d'où, en remplaçant h par la valeur donnée ci-dessus, l'on déduit $\frac{dt}{dp} = \frac{A \alpha_1 v t}{C}$.

Le signe de $\frac{dt}{dp}$ est le même que celui du coefficient de dilatation cubique α_1 . En général α_1 est positif; $\frac{dt}{dp}$ est alors positif, c'est-à-dire que la compression élève la température du corps. Mais pour l'eau à une température inférieure à 4° , α_1 est négatif; donc $\frac{dt}{dp}$ est négatif; par conséquent la compression y produit un abaissement de température.

131. Considérons en particulier une barre cylindrique homogène dont la surface latérale est soumise à une pression constante et uniforme p_0 par mètre carré, et chacune des deux bases à une pression variable $\omega p_0 + p$, ω étant l'aire de la section. Soit x la longueur de la barre.

Le travail extérieur accompli par la barre dans une transformation infiniment petite est

$$dS = p_0 dv + p dx,$$

et l'équation fondamentale

$$dQ = A (dU + dS)$$

devient $dQ = A (dU + p_0 dv + p dx)$.

Si l'on prend t et x pour variables indépendantes, cette équation devient

$$d Q = A \left(\frac{d U}{d t} + p_0 \frac{d v}{d t} \right) d t + A \left(\frac{d U}{d x} + p_0 \frac{d v}{d x} + p \right) d x,$$

ou, en posant $c = A \left(\frac{d U}{d t} + p_0 \frac{d v}{d t} \right)$;

$$l = A \left(\frac{d U}{d x} + p_0 \frac{d v}{d x} + p \right),$$

$$d Q = c d t + l d x ;$$

et l'on a entre c et l la relation

$$\frac{d l}{d t} - \frac{d c}{d x} = A \frac{d p}{d t}.$$

Si l'on prend t et p pour variables indépendantes, l'équation fondamentale devient

$$d Q = A \left(\frac{d U}{d t} + p_0 \frac{d v}{d t} + p \frac{d x}{d t} \right) d t + \\ + A \left(\frac{d U}{d p} + p_0 \frac{d v}{d p} + p \frac{d x}{d p} \right) d p,$$

ou $d Q = C d t + h d p$,

en posant $C = A \left(\frac{d U}{d t} + p_0 \frac{d v}{d t} + p \frac{d x}{d t} \right)$,

$$h = A \left(\frac{d U}{d p} + p_0 \frac{d v}{d p} + p \frac{d x}{d p} \right) ;$$

on en déduit entre C et h la relation :

$$\frac{d h}{d t} - \frac{d C}{d p} = - A \frac{d x}{d t} ;$$

D'autre part, quand on prend pour variables t et x , la différentielle exacte

$$\frac{d Q}{t} = \frac{c}{t} d t + \frac{l}{t} d x$$

conduit à la relation

$$l = A t \frac{d p}{d t},$$

et quand on prend t et p pour variables, on obtient de même la relation

$$h = - A t \frac{d x}{d t}.$$

L'observation donne le coefficient de dilatation linéaire $\alpha_2 = \frac{1}{x} \frac{d x}{d t}$; on aura donc $h = - A \alpha_2 x t$.

L'observation donne aussi le coefficient de compressibilité linéaire $\beta_2 = - \frac{1}{x} \frac{d x}{d p}$.

On a $d x = \frac{d x}{d t} d t + \frac{d x}{d p} d p = x (\alpha_2 d t - \beta_2 d p)$,
par suite, $d Q = c d t + l d x = (c + \alpha_2 l x) d t - \beta_2 l x d p$,
d'où l'on déduit $C = c + \alpha_2 l x$, $h = - \beta_2 l x$,

$$\text{ou } l = \frac{A \alpha_2 t}{\beta_2}, \quad C - c = \frac{A \alpha_2^2 n t}{\beta_2}.$$

Si l'on comprime brusquement la barre, sans communication de chaleur, on a

$$0 = d Q = C d t + h d p;$$

$$\text{d'où } \frac{d t}{d p} = \frac{A \alpha_2 x t}{C}.$$

132. Pour appliquer ces formules à un fil tiré à ses deux bouts par une même force, il suffit de changer le signe de p . En remplaçant p par $-p'$, on a

$$\frac{d t}{d p'} = - \frac{A \alpha_2 x t}{C}.$$

Le signe de $\frac{d t}{d p}$ est contraire à celui de α_2 . Le coefficient de dilatation étant en général positif, on en conclut que l'allongement d'un fil est accompagné ordinairement d'un abaissement de température.

Le caoutchouc présente une exception. Une lame de caoutchouc tendue par un poids diminue de longueur quand la température s'élève; α_2 est négatif, par conséquent $\frac{d t}{d p}$ positif; donc, si l'on étire brusquement une lame de caoutchouc, la température s'élève. Ce fait n'est pas général. M. Joule a reconnu que si une lame de caoutchouc est soumise de toutes parts à une pression uniforme, son volume augmente quand la température s'élève, comme cela a lieu généralement pour les autres corps; le coefficient de dilatation cubique est positif et égal à 0,000256; et lorsqu'une lame de caoutchouc est tirée par un poids p' , il existe une limite p'_1 , en deçà de laquelle α_2 est positif, et au-delà de laquelle il est négatif: dans le premier cas, un accroissement brusque de tension diminue la température; dans le second cas, un accroissement de tension élève la température.

CHAPITRE XII.

Conclusion.

133. Ainsi se trouvent expliqués par la seule hypothèse d'une matière primordiale universelle, l'éther, formée d'atomes inertes, indivisibles, impénétrables et élastiques, de même volume, de figures diverses polyédriques et arrondies, en mouvement, rectiligne et uniforme de toute éternité, dans toutes les directions en chaque point de l'espace infini, la formation des corps, la gravitation, la lumière, la chaleur potentielle et rayonnante, l'électricité statique et dynamique, le magnétisme et le diamagnétisme, les répulsions moléculaires, les actions et réactions chimiques, les différents états des corps, leurs transformations, en un mot, tous les phénomènes qui se produisent dans l'univers ; et cela, sans l'intervention de forces *effectives* agissant à distance. Toutes les forces de la nature : gravitation ou pesanteur, forces électriques, forces magnétiques et diamagnétiques, forces moléculaires et atomiques dépendant de la distance, ne sont que le résultat du mouvement des atomes de l'éther, qui par leurs chocs entre eux et sur les molécules des corps produisent seulement des pressions de contact. Elles ne sont que des représentations fictives de ces pressions.

134. De l'explication de la constitution du monde par le seul mouvement éternel des atomes d'une matière éthérée, répandue dans l'espace infini, résulte, comme conséquence immédiate, le principe de la *conservation de l'énergie* dans l'univers. En effet, la force vive totale du mouvement de tous ces atomes, soit libres en dehors des corps, soit groupés dans leurs molécules, ou emprisonnés entre elles, comme ils sont supposés *essentiellement élastiques*, n'est pas modifiée par les chocs qu'ils ont entre eux et avec les molécules des corps, et ces chocs, ainsi que nous l'avons reconnu, engendrent tous les phénomènes de l'univers rangés sous les rubriques de gravitation, de lumière, de chaleur, d'électricité, de magnétisme, de diamagnétisme, d'actions moléculaires et atomiques, qui ont été rapportés jusqu'alors à ce qu'on appelait les *forces physiques et chimiques* de la nature.

On distingue quelquefois deux sortes d'énergie, l'énergie dite *actuelle* et l'énergie dite *potentielle*, ce mot *potentielle* étant pris dans le sens de *latente* ou en *puissance*. Mais cette dernière dénomination fait équivoque avec le sens mathématique ordinaire du mot *potentiel* ; de plus, cette énergie, qu'on appelle *potentielle*, n'est, à proprement parler, ni latente, ni en puissance, elle est *effective*. C'est ce que nous avons appelé le *travail intérieur* des corps, qui n'est autre que le travail, pris en signe contraire, des forces répulsives entre les molécules des corps et entre leurs atomes, qui s'accomplit sur ces molécules et les atomes en mouvement. Il faut tenir compte de ce *travail intérieur*,

qui peut être très considérable dans certains états des corps, comme d'une énergie effective qui s'ajoute à l'énergie actuelle, pour expliquer comment, dans certains cas, par exemple, dans l'*arrêt subit*, par un obstacle fixe, d'un corps qui tombe, dans l'*explosion d'une matière fulminante*, préalablement inactive, qui, en se produisant, donnent lieu à une destruction ou à une création subites considérables de travail extérieur, la loi de la conservation de l'énergie n'est pas troublée. C'est que le travail extérieur, qui paraît détruit par l'arrêt subit du corps, est transformé en énergie calorifique et en travail intérieur du corps et de l'obstacle, et que le travail extérieur, qui paraît créé par l'explosion subite de la matière fulminante, est une partie du travail intérieur de cette matière et du travail produit sur elle par le choc qui cause l'explosion, l'autre partie se transformant en énergie calorifique, lumineuse et électrique.

135. L'élasticité, que nous avons supposée, des atomes indivisibles ou *pleins*, en vertu de laquelle ils se comportent dans leurs chocs entre eux, comme les corps élastiques formés de parties disjointes, ne peut se concevoir que métaphysiquement, comme une propriété *innée* de ces atomes, qui en constitue une sorte de *sensibilité vitale*.

C'est cette propriété essentielle des éléments indivisibles de la matière, qui, jointe à leur inertie, à leur impénétrabilité, à leur mouvement et à la variété infinie de leurs formes et de leurs dimensions, nous a permis d'essayer d'expliquer tous les phénomènes de la nature

inorganique. Ne pourrait-elle pas aussi fournir la clef de tous les phénomènes du monde organisé ?

Ces atomes de diverses formes, qui sont élastiques en vertu d'une sensibilité vitale innée, ne pourraient-ils pas être regardés comme les sources mêmes de la vie ? Ils engendreraient ces granulations moléculaires désignées sous le nom de *microzyma* (petit ferment), qui, suivant M. Béchamp, sont le point de départ de toute manifestation vitale ; ces *petits sphéroïdes d'un demi-millième de millimètre de diamètre*, qui provoquent dans un milieu favorable la formation de *cellules*, qui forment le *substratum* de tout élément anatomique végétal ou animal, qui, principes chimiques actifs, changent le sucre de canne en glucose, altèrent les albuminoïdes et dédoublent certaines substances, qui évoluent en vibrions et en bactéries, quand ils rencontrent des conditions favorables, et qui répandus partout, dans l'eau, dans l'air, dans les tissus végétaux et animaux, sont indestructibles et constituent le principe permanent initial de toute action organique et physiologique.

NOTES COMPLÉMENTAIRES.

I. — DIVERSES SORTES D'UNITÉS.

Dans cet ouvrage, nous avons eu à considérer diverses grandeurs : longueur, temps, force sous toutes ses manifestations, masse de matière pondérable, masse de matière éthérée électrique, travail mécanique, énergie sous toutes ses formes, intensité des courants électriques, résistance des conducteurs, température, chaleur.

Leur représentation numérique dépend des unités auxquelles elles sont rapportées.

On prend pour unité de longueur le *centimètre*, et pour unité de temps la *seconde*, quantités déterminées et fixes, qui se rattachent aux dimensions et au mouvement invariables de la Terre.

L'unité de force est le poids d'un centimètre cube d'eau pure dans le vide à la température de 4° centigrades, en un point de la surface de la Terre : c'est le *gramme*.

Cette unité de force est la gravitation qui s'exerce entre la masse m d'un centimètre cube d'eau et la masse M de la Terre, condensée en son centre à la distance r égale à la longueur du rayon terrestre.

Si l'on représente la gravitation par la formule

$\frac{f M m}{r^2}$, on a, dans ce cas, $\frac{f M m}{r^2} = 1$; ce qui donne

la valeur numérique du coefficient f .

Cette unité de force n'est pas indépendante : elle est liée à l'unité de longueur.

Toutes les forces, quel que soit leur mode de manifestation, réel ou apparent, pression, tension ou traction, pesanteur, gravitation, force électro-statique, force électro-dynamique, force électro-motrice, force magnétique, forces atomiques et moléculaires, s'évaluent numériquement en grammes.

Le *centimètre*, le *gramme*, la *seconde* sont les trois unités fondamentales qu'on désigne par le symbole (C, G, S).

L'unité de masse de matière pondérable est la masse de 9809 centimètres cubes d'eau.

L'unité de masse de matière éthérée électrique est la masse qui est repoussée par une masse égale, à la distance de 1 centimètre, avec une force de 1 gramme.

Comme la formule qui exprime la force *électro-statique* s'exerçant entre deux masses positives ou négatives m et m' de fluide électrique fixe, à la distance r , est

$-\frac{k m m'}{r^2}$, on a alors $k = -1$, et la formule devient

$$-\frac{m m'}{r^2}.$$

Par suite, la formule qui exprime la force *électro-dynamique* s'exerçant entre deux masses positives ou négatives m et m' de fluide électrique en mouvement, est

— $m m' \left(\frac{1}{r^2} + \frac{h}{\sqrt{r}} \frac{d^2 \sqrt{r}}{dt^2} \right)$ h étant une cons-

tante. On détermine cette constante h en exprimant, au moyen de cette formule, que la force qui s'exerce entre deux masses égales à l'unité électrique, en mouvement respectivement sur deux éléments rectilignes de courant de 1 centimètre de longueur, situés parallèlement en regard direct l'un de l'autre, à un centimètre de distance, et dont la vitesse est d'un centimètre, en exprimant, dis-je, que cette force est égale à 1.

De là, on déduit la formule qui exprime la force *électro-motrice* s'exerçant entre les masses électriques en mouvement dans des courants dont l'intensité, la forme et la position changent.

La formule de la force magnétique, dans l'hypothèse de Coulomb, sur la nature du magnétisme, qui rentre dans celle d'Ampère, est la même que celle de la force électro-statique, m et m' désignant des masses de fluide magnétique positif ou négatif.

L'unité de travail mécanique est le travail nécessaire pour élever 1000 grammes ou un kilogramme à une hauteur de 100 centimètres ou un mètre.

Elle est appelée *kilogrammètre*. Le *cheval vapeur* est de 100 kilogrammètres.

L'énergie, sous toutes les formes, qui est une somme de forces vives, équivalente à un travail mécanique, s'évalue numériquement au moyen de l'unité de travail.

L'unité d'intensité d'un courant électrique, dans un fil conducteur déterminé, est la quantité de masse élec-

trique positive qui traverse normalement, l'unité de surface, le centimètre carré, pendant l'unité de temps, la seconde.

L'unité de résistance d'une portion de fil conducteur au mouvement constant de l'électricité, qui dépend de la nature de ce conducteur, qui est inversement proportionnelle à la surface de sa section droite et en raison directe de sa longueur, est la résistance qu'offre une portion de longueur de un centimètre de ce conducteur à travers une portion de la surface de sa section égale à un centimètre carré.

L'unité de température est le degré centigrade, c'est-à-dire le centième de la portion de l'échelle thermométrique d'un liquide déterminé, ou d'un gaz, comprise entre le point de cette échelle qui correspond à la température de la glace fondante et celui qui correspond à la température d'ébullition de l'eau sous la pression atmosphérique.

L'unité de chaleur est la quantité de chaleur nécessaire pour élever de un degré, à partir de la température de la glace fondante, la température de 1,000 grammes d'eau. Elle est appelée *calorie*.

Quant aux forces atomiques et moléculaires, leur évaluation numérique nous échappe. Nous savons seulement que ce sont des forces répulsives qui s'exercent entre les atomes de l'éther et entre les molécules des corps, proportionnellement à leurs masses, et suivant une fonction, inconnue, de la distance, qui décroît rapidement, lorsque cette distance augmente, et qui s'annule, pour un rayon d'activité très petit.

II. — FORCE VIVE DE GYRATION.

Nous avons parlé de la force vive du mouvement de gyration des atomes de l'éther et des molécules des corps. Cette force vive s'évalue de la manière suivante :

Si l'on désigne par $d m$ l'élément de masse, par r sa distance à l'axe de gyration, par ω la vitesse angulaire supposée constante, et par v la vitesse linéaire, on a

$$v = \omega r, \quad \frac{1}{2} d m \cdot v^2 = \frac{1}{2} d m r^2 \cdot \omega^2 ; \text{ et}$$

$$\Sigma \frac{1}{2} d m \cdot v^2 = \frac{1}{2} \Sigma d m \cdot r^2 \cdot \omega^2,$$

ou, en posant $\Sigma d m \cdot r^2 = M$, moment d'inertie,

$$\Sigma \frac{1}{2} d m \cdot v^2 = \frac{1}{2} M \omega^2.$$

Ainsi la force vive du mouvement gyrotoire est égale à la moitié du produit du moment d'inertie par le carré de la vitesse angulaire.

On doit supposer que le mouvement gyrotoire des atomes et des molécules s'accomplit autour d'un axe principal d'inertie maximum ou minimum passant par leur centre de gravité.

Dans les corps cristallisés, ces axes principaux de gyration des molécules, semblablement orientées, sont parallèles à une même direction, ou perpendiculaires à cette direction. Lorsqu'ils sont tous parallèles, ou que

le nombre des molécules à axe de gyration parallèle l'emporte sur celui des molécules à axe perpendiculaire, le corps jouit des propriétés de l'aimant ; sinon, il est ou magnétique ou neutre ou diamagnétique.

III. — GÉNÉRALISATION DU PRINCIPE DE LA CONSERVATION DE L'ÉNERGIE.

Par l'énoncé du principe de la conservation de l'énergie dans l'univers, nous avons paru spécifier cette énergie au monde physique. Mais il doit être étendu à toute la nature, inorganique, organique, vivante, sentante et pensante ; car tous les phénomènes de l'univers s'accomplissent dans la matière et par la matière, et toutes les forces vives qui s'y développent ne sont que de l'énergie empruntée au milieu éthéré universel et qui est transformée dans la matière pondérable, brute ou vivante. De telle sorte que toutes les *énergies* de la nature, sous leurs formes et leurs manifestations diverses, dans l'éternité du temps et dans l'infini de l'espace, conservent, au milieu de leurs variations locales et partielles, par leurs transformations et leurs échanges réciproques, une *somme constante*.

L'hypothèse de la matière éthérée en mouvement, dont on conçoit les propriétés, mais dont on ne peut pénétrer l'essence intime, explique tous les phénomènes du monde. Cette matière peut donc être regardée comme la cause première directe, immédiate et immanente de ces phénomènes.

IV. — CONSTITUTION DE LA MATIÈRE ÉTHÉRÉE.

Pour la démonstration du principe de la gravitation, nous avons cru d'abord devoir admettre que la vitesse de translation des atomes de la matière éthérée était liée à leur figure géométrique, c'est-à-dire qu'ils avaient la même vitesse pour la même figure et une vitesse différente pour une figure différente, parce que, dans cette hypothèse, les atomes sphériques de l'éther libre pouvaient être supposés avoir tous la même force vive. Mais nous avons reconnu que cette hypothèse restreinte n'est pas nécessaire. On peut supposer la matière éthérée primordiale formée d'atomes de toute figure, de tout volume, de toute vitesse de translation et de gyration. Car, en vertu de l'homogénéité de cette matière, tout le long d'une droite indéfinie, de position et de direction quelconques, on doit supposer que, sur une portion limitée l , des atomes de figure, de volume, de vitesse divers sont distribués régulièrement dans le même ordre, quelle que soit la position de cette portion de droite, sur la droite infinie ; et dès lors tous ces atomes de force vive différente exercent, dans un temps infiniment petit, par leurs chocs sur une molécule, supposée immobile pendant cet instant, cette *pression*, égale dans tous les sens, qui, interceptée par la présence à distance d'une autre molécule fixe, dans le sens de la droite qui les joint, donne lieu à la gravitation des deux molécules l'une vers l'autre.

Dans cette hypothèse générale, aux causes que nous

avons supposées différencier la nature des molécules des divers corps simples, à savoir, le nombre, la figure, le double mouvement de translation et de gyration, le mode de groupement des atomes constituants, nous devons ajouter le *volume* ou la *masse* de ces atomes.

V. — DÉVELOPPEMENT DE L'ÉLECTRICITÉ PAR LE FROTTEMENT.

Le frottement de deux corps l'un contre l'autre développe, comme le simple contact, de l'électricité, c'est-à-dire, d'après notre hypothèse, constitue les atmosphères éthérées des molécules en contact des deux corps dans un état de condensation plus élevé que l'état neutre sur l'un des corps et moins élevé sur l'autre, c'est-à-dire électrise *positivement* les molécules du premier corps et *négativement* les molécules du second. Ce partage des électricités positive et négative, sur l'un et sur l'autre des deux corps, dépend de la nature de ces corps. On admet que l'électricité développée, sur la surface d'un bâton de verre poli, par le frottement qu'y exerce une étoffe de laine, est *positive*; par suite, l'électricité contraire développée sur un bâton de résine polie par une étoffe de laine est *negative*. C'est de là que viennent les dénominations d'électricité vitrée et d'électricité résineuse appliquées à l'électricité positive et à l'électricité négative. Mais ces dénominations, qui semblent faire dépendre la nature de l'électricité de la nature du corps frotté, doivent dispa-

raître devant ce fait, que, sur un même corps, peut se développer par le frottement l'une ou l'autre des électricités selon son degré de poli, et selon qu'il est frotté par tel ou tel corps. Ainsi le verre poli prend l'électricité résineuse s'il est frotté avec la peau de chat, et le verre dépoli, frotté avec une étoffe de laine, prend cette même électricité résineuse.

VI. — TRANSPORT A DE GRANDES DISTANCES DES FORCES ÉLECTRIQUES.

Un courant électrique, fourni par une machine magnéto-électrique et transmis à distance à une machine électro-dynamique, est le mode de transport de la force électrique engendrée par une force mécanique *fixe*, c'est-à-dire qui se produit en un point quelconque éloigné du lieu d'application de la force électrique.

Les conditions à réaliser pour ce transport sont :

1° La création d'une énergie électrique considérable ; 2° la possibilité de la transporter à une grande distance ; 3° sa production à un prix de revient ne dépassant pas une valeur déterminée ; 4° et enfin un *rendement* suffisant.

C'est ce qui vient d'être réalisé par M. Marcel Deprez.

Pour produire le courant électrique, il s'est servi de deux machines électro-motrices en communication avec un fil télégraphique qui relie la gare du Nord au Bourget sur un parcours *en boucle* de 17 kilomètres.

Les machines *génératrices* faisaient jusqu'à 1,000 tours par minute ; la machine *receptrice*, du système Gramme, 800 tours. Les premières absorbaient une force mécanique de 9 chevaux-vapeur, la seconde une force de 4 chevaux et demi. Le rendement augmentait avec la vitesse imprimée aux génératrices. Il a été évalué à 48,5 pour 100 du travail dépensé.



TABLE DES MATIÈRES.

	Pages.
Préface.....	I
CHAPITRE I^{er}. — MATIÈRE EN MOUVEMENT ENGENDRANT LES CORPS.	
§ I. Hypothèse fondamentale.....	1
§ II. Formation des corps.....	2
CHAPITRE II. — GRAVITATION.....	
	10
CHAPITRE III. — LUMIÈRE.	
§ I. Nature de la lumière. — Sa propagation dans l'éther libre.....	15
§ II. Sa propagation dans les corps transparents non cristallisés. — Simple réfraction.....	17
§ III. Sa propagation dans les corps cristallisés à un axe optique. — Double réfraction. — Polarisation rectiligne.	20
§ IV. Sa propagation dans les corps cristallisés à deux axes optiques.....	23
§ V. Sa polarisation circulaire et elliptique.....	25
§ VI. Sa polarisation rotatoire.....	26
§ VII. Sa polarisation par réflexion et réfraction simple..	31
§ VIII. Interférence. — Diffraction.....	34
Bandes d'interférence.....	35
Anneaux colorés.....	37
Bandes et anneaux d'interférence associés.....	40
Bandes de diffraction.....	44
Anneaux de diffraction.....	46

CHAPITRE IV. — CHALEUR.

	Pages.
§ I. Chaleur potentielle.....	53
§ II. Chaleur rayonnante.....	56
§ III. Principes de thermodynamique.....	59

CHAPITRE V. — ÉLECTRICITÉ STATIQUE ET DYNAMIQUE.

§ I. Electro-statique.....	73
§ II. Electro-dynamique.....	82

CHAPITRE VI. ⁽¹⁾ MAGNÉTISME. — DIAMAGNÉTISME.
— ÉLECTRO-MAGNÉTISME.

§ I. Magnétisme. — Diamagnétisme.....	108
§ II. Electro-magnétisme.....	114

CHAPITRE VII. — DIVERSES SORTES DE COURANTS
ÉLECTRIQUES.

§ I. Courants voltaïques.....	116
§ II. Courants thermo-électriques.....	119
§ III. Courants électro-chimiques.....	124
§ IV. Courants d'induction.....	129
§ V. Courants dus à la polarisation des électrodes.....	138

CHAPITRE VIII. — DIFFÉRENTS ÉTATS DES CORPS.

§ I. Etat gazeux.....	151
§ II. Dissolution des gaz dans les liquides.....	162
§ III. Etat solide et état liquide.....	165

CHAPITRE IX. — CHANGEMENTS D'ÉTAT DES ~~CORPS~~.

§ I. Fusion et solidification.....	167
§ II. ⁽²⁾ Vaporisation et liquéfaction.....	175

(1) Ici une erreur typographique a été faite : le numéro des chapitres a été augmenté de 1.

(2) Les paragraphes à partir de § I ont été augmentés de 1.

	Pages.
§ III. Dissociation	183
§ IV. Loi de Dulong et Petit.....	185
CHAPITRE X. — TRANSFORMATION GÉNÉRALE DES CORPS	187
CHAPITRE XI. — CONCLUSION	194

NOTES COMPLÉMENTAIRES.

I. Diverses sortes d'unités.....	198
II. Force vive de gyration.....	202
III. Généralisation du principe de la conservation de l'énergie.....	203
IV. Constitution de la matière éthérée.....	204
V. Développement de l'électricité par le frottement....	205
VI. Transport à de grandes distances des forces électriques	206