

PREMIÈRE PARTIE. — PHYSIQUE

INTRODUCTION

La Physique est souvent définie, au moins dans les dictionnaires qui prétendent donner le sens de ce terme, comme l'étude des lois et des phénomènes auxquels sont soumis les corps, en restreignant cette étude aux cas où la nature même des substances n'est pas profondément altérée.

Cette définition dénierait donc à la Physique le droit d'étudier l'Électrolyse, dans laquelle les solutions salines sont décomposées ; mais, par contre, elle lui imposerait l'étude des formes cristallines, qui ressortit plus naturellement à la Minéralogie et à la Chimie.

Aussi, semble-t-il plus logique de donner une définition plus précise et plus claire, plus en rapport avec les découvertes et l'esprit modernes, qui tendent à ramener les phénomènes les plus divers à un mouvement vibratoire de la matière, ainsi qu'à des forces s'exerçant entre ses atomes constitutifs.

Depuis longtemps, l'Acoustique n'est plus étudiée que comme un ensemble de vibrations susceptibles d'influencer notre oreille ; les phénomènes lumineux ont été expliqués d'abord par l'émission de particules (Newton), puis par le mouvement vibratoire rapide des corps lumineux et de l'éther (Fresnel) ; Maxwell a pu montrer les phénomènes électriques comme le résultat des tensions qui s'exercent sur la matière ; si ces théories reposent en grande partie sur des hypothèses, elles n'en suffisent pas moins à expliquer tous les phénomènes. Enfin, s'il n'existe pas de théorie aussi avancée et aussi bien codifiée de la chaleur, il est permis de supposer qu'il en sera donné, un jour, une explication analogue et aussi satisfaisante.

Et, par son unité, tout cela plaît à notre esprit qui ramène à une théorie dynamique unique des séries de faits dont la plus grande différence est de ne pas impressionner les mêmes sens de l'homme.

Aussi, nous basant sur ces théories et ces découvertes, et pour satisfaire à cette tendance, définissons-nous la Physique :

L'étude de la matière considérée dans ses états d'équilibre et de mouvement.

Nous la différencions ainsi de la Mécanique, qui est l'étude de l'équilibre et du mouvement en eux-mêmes, sous l'influence de forces que l'on suppose appliquées à des corps souvent idéalisés, supposés rigides ou doués de propriétés élastiques spéciales ; mais, dans la Mécanique, on ne s'inquiète jamais de l'influence des phénomènes sur la matière elle-même.

L'étude des états d'équilibre sera faite dans trois parties de ce Traité de Physique : pour les solides, dans la Pesanteur ; pour les fluides, dans l'Hydrostatique et l'Aérostatique ; l'étude de la matière en mouvement vibratoire sera faite en Acoustique, Chaleur, Optique et Électricité.

Cette définition de la Physique, par ses relations avec la Mécanique d'une part, et la Chimie qui, d'autre part, étudie la constitution même des substances, a l'avantage de montrer les relations qu'ont entre elles les différentes sciences physico-chimiques ; relations qui prouvent combien il est inutile de chercher à approfondir l'une d'elles sans connaître les autres ; car il n'est pas possible de séparer les propriétés de la matière et d'en confier l'étude à des disciplines qui n'aient entre elles aucune relation.

C'est seulement notre esprit qui, trop faible et trop borné, crée des divisions plus factices que réelles, parce qu'il ne peut embrasser d'un coup d'œil l'ensemble des lois et phénomènes au milieu desquels nous vivons, sans arriver à en comprendre l'harmonie et le lien véritable.

LIVRE I

NOTIONS SUR LA PESANTEUR

DÉFINITIONS

CHAPITRE I

Pesanteur et centres de gravité. Chute des corps.

§ I. — PESANTEUR.

1. — Tous les corps qui sont à la surface de la terre sont pesants ; c'est un fait patent pour la plupart, qu'ils soient en bois, en pierre ou en métal. — Pour d'autres, cela peut paraître moins évident a priori : un ballon qui s'envole dans les airs peut ne pas sembler pesant ; ce n'est pourtant qu'une apparence que l'on expliquera dans le courant de ce Traité de Physique.

Les corps ont donc un certain « poids », comme on a l'habitude de le dire ; et ce poids constitue une force. Or, on sait qu'en Mécanique trois caractéristiques déterminent une force : la direction, l'intensité, le point d'application.

2. *Direction de la pesanteur.* — La direction de la pesanteur en un lieu est ce qu'on appelle la verticale ; elle est perpendiculaire à la surface d'un liquide non agité et son intersection avec la sphère céleste fictive donne deux points : le zénith et le nadir¹. La Terre étant à peu près sphérique, les verticales des différents points de sa surface concourent approximativement au centre de la sphère ;

1. Cette direction est indiquée par le fil à plomb.

mais, comme le rayon de cette sphère (6.400 kilomètres environ) est très considérable, on peut considérer les verticales en deux points voisins comme très sensiblement parallèles. On peut donc, sur une surface peu étendue du globe, regarder les forces créées par l'action de la pesanteur sur les corps comme des forces parallèles (et de même sens).

3. *Intensité.* — Il est visible que tous les corps n'ont pas le même poids ; deux morceaux, l'un de bois et l'autre

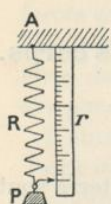


Fig. 1.

de fer, de même volume, accusent, dès qu'on les soulève, une différence de poids. On parlera plus loin de la balance qui sert à comparer les poids entre eux ; mais on peut les comparer d'une autre manière au moyen d'appareils à ressorts (Dynamomètres, pesons, etc.) : soit un ressort R attaché à un point fixe A ; en suspendant des poids différents à son extrémité libre P, on allonge plus ou moins le ressort et on peut inscrire ces déplacements sur une règle placée à côté. On pourra ainsi graduer l'appareil et évaluer toutes espèces de forces.

4. *Centre de gravité.* — Le point d'application de la pesanteur agissant sur un corps solide constitue par définition son centre de gravité. On peut trouver par expérience le centre de gravité d'un corps ; il suffit de le suspendre à un fil : le fil prend la direction de la verticale et cette ligne, prolongée dans le corps, passe par le centre de gravité ; en opérant sur un deuxième point de suspension, on obtient une deuxième droite qui, par son intersection avec la première, donne le centre cherché.

Quand le corps a une forme géométrique et est constitué d'une matière homogène, on peut trouver a priori le centre de gravité. Dans un cercle ou une sphère, il est au centre de figure ; dans une ligne droite, il est au milieu ; dans un rectangle, il est à l'intersection des diagonales.

On peut, dans des cas un peu plus complexes, décompo-

ser la figure en éléments simples; on arrive facilement à trouver le centre par la considération suivante : toutes les particules subissent l'attraction de la pesanteur : en composant ces forces, on trouve une résultante qui représente le poids total du corps et passe par le centre de gravité. On est donc ramené à un problème de mécanique statique : Composition de forces parallèles.

Prenons, par exemple, un triangle fait de matière homogène (par triangle, nous entendons ici un corps infiniment plat en forme de triangle).

Soit ABC ; menons une médiane AD : cette médiane partage en deux parties égales les droites EF parallèles à BC ; si on décompose le triangle en petits éléments EG , GF ,

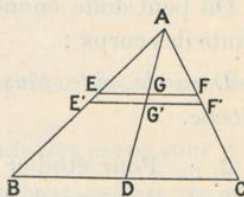


Fig. 2.

ces petits éléments sont deux à deux égaux et la composition de leurs poids donne des résultantes passant par G , G' , etc. Toutes les résultantes partielles ayant leur point d'application sur AD , la résultante générale passe en un point de AD , donc de la médiane. On eût fait le même raisonnement pour toutes les médianes : étant sur les 3 médianes, le centre de gravité se trouve à leur intersection.

On peut, par des raisonnements analogues, trouver le centre de gravité des solides géométriques homogènes; si les corps ne sont pas homogènes, on compose les poids et l'on se trouve ramené au cas général des compositions de forces parallèles.

§ II. — CHUTE DES CORPS.

1. — Tous les corps pesants abandonnés à eux-mêmes tombent; ils ne paraissent pas tous tomber avec la même vitesse, mais c'est un phénomène accessoire qui trouble l'observation de leur chute : l'air offre en effet une résistance différente suivant la forme des objets et, alors qu'il ne

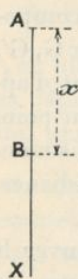
modifie que fort peu le mouvement d'une balle de plomb, il retarde très longtemps la chute d'une feuille de papier.

Pour se mettre à l'abri de ces perturbations, on peut placer des objets différents dans un tube de verre, où l'on fait le vide; en retournant brusquement le tube, les objets tombent et l'on constate qu'ils arrivent tous ensemble au fond, que ce soit une balle de plomb, un morceau de bois ou une petite feuille de papier.

On peut donc énoncer cette première loi générale de la chute des corps :

Dans le vide tous les corps tombent avec la même vitesse.

2. — Pour étudier la loi de leur mouvement, il serait difficile d'opérer dans le vide; il faudrait des tubes très longs et l'installation serait peu pratique. On opère donc dans l'air, sur des corps dont la chute est peu modifiée par la résistance de l'air : on emploie des corps métalliques qui, présentant un grand poids sous une faible surface, offrent peu de prise à la résistance de l'air.



Si on laisse tomber un corps d'un point A sans vitesse, il descend suivant la direction de la force qui le sollicite; donc il tombe suivant la verticale AX (fig. 3).

Fig. 3. Au bout du temps t , il est en B, à une distance x de son point de départ A.

On constate au moyen d'appareils enregistreurs (cylindre du général Morin) la loi du mouvement : le mouvement est uniformément accéléré, c'est-à-dire que les espaces parcourus sont proportionnels aux carrés des temps :

$$x = At^2,$$

A étant une constante pour tous les corps en un même lieu. On constate en outre que la vitesse croît proportionnellement au temps :

$$v = gt,$$

v étant la vitesse du corps au moment où il passe en B.

On trouve en outre : $A = \frac{g}{2}$.

Les deux équations exprimant la loi de la chute des corps sont :

$$x = \frac{g}{2} t^2,$$

$$v = gt,$$

g étant une constante pour un lieu déterminé de la surface du globe.

Ainsi résumées, les lois de la chute des corps sont donc :

Dans le vide, tous les corps tombent animés du même mouvement, qui est un mouvement uniformément accéléré¹.

§ III. — ACCÉLÉRATION DE LA PESANTEUR. MASSE DES CORPS.

1. — Cette constante g est appelée accélération de la pesanteur; on voit, sous une forme concrète, que sa valeur est égale à la vitesse que le corps en mouvement possède au bout de l'unité de temps; on trouve à Paris environ 9^m81 au bout d'une seconde.

Cette constante g , qui est la même pour tous les corps en un même point, varie avec la latitude terrestre et, de plus, varie en un même lieu quand on se place à différentes altitudes; elle diminue quand, à une même latitude, on mesure g à des altitudes croissantes, mais cette diminution ne devient sensible que pour de grandes différences d'altitude.

1. *Remarque.* Le Programme spécifiant qu'aucune démonstration ne sera demandée, on ne décrira pas ici les appareils qui peuvent servir à l'étude des lois de la pesanteur. On parlera, au Chapitre III de ce Livre I, de l'appareil enregistreur de Morin qui peut servir à étudier toutes sortes de mouvements rectilignes.

Elle varie, a-t-on dit, avec la latitude ; elle croît en effet quand on passe de l'équateur au pôle ; elle a donc son minimum à l'équateur et son maximum au pôle. A l'équateur (en prenant comme unité de temps la seconde), on trouve : $g = 9^m 78\ 103$, et au pôle : $g = 9^m 83\ 109$; il y a donc une différence de 5 centimètres sur la valeur de g entre le pôle et l'équateur.

On a cherché une formule donnant la valeur de g sous différentes latitudes ; cette formule est la suivante :

$g = 9^m 806\ 056 - 0,025\ 028 \cos 2\lambda$, λ étant la latitude.

La valeur de g ainsi donnée correspond à l'observation au niveau de la mer.

A Paris, cette valeur calculée au niveau de la mer est : $9^m 809$.

2. — Cette variation de l'accélération de la pesanteur influe sur la chute des corps ; l'accélération étant plus grande au pôle qu'à l'équateur, les corps tomberont un peu plus vite au pôle.

Elle a une autre influence, c'est sur le poids des objets ; si, au moyen de notre peson à ressort précédemment décrit, nous mesurons le poids d'un corps, nous trouvons des valeurs différentes suivant la latitude.

Supposons que sous deux latitudes λ_1 λ_2 nous mesurons le poids et la valeur de g ; nous trouvons P_1 et P_2 poids différents tous deux, et g_1 g_2 accélérations de la pesanteur différentes, et dont les deux valeurs nous sont données par la formule précédemment exposée.

Or, on trouve que les rapports $\frac{P_1}{g_1}$, $\frac{P_2}{g_2}$ sont égaux ; donc :

en tout point du globe, pour un corps donné, le rapport du poids (mesuré au peson à ressort) à l'accélération de la pesanteur est un nombre constant, caractéristique du corps.

C'est ce qu'on appelle sa *masse*. $\frac{P_1}{g_1} = \frac{P_2}{g_2} = m$.

Done, connaissant la masse d'un corps, pour avoir son poids en un endroit déterminé du globe, il faudra multiplier sa masse par l'accélération de la pesanteur à l'endroit considéré :

$$P = mg.$$

CHAPITRE II

Définitions. Unités fondamentales et dérivées. Système CGS.

§ I. — MESURE DES GRANDEURS.

UNITÉS FONDAMENTALES ET DÉRIVÉES.

L'étude des objets et des phénomènes suppose que l'on sait effectuer la mesure des grandeurs ; la définition exacte de cette opération peut s'énoncer ainsi :

Mesurer une grandeur, c'est la comparer à une grandeur de même espèce prise pour unité, et exprimer par un nombre le résultat de cette comparaison, la valeur de ce rapport.

Il faudra donc une unité pour chaque espèce de grandeur : unité de longueur, de surface, de vitesse, de temps, etc. ; mais il existe entre certaines unités des relations : par exemple, on sait qu'une surface est le produit de deux longueurs, il existera donc une relation entre l'unité de surface et l'unité de longueur.

On peut ainsi déterminer l'unité de surface en partant de celle de longueur : convenons par exemple de prendre comme unité de surface la surface formée par un carré ayant pour côté l'unité de longueur ; de même, pour unité de volume, le cube ayant pour arête l'unité de longueur. Il nous suffira de déterminer l'unité de longueur pour que celles de surface et de volume soient fixées. On dit que l'unité de longueur est une unité fondamentale ; celles de surface et de volume sont des unités dérivées.

Il est nécessaire d'avoir au moins trois unités fondamentales pour mesurer les divers objets et phénomènes ; en Physique, on adopte comme unités fondamentales les unités de Longueur — Masse — Temps.

Actuellement, la plupart des mesures scientifiques sont faites au moyen des unités du Système CGS; il est donc nécessaire d'étudier ce système, ses unités fondamentales, ses unités dérivées et leurs rapports avec beaucoup d'unités couramment employées dans la pratique.

§ II. — SYSTÈME CGS UNITÉS FONDAMENTALES.

On a vu que la Physique employait comme unités fondamentales les unités de Longueur, Masse, Temps. Le système CGS prend pour unités de

Longueur : Le Centimètre.

Masse : Le Gramme.

Temps : La Seconde.

D'où son nom, des initiales CGS des 3 unités.

1. *Centimètre.* — On sait qu'à la fin du XVIII^e siècle et au commencement du XIX^e des mesures furent faites dans le but de déterminer la longueur d'un méridien terrestre; on mesura l'arc de 1 degré et on convint d'adopter comme unité de longueur le mètre, que l'on croyait être exactement la dix-millionième partie du quart du méridien terrestre.

On concrétisa cette longueur du mètre par une barre sur laquelle étaient tracés deux repères, distants de 1 mètre à une température déterminée; depuis lors, les mesures géodésiques ont montré que le mètre ainsi défini sur cette barre ne représente pas une fraction exacte du méridien¹. Mais, par suite d'une entente internationale, on a convenu de prendre pour base des mesures le mètre indiqué sur la barre dont nous venons de parler. Le mètre international est donc une longueur conventionnelle qui est représentée exactement sur l'étalon en platine déposé au Pavillon de Breteuil (Saint-Cloud).

Le centimètre est la centième partie de cette longueur : nous définissons donc l'unité de longueur dans le système CGS :

1. Elle en est cependant très voisine.

La centième partie du mètre international dont l'étalon est déposé au Pavillon de Breteuil.

2. *Masse.* — Les fondateurs du Système métrique avaient défini le kilogramme : le poids d'un décimètre cube d'eau distillée à 4° centigr. ; on fit un étalon de cette mesure, au moyen d'un cylindre de platine que l'on chercha à faire exactement du poids d'un kilogramme. Cet étalon, déposé avec celui du mètre international, ne représente pas exactement le poids d'un décimètre cube d'eau à 4° . D'autre part, comme on aurait de la difficulté à comparer à de l'eau à 4° , température difficile à obtenir exactement, on a convenu de prendre pour définition de la masse-unité (kilogramme-masse) : la masse du kilogramme étalon en platine déposé au Pavillon de Breteuil.

Dans le système CGS, l'unité de masse est donc :

La millième partie du kilogramme masse.

Cette définition est la seule précise, et la seule dont on tienne compte dans les expériences de physique ; mais, dans la pratique, on peut admettre qu'il y a identité entre le poids du décimètre cube d'eau distillée à 4° et celui du kilogramme étalon, tant la différence entre eux est faible et insignifiante dans la plupart des applications.

3. *Unité de Temps.* — Le système CGS adopte pour unité de temps la seconde sexagésimale de temps solaire moyen (cf. Cosmographie).

§ III. — SYSTÈME CGS. UNITÉS DÉRIVÉES.

1. *Unités dépendant de l'unité de longueur.* — On définit immédiatement les unités de surface et de volume : l'unité de surface est le centimètre carré, représenté par la surface d'un carré d'un centimètre de côté. L'unité de volume, le centimètre cube, représenté par le volume d'un cube ayant un centimètre pour arête.

2. *Vitesse*. — La vitesse, dans un mouvement uniforme, est le rapport de l'espace parcouru au temps employé à le parcourir; dans un mouvement varié, c'est la limite du rapport d'un espace très faible et qu'on fait décroître indéfiniment, au temps employé à le parcourir : en d'autres termes, c'est la dérivée de l'espace par rapport au temps.

On définira donc l'unité de vitesse dans le système CGS : la vitesse du mobile qui, animé d'un mouvement uniforme, parcourt 1 centimètre en 1 seconde.

3. *Accélération*. — On définit en mécanique l'accélération comme la dérivée de la vitesse par rapport au temps; on a vu (chapitre 1, § III) que l'on pouvait définir sa valeur par la valeur de la vitesse que l'accélération a imprimée au mobile partant du repos, au bout d'une seconde.

Donc, l'accélération unité dans le système CGS sera l'accélération communiquant au mobile parti du repos une vitesse égale, au bout d'une seconde, à un centimètre par seconde.

On a vu que l'accélération de la pesanteur donnait au corps pesant une vitesse de 9^m 809 par seconde au bout d'une seconde (à Paris); on voit donc que l'accélération de la pesanteur vaut 980, 9 unités d'accélération CGS.

4. *Force*. — On a vu que le poids (chap. 1, § III) était le produit d'une masse par une accélération; on définit de même en mécanique toutes les forces : la force unité du système CGS sera le produit de l'unité de masse (gramme masse) par l'unité d'accélération. On lui donne un nom particulier : on l'appelle la Dyne.

5. *Travail*. — On définit en mécanique le Travail d'une force F , dont le point d'application A se déplace de A en B , d'une longueur l , par le produit $F \times l \times \cos \alpha$, α étant l'angle formé par les directions de la force et du déplacement. L'unité de travail du système CGS sera le travail fourni par une

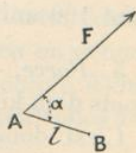


Fig. 4.

Physique et chimie. — GILLE.

force d'une dyne dont le point d'application se déplace d'un centimètre dans la direction de la force.

Cette unité reçoit le nom particulier d'Erg.

Ces deux unités, on le verra au paragraphe suivant, sont très faibles ; aussi, au lieu de les employer, use-t-on souvent de la Mégadyne et du Mégerg qui valent un million de dynes et un million d'ergs.

§ IV. — RELATIONS ENTRE LES UNITÉS CGS ET LES UNITÉS PRATIQUES.

Dans beaucoup de cas (machines à vapeur, etc.), on emploie des unités pratiques, dérivées la plupart du temps du système dont les unités fondamentales seraient : mètre, kilogramme-masse, seconde.

1. *Unités fondamentales.* — On voit immédiatement leurs rapports : Le centimètre, centième partie du mètre. Le gramme, millième partie du kilogramme.

2. *Unités dérivées de l'unité de longueur.*

Le mètre carré vaut $(100)^2$ centimètres carrés, donc 10.000 ou 10^4 centimètres carrés.

Le mètre cube vaut $(100)^3$ centimètres cubes, ou 1 million, ou 10^6 centim. cubes.

3. *Vitesse.* — La vitesse d'un mètre par seconde, unité pratique souvent employée, vaut 100 centimètres-seconde, donc : 100 unités CGS de vitesse.

4. *Accélération.* — De même, l'accélération en mètres vaut 100 unités CGS.

5. *Force.* — On prend souvent comme unité de force le poids d'un kilogramme.

C'est donc la force que communique la pesanteur à la masse du kilogramme (à Paris). On a vu (chap. I, § III) que le poids $P = mg$.

On a : 1 dyne = 1 gramme-masse $\times$ unité CGS d'accélération.

et : 1 kilogramme poids = 1 kilogr. masse $\times$ accélération de la pesanteur.

Donc :

$$\frac{\text{dyne}}{\text{kilog. poids}} = \frac{1 \text{ gramme masse}}{1 \text{ kilogr. masse}} \times \frac{\text{unité CGS}}{\text{accél. de pesanteur}}$$

On a vu au § III, 3 de ce chapitre que l'accélération de la pesanteur est égale à 981 unités CGS d'accélération ; on a donc :

$$\frac{\text{dyne}}{\text{kilogr. poids}} \times \frac{1}{1000} = \frac{1}{981} ;$$

d'où, 1 kilog. poids = 981.000 dynes.

On a défini précédemment la mégadyne qui vaut 10^6 dynes ; la mégadyne est donc très voisine du kilogramme

$$\text{poids : 1 mégadyne} = \frac{1.000.000}{981.000} \text{ kilog. poids.}$$

$$1 \text{ kilog. poids} = 0,9809 \text{ mégadynes.}$$

6. *Travail.* — L'unité pratique est le kilogrammètre, travail fourni par un kilogramme dont le point d'application se déplace de 1 mètre.

L'unité CGS est l'erg, travail fourni par la force de 1 dyne dont le point d'application se déplace de 1 centimètre. Comme le kilog. poids vaut 981.000 dynes :

$$\begin{aligned} 1 \text{ kilogrammètre} &= 981.000 \text{ dynes} \times 100 \text{ centimètres.} \\ &= 981.10^5 \text{ ergs} = 98,1 \text{ mégergs.} \end{aligned}$$

On constate donc que les unités CGS sont très faibles vis-à-vis des unités pratiques ; elles servent peu en dehors de la Physique ; même en Électricité, on est obligé d'employer des unités pratiques, multiples ou sous-multiples des unités CGS.

CHAPITRE III

Applications et instruments de mesure.

§ I. — PENDULE.

Soit une sphère pesante suspendue au moyen d'un fil AO au point fixe O ; elle se tient en équilibre suivant la verticale OA ; si on l'écarte de cette position et qu'on l'amène en B ,

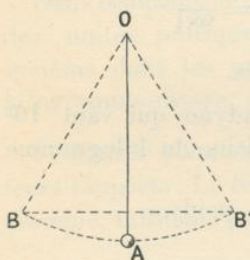


Fig. 5.

le fil étant tendu suivant OB , elle revient quand on la lâche, en décrivant l'arc de cercle AB ; mais elle dépasse sa position d'équilibre et remonte jusqu'en B' symétrique de B ; puis elle continue à osciller, jusqu'à ce que les frottements aient diminué l'amplitude de son mouvement au point de l'annuler.

On appelle pendule simple celui qui serait formé par un poids de très petites dimensions suspendu en O par un fil inextensible et sans poids.

On peut réaliser approximativement ces conditions par une petite sphère de métal suspendue à un fil métallique très fin.

Si on mesure le temps que met la sphère pour aller de B en B' , c'est-à-dire pour effectuer une oscillation simple, on trouve :

- 1) Que cette durée ne dépend pas du poids de la sphère.
- 2) Que cette durée ne dépend pas de la grandeur de l'arc BB' ; que cet arc soit de 1° ou de 10° , la durée reste la même.
- 3) En un même lieu elle dépend de la longueur du fil AO .

On trouve par le calcul et on peut vérifier par l'expérience que, pour des oscillations de peu d'amplitude (ne

dépassant pas 10°), le temps d'une oscillation simple, de B à B', est donné par la formule :

$$t = \pi \sqrt{\frac{l}{g}};$$

ce temps s'appelle la période (d'une oscillation simple). π étant le rapport de la circonférence du cercle au diamètre — l longueur OA — g accélération de la pesanteur. Ces deux dernières longueurs étant exprimées au moyen de la même unité, en mètres par exemple, t est donné en secondes. Exemple : $l = 1^m$; $g = 9^m 81$; $t = 1$ seconde environ.

§ II. — APPLICATION DU PENDULE A LA DÉTERMINATION DE L'ACCÉLÉRATION DE LA PESANTEUR.

Si on fait osciller un pendule, de longueur connue, et que l'on mesure la durée des oscillations, on peut tirer g de la formule précédente :

$$g = \frac{\pi^2 l}{t^2};$$

ce qui donne g en fonction de la longueur et de la période d'oscillation d'un pendule.

Borda a calculé g , en mesurant l et t : il comparait l'oscillation d'un pendule se rapprochant autant que possible du pendule simple, et celle du balancier d'une horloge astronomique bien réglée. Le pendule ne bat pas exactement la seconde ; donc, si, au début de l'observation, il passe à la verticale en même temps que le balancier, au coup suivant, il sera en avance ou en retard et ainsi de suite jusqu'à ce qu'il ait regagné ou perdu le temps d'une oscillation complète.

On note donc les « coïncidences », c'est-à-dire les moments où les deux instruments, pendule et balancier, passent en même temps à la verticale. L'horloge ayant inscrit le nombre d'oscillations de son balancier, on compare

le nombre des oscillations du pendule et on en déduit la durée de chacune d'elles.

Cette méthode manque un peu de précision, parce que le pendule ainsi constitué n'est pas exactement un pendule simple ; par suite, la formule n'est pas exacte.

Ces expériences ont été reprises au moyen du « Pendule composé » et faites avec la plus grande précision (Colonel Defforges). Elles ont permis l'étude précise des variations de g dont nous avons parlé précédemment.

§ III. — MESURE DES LONGUEURS. VERNIER.

1. — Pour mesurer les longueurs, on les compare à l'unité, par suite au mètre ; nous avons dit que l'étalon du mètre existait sous forme d'une barre de platine. On compare à cette longueur les étalons secondaires que l'on veut graduer et, avec les étalons secondaires, on gradue les règles divisées destinées à la mesure des longueurs.

Mais on peut avoir de la difficulté à faire une mesure exacte ; nous avons, par exemple, un mètre divisé et portant des graduations en centimètres ; ces centimètres sont aussi divisés en millimètres ; mais il sera difficile de faire des traits assez fins pour lire nettement les dixièmes de millimètres. Le *vernier* est un instrument destiné à obtenir une précision suffisante avec des graduations assez

espacées ; il permet d'apprécier le $\frac{1}{10}$ de millimètre avec des traits écartés d'un millimètre environ.

D'une façon générale, il permet d'apprécier le $\frac{1}{n}$ de l'unité de longueur, au moyen de traits distants de $\frac{n-1}{n}$ (dans les verniers employés ordinairement).

2. *Vernier rectiligne.* — Supposons que l'on ait une

longueur à mesurer ; nous appliquons dessus une règle R graduée, en millimètres par exemple (fig. 6) ; l'extrémité A de la longueur tombe entre les divisions N et N + 1.

La longueur cherchée est comprise entre N millimètres et (N + 1) millimètres.

On veut évaluer le nombre de dixièmes de millimètres que possède cette longueur en plus des N millimètres. C'est alors qu'intervient l'usage du vernier : ce dernier se compose d'une petite réglette *r* partagée en 10 divisions, mais sa longueur AB ne vaut que 9 millimètres ; chaque division a donc $\frac{9}{10}$ de millimètre de longueur. Cette réglette

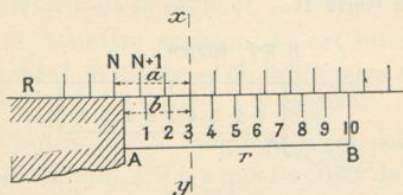


Fig. 6.

est appuyée contre l'extrémité A de la longueur cherchée et les traits de la réglette se présentent plus ou moins décalés devant ceux de la règle R.

Deux cas se présentent :

a) Une division de la réglette est en coïncidence avec une division de la règle (fig. 6). Par exemple, la division 3 de la réglette est exactement en face de la division N + 3 de la règle.

On voit, par simple examen de la figure 6, que la longueur cherchée est la différence des deux longueurs *a* et *b* marquées sur la figure :

Or $a = 3$ mm.

$$b = 3 \text{ divisions de la réglette, donc } = 3 \times \frac{9}{10} \text{ mm.}$$

$$a - b = 3 \left(1 - \frac{9}{10} \right) = \frac{3}{10} \text{ de mm.}$$

La longueur cherchée est $3/10$ de mm.

Le même raisonnement appliqué à un numéro quelconque de la règlette donne comme nombre de dixièmes ce numéro.

Donc, le chiffre relatif à la graduation en concordance avec une graduation de la règle principale indique le nombre de dixièmes de millimètres contenus dans la longueur en sus du nombre de millimètres que l'on a déjà obtenu par simple lecture.

Dans le cas précédent, la longueur est N millimètres $+ 3/10$ de mm.

b) Aucune division de la règlette ne concorde avec une division de la règle R.

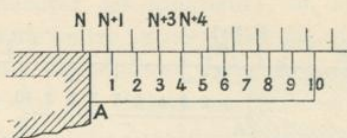


Fig. 7.

On a constaté par la démonstration qui précède que la longueur mesurée sur la figure 6 possédait exactement 3 dixièmes de millimètre en sus des N millimètres.

Supposons que la longueur soit N millim. $+ 3/10$ de millim. $+ \frac{p}{100}$ de mm. (p étant inférieur à 10) (fig. 7).

A tombe donc entre N et $N + 1$ de la grande règle ; et la graduation 3 du vernier tombe un peu au delà de la graduation $N + 3$ de la grande règle, puisque nous pouvons supposer la figure 7 tirée de la figure 6 par un glissement de A, et par suite du vernier, vers la droite, de $\frac{p}{100}$ de mm.

Mais l'intervalle 3-4 étant égal à $9/10$ de mm., le trait 4 tombe en dedans de l'intervalle $N + 3$, $N + 4$; et le trait 4 est distant du trait N de $\frac{p'}{100}$ tel que $p' + p = 10$.

En effet, on peut écrire :

$$N + 3 - N + 4 = 1^{\text{mm}} = \text{Interv. } (N + 3) - 3 \text{ ou } \frac{p}{100} \text{ de mm.}$$

$$+ \text{Intervalle } (3-4) \text{ ou } \frac{9}{10} \text{ de mm.}$$

$$+ \text{Interv. } 4 - (N + 4) \text{ ou } \frac{p'}{100} \text{ de mm.}$$

$$\text{donc : } \frac{p + p'}{100} + \frac{9}{10} = 1 ; \text{ d'où : } p + p' = 10.$$

Donc, dans ce cas, il n'y a pas coïncidence, mais un intervalle (3-4) du vernier tombe à l'intérieur d'un intervalle $N + 3$, $N + 4$ de la règle R.

En lisant la première division de cet intervalle, 3, on obtient le nombre de dixièmes de millimètre en plus des N millimètres.

On sait en outre que la longueur n'est pas exactement N mm. + $3/10$ de mm. ; il y a une fraction de dixième que nous n'avons pas évaluée.

Cet appareil permet donc d'évaluer des longueurs au $1/10$ de mm. près, avec une graduation formée de traits distants de $9/10$.

Au lieu de millimètres, on pourrait employer une division en $\frac{1}{n}$ d'unité de longueur ; n étant un nombre quelconque. Avec une règle de $\frac{n-1}{n}$ de longueur, on apprécierait la longueur à $\frac{1}{n}$ près.

3. *Vernier circulaire.* — Un appareil analogue permet la mesure précise des angles. Par exemple, avec un limbe gradué en demi-degrés, il permet de lire le $1/10$ de $1/2$ degré, par conséquent d'apprécier avec une précision de $\frac{30}{10} = 3'$.

On ne recommencera pas la théorie de l'appareil qui est exactement la même que dans le cas précédent, on se bornera à indiquer les dispositions de détail destinées à faciliter les mesures et à assurer toute l'exactitude possible.

L'alidade A tourne autour du centre O du limbe gradué; cette alidade porte à sa partie inférieure (fig. 8) une fenêtre

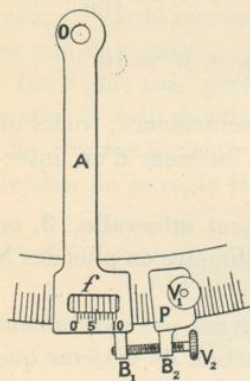


Fig. 8.

f sur le bord de laquelle est tracée la graduation du vernier; une pièce P est reliée à l'alidade au moyen d'une vis V_2 prenant appui sur deux butées B_1 B_2 . Cette pièce P embrasse le limbe et peut être serrée contre lui au moyen d'une vis V_1 ; quand cette vis est en prise, l'alidade est immobilisée sur le limbe.

Pour faire une lecture, on desserre V_1 et on fait courir l'ensemble A, P sur le limbe jusqu'à amener le zéro du vernier aux environs de l'angle à mesurer; c'est, par exemple dans

un sextant, quand on aura amené l'image de l'astre visé au voisinage de l'horizon.

On serre alors V_1 et on achève l'observation en déplaçant A par rapport à P et par suite au limbe, au moyen de la vis V_2 . En somme, on dégrossit la mesure en transportant l'ensemble sur le limbe, et on achève par le mouvement de la vis V_2 qui permet de très petits déplacements.

Le contact de l'image et de l'horizon (cas du sextant) étant obtenu, on fait la lecture sur le vernier comme on faisait sur le vernier rectiligne; le zéro du vernier tombe entre deux divisions du limbe et on cherche si une division du vernier est en coïncidence avec une division du limbe, etc.

Souvent une petite loupe se trouve devant le vernier afin de lire plus commodément sur les divisions ainsi grossies.

§ IV. — MESURE DES MASSES. BALANCE.

1. — On a décrit précédemment un peson à ressort permettant de mesurer les poids et en général toute force appliquée à l'extrémité libre du ressort.

En divisant l'effort indiqué sur la graduation par l'accélération de la pesanteur à l'endroit où l'on fait la mesure, on obtiendrait la masse.

On fait plutôt des mesures directes de masses, c'est-à-dire que l'on compare la masse des objets à la masse unité; comme on ne peut séparer la masse de l'accélération, on fait la mesure en comparant les poids au même endroit; l'accélération étant la même, le rapport des poids est égal au rapport des masses :

Par exemple, on veut peser un poids A au lieu où l'accélération de la pesanteur est g ; on a : $A = Mg$, M étant la masse du poids A .

Comparons au kilogramme de masse unité (m); le poids du kilog. est mg .

Par comparaison, on trouve : $A = p$ kilogr.

Donc $Mg = pmg$; d'où $M = pm$; on a donc ainsi comparé les masses, et le résultat est indépendant de l'accélération de la pesanteur, alors qu'avec le dynamomètre à ressort, il était nécessaire de la connaître, puisque le poids varie suivant la latitude et la hauteur du lieu d'observation.

L'appareil qui sert à la comparaison des poids, et par suite des masses, se nomme Balance.

2. *Balance.* — On ne décrira que la balance à fléau, seule précise et, par suite, seule employée dans les mesures en physique et en chimie; les autres balances : romaines, bascules, servent à effectuer de grosses pesées, avec une approximation grossière; leur étude est du ressort de la Mécanique Statique, car elle se ramène à une composition de forces parallèles.

La balance (fig. 9) comporte un fléau métallique allongé AA' , oscillant autour d'un point O ; à ses extrémités A, A' , pendent deux plateaux dans lesquels on met les poids à comparer.

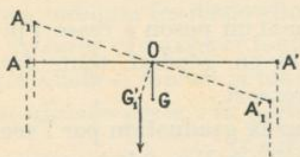


Fig. 9.

Quand la balance n'est pas chargée, le centre de gravité vient en G sur la verticale du point de suspension ; l'appareil est construit de manière que le fléau soit à peu près horizontal, et que les trois points AOA' soient en ligne droite.

Ceci posé, quelles sont les conditions auxquelles la balance doit satisfaire pour permettre les pesées ?

a) La balance étant vide, nous supposons le fléau AOA' horizontal, OG vertical ; nous mettons dans les plateaux des poids égaux ; pour que la balance nous donne une indication exacte, le fléau ne doit pas bouger ; il s'ensuit que la composante des deux poids égaux suspendus en A et A' doit passer sur OG : comme ces deux poids égaux constituent deux forces parallèles égales, leur composante a son point d'application au milieu de AA' . Donc, pour que la balance soit juste, il faut que les deux bras AO, OA' soient égaux.

b) *Équilibre.* — Il faut que, si le fléau se met à osciller, l'équilibre se rétablisse de lui-même dans la position primitive ; il faut donc pour cela que le point G soit au-dessous de O ; s'il était au-dessus, le fléau se renverserait ; s'il était en O , il y aurait équilibre dans toutes les positions ; il n'y a que dans le cas où G est au-dessous de O que le poids tend à le ramener à sa position primitive (fig. 9).

c) *Sensibilité.* — Si l'on place des poids inégaux dans les deux plateaux, le fléau s'incline et le poids de l'appareil appliqué en G , s'écartant de la verticale, fait équilibre à la différence des poids déposés dans les plateaux.

La balance sera d'autant plus sensible que l'inclinaison du fléau sera plus grande pour une même différence de poids ; cela se produira quand le poids de l'appareil appliqué en G_1 aura moins d'influence, par suite quand OG sera plus petit. Donc, une balance sera d'autant plus sensible que le centre de gravité de l'appareil sera plus rapproché du point de suspension.

En résumé, une balance juste et sensible aura les trois points AOA' en ligne droite — les bras OA , OA' égaux — le centre de gravité G sous le point de suspension O et près de ce point.

Pour réaliser ces conditions, les balances précises sont ainsi construites :

Le fléau F (fig. 10) est formé d'une lame métallique en forme de losange, de manière à offrir beaucoup de rigidité. La suspension est faite par des couteaux c d'acier trempé reposant sur un plan P d'agate.

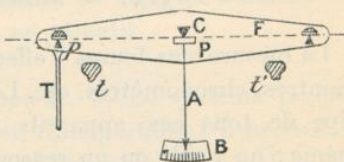


Fig. 10.

Il en existe un en avant du fléau, un autre en arrière. Le fléau oscille autour de l'arête du couteau. Aux extrémités, deux couteaux renversés soutiennent d'une manière analogue les plateaux suspendus à une tige T , au moyen de plans d'agate ou d'acier p .

Une longue aiguille A fixée sur le fléau se déplace devant un cadran divisé B , de façon à bien marquer les déplacements du fléau.

L'ensemble est placé dans une cage de verre pour éviter la poussière et les courants d'air ; en outre, quand l'appareil ne sert pas, le fléau ne repose pas sur le couteau c qui fatiguerait, mais sur deux tampons t et t' .

3. *Double pesée.* — Quelque précise que soit la construction, on ne peut arriver à rendre les deux bras du fléau absolument égaux ; toutes les pesées seraient donc entachées d'erreur. Borda corrigea cette défectuosité par la méthode de la double pesée.

Dans un des plateaux (fig. 11 a), on met le corps à peser A; et on amène l'aiguille au 0 au moyen d'une tare T placée dans l'autre plateau. Cela fait, on enlève A et on le remplace (fig. 11 b) par des poids

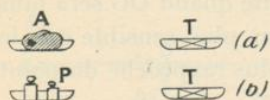


Fig. 11.

place (fig. 11 b) par des poids marqués P, de façon à ramener l'aiguille au 0. Dans les deux cas, l'appareil se trouve identiquement dans les mêmes conditions; comme la tare T n'a pas changé, c'est que les poids P représentent le poids exact du corps A. On voit que cette méthode n'exige plus l'emploi d'une balance exacte, mais seulement une balance stable et sensible, ce qui se réalise plus facilement.

§ V. — MESURE DES TEMPS.

La mesure des temps s'effectue au moyen des horloges, montres, chronomètres, etc. Le principe de tous ces appareils est le même: un poids ou un ressort tend à faire tourner les aiguilles; mais cet appareil est bridé par un régulateur qui ne laisse tourner les aiguilles que suivant une vitesse déterminée.

L'appareil qui tend à faire tourner les roues dentées donnant le mouvement aux aiguilles n'a aucun intérêt au point de vue qui nous occupe; le seul intérêt réside dans le régulateur.

1. Régulateur par pendule. —

Un pendule P, généralement de forme lenticulaire, suspendu en un point B, peut osciller; et il entraîne au moyen d'une fourche f, qui embrasse sa tige, un arc de cercle A muni de deux crochets.

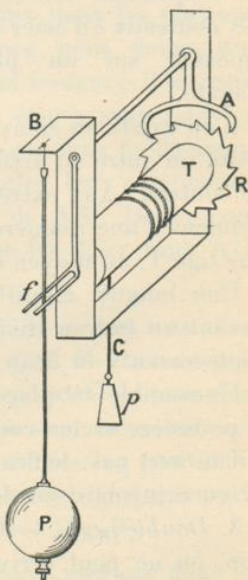


Fig. 12.

Cet arc se déplace dans le plan d'une roue à dents inclinées R . Un tambour T porte, enroulée, une corde c soutenant un poids p , qui tend à faire tourner le tambour; mais les dents de l'arc A accrochent celles de la roue R ; on peut voir sur la figure que, si, en oscillant, la dent de gauche libère une dent de la roue, celle de droite en arrête une autre. A l'oscillation inverse, ce sera la dent de droite qui libérera et celle de gauche qui accrochera.

En somme, la roue ne peut tourner que par à-coups réglés par le pendule; le mouvement du pendule est lui-même entretenu par le mouvement des dents de la roue R contre l'arc A .

En faisant varier la longueur du pendule, on donne au tambour la vitesse de rotation que l'on désire.

En raccourcissant la longueur de sa tige, on accélère le mouvement; en l'augmentant, on ralentit.

2. *Régulateur par ressort spiral.* — Le système précédent a l'inconvénient d'être peu transportable; il nécessite en effet un point d'appui fixe et l'immobilité complète de son support, afin de ne pas altérer le mouvement du balancier.

Aussi les montres, chronomètres, et tous les appareils transportables emploient-ils comme régulateur le ressort spiral; cet organe est visible sur toutes les montres en ouvrant le boîtier. Il se compose d'un ressort extrêmement fin enroulé en spirale et qui se tord et se détord périodiquement; cette période de torsion du ressort a la même importance que la période d'oscillation du balancier.

Le centre du ressort porte un système d'échappement qui permet la rotation par à-coups d'une petite roue, d'une façon analogue à celle que nous avons précédemment décrite.

Pour modifier cette période d'oscillation du ressort, on modifie sa longueur par son point d'attache au moyen d'un système de réglage portant une aiguille. En somme, le

fonctionnement, par son principe, est complètement analogue au cas d'un balancier.

Le ressort spiral doit être fabriqué avec soin; il doit être, autant que possible, fait d'une manière peu dilatable, de façon que sa longueur soit peu différente été comme hiver; autrement la marche changerait avec la température.

En outre, il ne doit pas être susceptible de s'aimanter, car, si l'on approchait la montre d'un champ magnétique puissant, les pôles d'une dynamo par exemple, l'aimantation des spires modifierait les battements du ressort et pourrait même arrêter complètement la marche.

§ VI. — ÉTUDE DES MOUVEMENTS RECTILIGNES. MOUVEMENTS PENDULAIRES.

1. *Appareil enregistreur Morin.* — Comme exemple d'appareil pouvant servir à l'étude d'un mouvement rectiligne, nous décrirons cet appareil qui a servi à l'étude de la chute des corps.

Un cylindre C tourne d'un mouvement uniforme autour

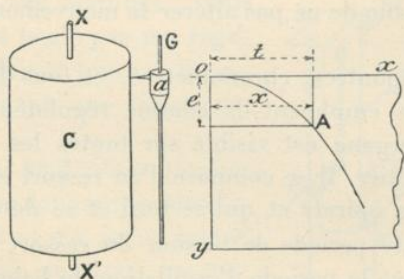


Fig. 13.

d'un axe XX' ; ce cylindre porte une feuille de papier enroulée sur sa surface et sur laquelle appuie un crayon porté par le corps a dont on veut étudier le mouvement.

Ce corps a est guidé rectilignement par un guide G .

Dans le cas de la chute des corps, on laisse a tomber librement.

L'inscription de la courbe effectuée, on déroule le papier; soit oy la génératrice verticale sur laquelle commence le mouvement.

Soit un point A de la courbe; à ce point correspond le temps t , durée du déroulement de la longueur x devant le crayon.

e est l'espace parcouru par le corps a ; cet espace, dans le cas de la chute des corps, est donné par l'équation :

$$e = \frac{g}{2} t^2.$$

La courbe ainsi inscrite est donc, dans ce cas, une parabole.

Cet appareil peut servir à enregistrer toutes sortes de mouvements rectilignes se produisant suivant une génératrice du cylindre.

2. *Mouvements pendulaires.* — Nous avons étudié le mouvement du pendule; on donne, par analogie, le nom de mouvements pendulaires à beaucoup de mouvements rectilignes ou angulaires, caractérisés par des oscillations de même durée ou isochrones.

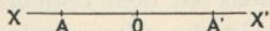


Fig. 14.

Soit une droite XX' et un mobile qui se déplace entre deux points $A A'$; le mouvement sera pendulaire si les durées de ces vibrations sont égales.

a) Ce mouvement est dit sinusoïdal, si la distance du mobile peut être à chaque instant représentée par :

$$x = a \sin vt,$$

ce qu'on écrit souvent : $x = a \sin 2\pi \frac{t}{T}$;

on voit que a représente la longueur $OA = OA'$; de plus,

Physique et chimie. — GILLE.

pour des temps différant de T ou d'un multiple de T , les x sont égaux.

Les vitesses et les accélérations sont aussi égales ; car elles sont les dérivées premières et secondes, et aussi de forme sinusoïdale :

$$v = \frac{2\pi}{T} a \cos 2\pi \frac{t}{T}$$

$$\gamma = - \left(\frac{2\pi}{T} \right)^2 a \sin \frac{2\pi t}{T}$$

T est la *période* du mouvement sinusoïdal.

Ce mouvement s'inscrit, sur l'appareil précédemment décrit, sous la forme d'un sinusoïde.

b) *Mouvement périodique amorti*. — Au lieu d'une sinusoïde régulière, l'inscription de certains mouvements donne une courbe qui s'aplatit de plus en plus ; le mouvement diminue d'amplitude quand le temps augmente.

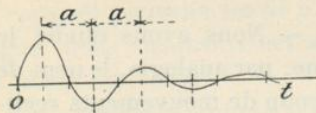


Fig. 15.

Mais l'intervalle a , entre les maximums successifs, reste le même ; les oscillations ont donc toujours une durée égale, mais avec des amplitudes décroissantes : c'est le cas du pendule, dont la résistance de l'air ralentit constamment le mouvement.

c) *Mouvements angulaires*. — On a vu que le pendule effectuait son mouvement en balayant avec son fil de suspension les angles BOA , AOB' . C'est un mouvement angulaire.

L'angle θ peut être exprimé parfois par un sinus :

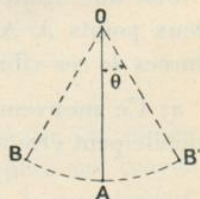


Fig. 16.

$$\theta = \theta_0 \sin \frac{2\pi t}{T} ; \quad \theta_0 = \widehat{B'OA} = \widehat{AOB}.$$

On a donc un mouvement angulaire sinusoïdal.

Parfois il se rencontre aussi sous la forme d'oscillations amorties, mais de durée constante ; tous ces mouvements sont analogues aux mouvements rectilignes, à condition de remplacer la longueur x par l'arc ou l'angle θ .

Ce genre de mouvements se trouve en particulier dans l'étude des inclinaisons du navire roulant en eau calme.

LIVRE II

HYDROSTATIQUE

CHAPITRE I

Transmission des pressions. Liquides pesants. Applications.

§ I. — DÉFINITIONS.

1. *Liquides*. — On peut définir les liquides par une propriété qui leur est commune avec les gaz : leurs molécules, au lieu d'être liées les unes aux autres, comme dans les solides, peuvent glisser sans frottement les unes sur les autres. Pour les distinguer des gaz, nous signalerons cette autre propriété : leur compressibilité à peu près nulle ; quelque forte que soit la pression qu'ils subissent, leur volume est à peu près invariable.

Cette deuxième propriété nous amène donc à définir la pression.

2. — Soit un fluide, liquide ou gaz, contenu dans une enveloppe résistante A ; si le fluide tend à sortir de cette enveloppe, à augmenter son volume, on dit qu'il exerce une pression sur cette enveloppe.

Soit une très petite surface S de l'enveloppe ; si elle forme un petit piston pouvant se déplacer, on constate qu'il faut exercer une force F, pour la maintenir en place.

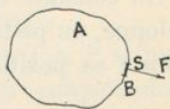


Fig. 17.

On appelle pression du fluide au point B le rapport $\frac{F}{S}$.

En unités CGS, on l'évaluera en grammes par centimètre carré. Fréquemment en pratique (machines en particulier), on la comptera en kilogrammes par centimètre carré.

§ II. — TRANSMISSION DES PRESSIONS. PRINCIPE DE PASCAL.

Soit un fluide contenu dans une enceinte résistante A ; ce fluide pourra être un liquide ou un gaz, les conclusions auxquelles nous arriverons seront identiques.

On supposera seulement que le fluide a un poids négligeable ; en parlant des liquides pesants, on pourra constater les corrections que le poids du fluide nous amènerait à faire à la loi simple de la transmission des pressions.

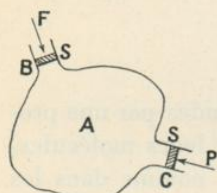


Fig. 18.

En un point B, un cylindre de section S permet le déplacement d'un piston sur lequel on peut faire agir une force ; si le fluide est un liquide, par suite incompressible, le piston ne se déplacera pas quand on exercera une pression sur lui. Si c'est un gaz, son volume diminuant sous l'effet de la pression, le piston s'enfoncera.

Si on exerce au point B une force F sur une section S, on soumet le fluide à la pression $P = \frac{F}{S}$.

On constate qu'en un autre point C quelconque de l'enveloppe, un piston de même surface ne pourra être maintenu à sa position qu'au moyen d'une force égale F ; donc en ce point C, il s'exerce la même pression $P = \frac{F}{S}$.

En tous les points de l'enveloppe, la pression est la même, et partout normale à l'enveloppe. Il s'ensuit que, si en C le piston, au lieu d'avoir une surface S, avait une surface 10 S, 100 S ou 1000 S, il faudrait une force 10 F, 100 F ou

1000 F pour le maintenir. C'est le principe de Pascal, applicable aux liquides comme aux gaz contenus dans une enveloppe et soumis à une certaine pression.

§ III. — APPLICATION. PRESSE HYDRAULIQUE.

Une application immédiate du principe de Pascal se trouve dans la presse hydraulique ; on exerce sur le liquide contenu dans l'appareil (fig. 19) une pression au moyen d'un petit piston de pompe p ; le plus souvent, c'est une pompe à piston plongeur. Un gros piston P sert à comprimer des objets A sur une pièce fixe F .

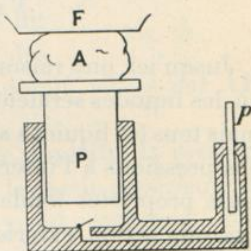


Fig. 19.

Si la force exercée sur le piston p est (F) , les surfaces des 2 pistons S et s , l'effort exercé sur A est :

$$\frac{F \times S}{s} ; \text{ on a donc multiplié l'effort par le rapport } \frac{S}{s}$$

qui peut être considérable.

Dispositions de détail. — La difficulté est d'avoir sur cet appareil des joints suffisamment étanches ; l'eau soumise à une forte pression tend à gicler par tous les joints. Sur le petit piston p , on emploie généralement un presse-étoupe.

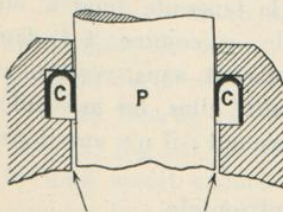


Fig. 20.

Mais le grand piston P a une circonférence trop considérable pour permettre l'emploi d'une disposition analogue.

On utilise alors un joint avec un cuir embouti : le piston P est entouré par un cuir C en forme de gouttière ou de demi-tore logé dans une rainure du bâti de la machine.

La pression intérieure tend à appliquer énergiquement ce cuir dans sa rainure et contre le piston ; plus la pression de l'eau est forte, plus le cuir est distendu énergiquement. On a donc un joint très étanche et devenant de plus en plus étanche au fur et à mesure que la pression augmente.

§ IV. — LIQUIDES PESANTS. SURFACE LIBRE. VASES COMMUNICANTS.

Jusqu'ici, on a raisonné dans le cas tout à fait hypothétique où les liquides seraient soustraits à l'action de la pesanteur ; mais tous les liquides sont pesants. Cette propriété provoque des pressions à l'intérieur des liquides, mais sans détruire leurs propriétés fondamentales. Si, de plus, on exerce sur eux une action extérieure, les effets causés par cette action et par la pesanteur se superposent.

1. *Surface libre.* — La surface libre d'un liquide pesant, contenu dans un vase et en état d'équilibre, est horizontale ; en effet, soit une surface quelconque MN limitant le liquide

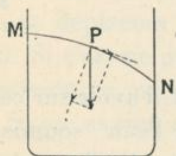


Fig. 21.

à sa partie supérieure : en un point M, la molécule tend à glisser, car, la tangente à la surface libre n'étant pas horizontale, on peut décomposer l'action de la pesanteur suivant la tangente et la normale ; la composante suivant la tangente tend à entraîner la molécule, et, comme (§ I) dans un liquide les molécules se déplacent sans résistance, puisqu'il n'y a pas de frottement entre elles, les molécules telles que P se mettraient en mouvement : il n'y aurait pas d'équilibre.

Donc la surface libre doit être horizontale.

2. — Comment sont réparties les pressions dans le liquide pesant ? La pression exercée en un point quelconque est indépendante de l'orientation de la surface sur laquelle elle s'exerce ; elle ne dépend d'autre part que de la distance

comptée verticalement, qui sépare cette surface de la surface libre.

Soit (fig. 22) un vase de forme quelconque contenant un liquide ; MN la surface libre horizontale ; menons un plan AB horizontal à distance h de la surface MN. Tous les points du vase situés sur ce plan subissent la même pression ; d'autre part, ces pressions sont normales à la surface comme on l'a dit au § II. Les pressions p , p' auront des directions différentes aux différents points situés sur AB, mais leur valeur sera la même.

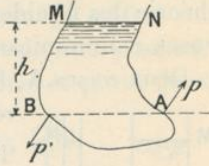


Fig. 22.

Il n'y a donc pas à considérer, pour connaître la pression en un point d'un liquide, la forme de la partie supérieure du vase, ni la quantité de liquide qui y est contenue, mais seulement la distance qui sépare le point de la surface libre, distance comptée verticalement.

Pour savoir quelle est cette valeur de la pression, considérons (fig. 23) un vase cylindrique vertical de section S , rempli de liquide sur une hauteur h . Cette colonne liquide peut être décomposée en petits éléments mn dont le poids tend à comprimer les éléments placés au-dessous. Ces efforts se retrouvent intégralement sur le fond.

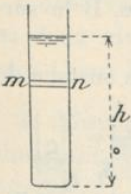


Fig. 23.

Donc, si d est le poids de l'unité de volume du liquide, la force agissant sur le fond est Shd et la pression est $p = hd$.

Si, au lieu de la forme cylindrique AB, j'avais pris un vase CD (fig. 24) la pression sur le fond serait encore la même, quoique le poids de liquide contenu soit plus considérable ; cela tient à ce que, dans une section pq , il n'y a que la partie mn située au-dessus du fond qui transmette son action intégralement sur le

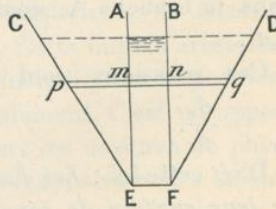


Fig. 24.

fond. Les parties pm , nq ne contribuent pas à faire effort sur le fond EF .

3. *Vases communicants*. — Une application directe de la théorie des liquides pesants se trouve dans l'appareil appelé vases communicants.

Deux vases A , B , sont réunis par leur partie inférieure et remplis d'un même liquide; on constate que le niveau dans les deux vases se trouve à la même hauteur: c'est que les deux surfaces M , N constituent la surface libre du vase (AB); toute la surface libre étant, on vient de le dire, horizontale, M et N sont sur un même plan horizontal, par suite à la même hauteur.

Si l'on met dans les deux vases A , B , des liquides de densités différentes, le problème est plus complexe; les liquides restent à des hauteurs différentes; mais on peut trouver la différence de hauteur entre leurs niveaux. Soit A la surface libre de l'un, C celle de l'autre, B la surface de séparation (fig. 26).

Menons le plan horizontal MN passant par la surface de séparation B des deux liquides (1) et (2). On a dit plus haut qu'en tous points situés sur un plan horizontal la pression était la même dans un même liquide. On peut considérer tous les points de ce plan comme situés dans le liquide (2), puisqu'ils sont sur sa surface de séparation avec (1).

En évaluant la pression comme on l'a indiqué plus haut, dans la branche A , nous avons $h_1 d_1$; dans la branche C , $h_2 d_2$.

Ces pressions sont égales, donc $h_1 d_1 = h_2 d_2$ ou :

$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{d_2}{d_1}.$$

D'où cette loi : *Les hauteurs des deux liquides au-dessus de leur surface de séparation sont en raison inverse des densités.*

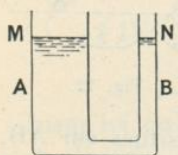


Fig. 25.

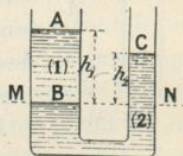


Fig. 26.

§ V. — APPLICATIONS.

1. *Niveau d'eau.* — Cet appareil est basé sur la propriété des vases communicants. Un tube de métal est fixé sur un pied à trois branches, de façon à pouvoir être posé sur le sol ; le tube se recourbe à ses extrémités et porte deux

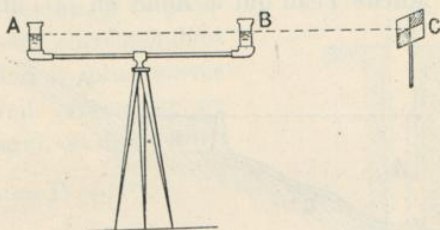


Fig. 27.

fiotes de verre. On remplit l'appareil d'eau, de façon à avoir les niveaux du liquide dans les fioles à peu près à mi-hauteur.

L'observateur regarde suivant la ligne AB tangentant les deux niveaux et peut ainsi faire placer à distance une mire C sur l'horizontale AB.

2. *Niveau à bulle d'air.* — Ce niveau sert à vérifier l'horizontalité d'un plan. Il est formé d'un tube de verre légèrement recourbé, rempli d'eau sauf un petit espace qui est occupé par une bulle d'air ; le tube est contenu dans

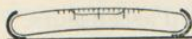


Fig. 28.

une monture et divisé à sa partie supérieure de façon à noter les déplacements de la bulle. Cette bulle s'arrête au point le plus élevé du tube ; des traits indiquent sa position quand l'appareil est placé horizontalement. C'est un appareil très sensible et très employé dans les mesures de physique et d'astronomie exigeant que les instruments soient placés d'une manière très précise.

3. *Distribution d'eau dans les villes.* — Un ruisseau A est capté et dirigé sur un réservoir R où l'eau s'accumule ; ce réservoir a l'avantage de pouvoir constituer une réserve d'eau pour les époques de sécheresse où la consommation d'eau est supérieure au débit du ruisseau A.

La ville à alimenter se trouve en contre-bas en V. Une conduite C amène l'eau qui a donc en (a) une pression

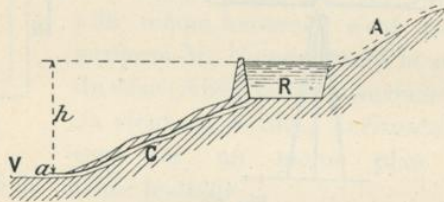


Fig. 29.

déterminée par la hauteur h du niveau du réservoir au-dessus de (a). Cette hauteur doit être suffisante pour que l'eau puisse arriver à tous les étages des maisons ; il n'y a pas d'intérêt à ce qu'elle soit trop forte, car il faudrait établir des conduites très résistantes et l'eau sous pression giclerait avec une force considérable qui pourrait être gênante quand on ouvrirait les robinets.

4. *Ascenseur hydraulique.* — La présence d'eau sous pression, dans toutes les villes munies d'un tel service d'eau, permet l'installation d'ascenseurs. Un piston porte la chambre mobile formant l'ascenseur qui se meut dans une cage ; ce piston très long descend dans un puits où l'eau peut arriver par un tiroir de distribution T ; ce tiroir permet l'accès dans le puits de l'eau sous pression ou son évacuation dans l'égout.

En général, une corde conduit ce tiroir ; ou bien elle traverse l'ascenseur et peut être tirée à la main pour mettre en mouvement et arrêter l'appareil, ou bien elle est accrochée automatiquement (fig. 30) par un bras B de la cage

et ferme par suite l'admission d'eau quand l'ascenseur est arrivé à la hauteur voulue.

On voit, pour que l'appareil puisse fonctionner, que, si P est son poids mort, P' celui des voyageurs, S la surface du piston, p la pression de l'eau correspondant à la position la plus élevée de l'appareil (ascenseur au dernier étage), on doit avoir :

$$Sp = P + P'.$$

Il y aura donc intérêt à faire le puits le plus profond possible et la tige par suite très longue, pour avoir la pression la plus forte possible ; à condition toutefois que l'augmentation de poids de la tige n'absorbe pas tout le gain de la pression.

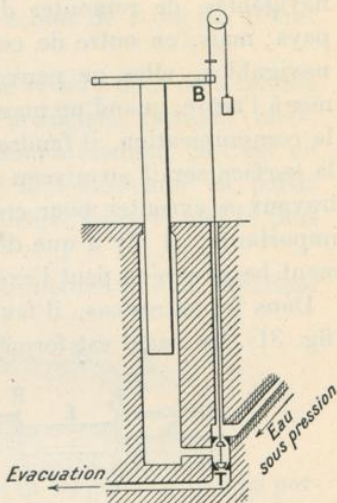


Fig. 30.

5. *Ascenseur hydro-électrique.* — L'inconvénient de l'appareil précédent est qu'en été, par exemple, quand les niveaux des réservoirs sont bas, la pression est diminuée d'autant ; les ascenseurs ont donc moins de force et parfois ne peuvent plus monter aux derniers étages. On y remédie par la disposition hydro-électrique qui permet d'obtenir beaucoup de régularité dans le jeu de l'appareil : au lieu d'admettre directement l'eau dans le puits, on la pompe avec une machine, conduite électriquement, qui la refoule dans le puits. On peut ainsi obtenir une pression plus constante, plus forte que la pression ordinaire, ce qui permet de réduire la surface du piston. Au lieu de commander l'appareil par un tiroir à eau, on met en marche par un commutateur qui provoque la mise en marche du moteur électrique.

6. *Canaux.* — Les rivières permettent, quand elles sont navigables, de remonter de la mer dans l'intérieur d'un pays; mais, en outre de ce qu'elles ne sont pas toujours navigables, elles ne peuvent permettre de passer d'une mer à l'autre, quand un massif élevé les sépare. Pour établir la communication, il faudrait l'existence d'un canal, dont la surface serait au niveau des deux mers. Par suite, les travaux à exécuter pour creuser un tel canal seraient trop importants; il n'y a que dans le cas de terres suffisamment basses qu'on peut l'exécuter (Suez).

Dans les autres cas, il faut employer un canal à écluses (fig. 31). Le canal est formé d'un certain nombre de biefs,

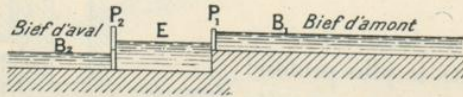


Fig. 31.

$B_1, B_2 \dots$ à des niveaux différents, reliés entre eux par des écluses E. L'écluse est un sas permettant le passage des bateaux d'un bief, B_1 , à un autre, B_2 , de niveau différent.

Pour cela, l'écluse est fermée par deux portes P_1, P_2 , s'ouvrant vers le côté d'où vient la pression, donc toujours vers l'amont du canal. Ces portes sont munies de vannes qui permettent de mettre l'écluse en communication avec un bief ou avec l'autre.

Ainsi, un bateau venant de B_1 entrera dans l'écluse préalablement mise en communication avec B_1 ; l'égalité de niveau étant établie en E et en B_1 , la porte P_1 s'ouvrira sans difficulté et toute la pression se reporte sur P_2 ; on ferme P_1 , une fois le bateau dans l'écluse.

On met E et B_2 en relation et le niveau baisse jusqu'à celui de B_2 ; alors P_2 peut s'ouvrir et le bateau passer sur B_2 .

La même opération effectuée en sens inverse permet le passage de B_2 en B_1 . On voit qu'à chaque opération une

quantité d'eau égale à la surface de l'écluse multipliée par la différence des niveaux B_1 , B_2 s'écoule de B_1 en B_2 . Il faut donc alimenter les biefs d'amont.

Si le canal est constitué par une rivière dont on a rectifié le cours et muni les échelons artificiels, formant biefs, d'écluses, son débit peut suffire pour alimenter. Si c'est un canal complètement artificiel, il faut alimenter sa partie haute par une rivière captée et dirigée dans le bief le plus élevé.

On peut ainsi, à condition d'alimenter le bief supérieur

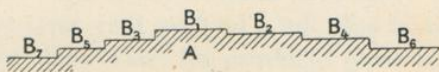


Fig. 32.

B_1 , passer d'un niveau B_7 au niveau B_6 par-dessus une partie élevée A.

Si le débit de la rivière canalisée ou de la rivière captée et envoyée en B_1 est supérieur au débit occasionné dans les écluses par le passage des bateaux, il faut prendre des précautions pour éviter que l'eau ne monte d'une façon anormale et ne passe par-dessus les portes.

On y remédie au moyen de déversoirs (fig. 33).

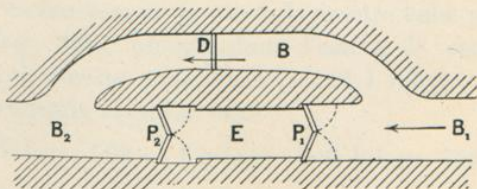


Fig. 33.

Le bief B_1 communique avec B_2 non seulement au moyen de l'écluse E, mais au moyen d'un bras B sur lequel est établi un déversoir D.

A ce déversoir D (fig. 34), se retrouve la différence de

niveau entre B_1 et B_2 ; et si le niveau de B_1 s'élève trop, le déversoir permet la décharge directe en B_2 ; l'écluse est donc toujours protégée contre une élévation anormale des niveaux supérieurs.

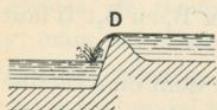


Fig. 34.

On voit qu'en général toute installation de canal devra comporter, à côté de chaque écluse, l'installation d'un déversoir.

CHAPITRE II

Corps flottants. Densité.

§ I. — PRINCIPE D'ARCHIMÈDE.

Les corps solides plongés dans un liquide viennent à la surface ou coulent au fond ; dans le premier cas, on a les corps flottants ; les corps allant au fond sont dits « fondriers ». Mais les corps qui vont au fond n'ont plus le même poids apparent que dans l'air ; ils semblent peser moins. Il est rare qu'un corps reste en équilibre au milieu d'un liquide, il faudrait l'égalité absolue de son poids et du liquide déplacé, comme on le verra plus loin. Tous ces phénomènes sont expliqués par le principe d'Archimède, qui s'énonce ainsi :

Tout corps plongé dans un liquide perd de son poids, le poids du volume du liquide qu'il déplace.

1. *Corps fondrier.* — Le corps allant au fond déplace un volume de liquide égal à son propre volume ; donc le calcul de la diminution de poids se fait immédiatement. Par exemple, un morceau de fer de 1 décimètre cube pèse dans l'air 7 kilogr. 780 ; plongé dans l'eau à 4° centigr., il déplace un décimètre cube d'eau pesant 1 kilogr.

Donc son poids apparent sera :

$$7 \text{ kilogr. } 780 - 1 \text{ kilogr. } = 6 \text{ kilogr. } 780.$$

2. *Corps flottant.* — Soit un corps d'un volume égal à 1 décimètre cube ; il ne pèse que 600 grammes. Si on le plongeait complètement dans l'eau, il déplacerait 1 kilogr. d'eau, son poids apparent serait négatif ; c'est donc qu'il a une tendance à remonter à la surface.

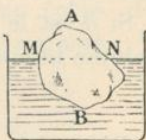


Fig. 35.

Physique et chimie. — GILLE.

En effet, si on le laisse libre de flotter à la surface, il en émergera une partie MAN, telle que la partie du corps comprise sous le plan de la surface, c'est-à-dire MBN, représente un volume d'eau pesant le poids du corps, soit 600 grammes.

§ II. — POUSSEE. CENTRE DE POUSSEE. ÉQUILIBRE D'UN CORPS FLOTTANT.

L'effet du liquide déplacé par le corps est une force verticale ascendante, puisqu'elle diminue le poids.

Cette force (fig. 36) est appliquée en C, centre du volume MBN compris sous le plan de la surface libre du liquide. C'est le centre de poussée.

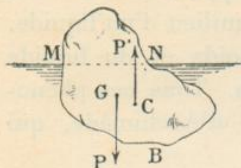


Fig. 36.

Le corps dont une partie plonge dans un liquide est donc soumis à deux forces parallèles, son poids P appliqué au centre de gravité G et la

poussée P' appliquée au centre de poussée. Pour que le corps soit en équilibre, il faut que les deux forces soient égales et situées sur la même droite (cf. Mécanique).

Il faut donc que $P = P'$ et que la ligne GC soit verticale.

En résumé, un corps flotte en équilibre à la surface d'un liquide, quand le centre de poussée est sur la verticale du centre de gravité et quand le poids du liquide déplacé est égal au poids du corps. L'étude de la stabilité de l'équilibre des corps flottants fait l'objet de la Théorie du Navire.

Si d est le poids de l'unité de volume du liquide, V le volume immergé du solide :

$$P' = Vd. \text{ Donc : } P = Vd.$$

Exemple. — Un bâtiment pèse 3.000 t. (Déplacement total). Quel est le volume immergé de la carène ? L'eau de mer pèse 1 kg. 026 le décimètre cube. Donc la partie immer-

gée représente un volume de $\frac{3.000}{1,026} = 2.925$ mètres cubes.

Dans l'eau douce, d'autre part, le poids du mètre cube est à peu près 1 tonne ; il s'ensuit que le volume immergé sera 3.000 mètres cubes ; en passant de l'eau de mer dans l'eau douce le bâtiment subira un enfoncement de 75 mètres cubes, soit $\frac{75}{3.000} = \frac{1}{40}$ du volume en eau douce.

§ III. — DENSITÉS.

La densité d'un corps de masse M et de volume v est le quotient de la masse par le volume $d = \frac{M}{v}$; il ne faut pas confondre la densité avec le poids spécifique qui est le rapport du *poids* au volume : $\frac{P}{v}$. Par suite, le poids spécifique dépend de l'accélération de la pesanteur et varie avec la latitude ; au contraire, la masse étant une constante caractéristique du corps, la densité ne varie pas.

Elle varie cependant avec les conditions extérieures ; on verra dans l'étude des phénomènes calorifiques que le volume des corps change avec la température ; le dénominateur de la fraction $\frac{M}{v}$ variant, la densité varie.

On peut donner une autre définition de la densité ; on sait que l'unité de poids pratique, le kilogramme, représente le poids d'un décimètre cube d'eau à 4° centigrades. Si donc je compare le poids Mg d'un corps de volume v à celui d'un égal volume d'eau, j'ai le rapport :

$$\frac{Mg}{\text{poids du vol. } v \text{ d'eau à } 4^{\circ}} = \frac{Mg}{vmg} ;$$

m , masse de l'unité de volume d'eau, est, par définition, l'unité de masse, donc ce rapport devient $\frac{M}{v} = d$.

Le nombre qui exprime la densité est donc égal au rapport du poids du solide au poids d'un égal volume d'eau distillée à 4°.

On peut encore dire, ce qui n'est que la première définition mise sous une autre forme : *la densité d'un corps est la masse de l'unité de volume.*

§ IV. — MESURE DE LA DENSITÉ DES CORPS SOLIDES.

Elle se fait en général en comparant le poids du solide au poids du volume égal d'eau ; mais en raison de la difficulté d'obtenir exactement la température de 4°, on opère plus souvent avec de l'eau à 0° ; cela nécessite une correction qui est faite ensuite.

1. *Procédé de la balance hydrostatique.* — C'est une application immédiate du principe d'Archimède. Le corps

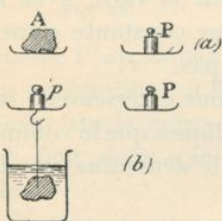


Fig. 37.

solide est d'abord placé dans le plateau d'une balance (fig. 37 a) et pesé ; soit P le poids trouvé. Ensuite, le corps est suspendu au-dessous du plateau de la balance et plongé dans un vase rempli d'eau ; il y a, comme l'indique le principe d'Archimède, une diminution de poids égale au poids du volume d'eau déplacé. On doit ajouter

un poids p pour rétablir l'équilibre : p est le poids de ce volume d'eau.

D'après ce qu'on a dit au § III, si l'eau est à 4°, la densité est donnée immédiatement par le rapport $d = \frac{P}{p}$.

2. *Procédé du flacon.* — Le corps est pesé et trouvé de poids égal à P ; ensuite, il est placé dans un flacon comme l'indique la figure 38 ; ce flacon a été préalablement rempli d'eau jusqu'à un niveau A ; quand on introduit le corps et

qu'on rebouche le flacon, il en sort une certaine quantité d'eau que l'on peut évaluer en faisant la différence des poids : 1° du corps + le flacon plein ; 2° du flacon contenant le corps ; cette différence donne le poids d'eau expulsée. Si p est ce poids et si l'eau est à 4°, on a : $d = \frac{P}{p}$.



Fig. 38.

3. *Procédé de l'aréomètre.* — L'aréomètre de Nicholson n'est qu'une application du procédé de la balance, mais celle-ci a la forme particulière d'un flotteur.

L'appareil se compose d'un flotteur F portant un plateau à sa partie haute et un autre suspendu à sa partie inférieure. Le corps à peser est mis sur le plateau dont on complète la charge avec des poids, de façon à amener un certain point A de la tige à affleurer l'eau (fig. 39 *a*) ; on peut ensuite enlever le corps et le remplacer par des poids marqués, jusqu'à obtenir le même point d'affleurement. Toutes les conditions étant les mêmes, c'est que le poids ajouté représente le poids du corps.

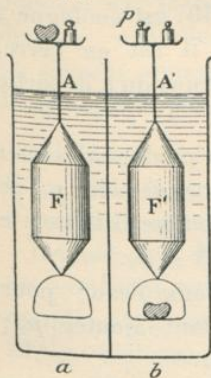


Fig. 39.

Ensuite, on met le corps dans le plateau inférieur et, pour réaliser les conditions figurées en (*a*), il faut encore ajouter un poids p qui indique la diminution de poids due à l'immersion du corps.

Si l'eau est à 4° comme précédemment, on obtient la densité par le quotient $d = \frac{P}{p}$.

§ V. — MESURE DE LA DENSITÉ DES LIQUIDES.

On peut employer trois méthodes en tous points semblables aux trois méthodes exposées précédemment.

1. — On suspend sous une balance une masse quelconque, une sphère de verre, par exemple ; on cherche la poussée qu'elle subit dans le liquide dont on veut obtenir la densité. Soit P : c'est le poids du volume du liquide déplacé. Puis on cherche la poussée due à de l'eau pure ; soit p :

c'est le poids du même volume d'eau : $d = \frac{P}{p}$.

2. — On remplit un flacon du liquide étudié, puis d'eau pure ; on note les poids obtenus ; ces poids, par différence avec celui du flacon vide, donnent les poids des mêmes volumes d'eau et de liquide.

3. — L'aréomètre de Fahrenheit (fig. 40) est analogue à l'aréomètre de Nicholson, mais il est en verre, lesté et ne porte pas de plateau suspendu à la partie basse.

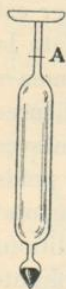


Fig. 40.

On le pèse d'abord ; soit A son poids ; on le met dans le liquide étudié et on le charge de poids p_1 , de façon à le faire affleurer en A . Comme il flotte, le poids du liquide déplacé est $P = A + p_1$.

On fait la même opération dans l'eau ; pour l'amener à affleurer en A , il faut ajouter p_2 ; $A + p_2$ est le poids d'eau déplacée.

Donc : $d = \frac{A + p_1}{A + p_2}$, puisque les deux volumes déplacés sont les mêmes.

4. *Aréomètre à volume variable.* — Les aréomètres précédemment décrits, celui de Nicholson et celui de Fahrenheit, plongent toujours jusqu'au même point ; on opère avec eux sur un volume constant. On emploie souvent des aréomètres dits à volume variable qui, par simple lecture du point où ils affleurent, donnent la densité du liquide étudié. Ils n'exigent donc qu'une lecture et plus du tout l'emploi de poids marqués.

a) *Aréomètre de Baumé*. — Il se compose d'un réservoir lesté A surmonté d'une tige cylindrique que l'on divisera ; suivant la densité du liquide, l'appareil enfoncera plus ou moins.

Pour le graduer, Baumé marquait 0 dans l'eau pure et 15 dans un liquide contenant 15 parties de sel marin et 85 d'eau : la division est prolongée au delà.

Pour les liquides plus légers que l'eau, il existe une autre graduation, mais beaucoup moins employée.

On voit immédiatement que ces appareils ne donnent pas la densité par lecture de leur graduation, mais des indications conventionnelles ; ils servent cependant fréquemment, surtout dans le commerce, pour fixer les densités de certains produits.

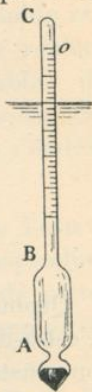


Fig. 41.

b) *Alcoomètre centésimal*. — Gay-Lussac a gradué cet appareil de façon à donner la proportion exacte d'alcool et d'eau dans un mélange.

On met dans différents vases gradués 1/10, 2/10, 3/10... de leur contenance d'alcool absolu et on achève de les remplir avec de l'eau. On a ainsi des mélanges à 10 %, 20 %... d'alcool. On plonge l'aréomètre dans l'eau pure et on marque 0. Dans l'alcool absolu on marque 100 ; dans les divers mélanges, on marque 10, 20, etc. Les intervalles 0-10, 0-20 etc. ne sont pas égaux, mais ils diffèrent assez peu ; on les divise, chacun en 10 parties égales. Par simple lecture de l'appareil, on connaît donc la teneur en alcool d'un mélange où on l'a mis à flotter.

L'appareil a été construit à 15° centig. ; il n'est plus juste à d'autres températures ; mais il existe, en général, avec chaque appareil, une table donnant la correction à faire suivant la température.

Il faut donc, après une lecture, examiner le thermomètre et faire la correction d'après la Table précitée.

CHAPITRE III

Capillarité.

§ I. — FAITS GÉNÉRAUX.

Quand on plonge dans l'eau un tube de verre capillaire, c'est-à-dire un tube dont l'ouverture intérieure est très fine, on constate que le niveau intérieur AB est plus élevé que le niveau extérieur CD du liquide; cette élévation est d'autant plus grande que le canal est plus étroit. Tous les

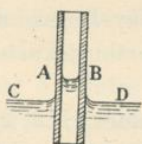


Fig. 42.



Fig. 43.

liquides qui *mouillent* le verre, alcool, huile, etc., produisent le même résultat : une élévation du niveau dans les tubes étroits (fig. 42).

Si, au contraire, l'expérience porte sur un liquide ne mouillant pas le verre, du mercure par exemple, le résultat est inverse (fig. 43) : il y a dépression du niveau dans le tube capillaire.

Il y a en même temps un changement dans la forme de la surface ; elle est concave quand elle est surélevée (fig. 42) et convexe quand elle est déprimée (fig. 43).

Tous ces phénomènes semblent contredire les lois déjà exposées de l'Hydrostatique ; ils proviennent de forces dues à l'attraction moléculaire.

§ II. — ATTRACTION MOLÉCULAIRE.

1. — Une gouttelette de mercure posée sur une table se rassemble en une petite sphère et on peut la faire rouler sans qu'elle s'aplatisse d'une manière appréciable ; il semble que les molécules du mercure soient attirées les unes contre les autres, et empêchent le mercure de s'étaler librement.

2. — Trempons une baguette de verre dans de l'eau ; quand on la ressortira, il restera une gouttelette suspendue à son extrémité ; c'est donc que les molécules de cette goutte d'eau restent attirées par la baguette avec une force qui équilibre leur poids et les empêche de tomber.

Une molécule liquide subit donc une attraction de la part des molécules liquides et solides voisines, comme l'observation des phénomènes précédents vient de nous le montrer. Le rayon d'action de la force exercée par une molécule sur les voisines est extrêmement faible.

§ III. — PHÉNOMÈNES DUS AU CONTACT DES SOLIDES ET DES LIQUIDES.

1. *Lois de l'ascension des liquides dans les tubes capillaires.* — Pour un même liquide, à une même température, les hauteurs moyennes soulevées sont en raison inverse des diamètres des tubes. Cette hauteur est indépendante de la forme du tube capillaire dans les régions où ne se tient pas le ménisque ; elle varie avec la nature des liquides et la température ; les hauteurs soulevées diminuent quand la température s'élève, et finissent par s'annuler.

Par exemple, plongeons dans un même liquide des tubes de formes diverses (fig. 44), mais ayant même diamètre dans la partie où se tient le ménisque. Les hau-

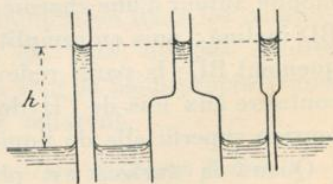


Fig. 44.

teurs d'ascension sont les mêmes dans les tubes, et pourtant les poids soulevés sont différents.

Avec des liquides différents, on a des hauteurs h différentes ; les expériences de Gay-Lussac sur un tube de 1^{mm} 295 de diamètre ont permis de relever des valeurs de h égales à :

9^{mm} 182 pour l'alcool à 0,819 de densité,

9^{mm} 997 pour l'alcool à 0,941,

9^{mm} 952 pour l'essence de térébenthine.

2. *Ascension entre deux lames parallèles.* — Les lois sont les mêmes, sauf que la hauteur est moitié de celle qui se produit dans un tube de diamètre égal à la distance des lames. Autrement dit, la hauteur d'ascension du même liquide, à la même température, est la même entre deux lames parallèles à la distance d et dans un tube de section circulaire dont le rayon est d .

3. *Tension superficielle.* — Il semble que la surface du liquide soit constituée par une pellicule mince qui exerce des tractions dans toutes les directions.

Une expérience de Dupré met ce fait en évidence : un

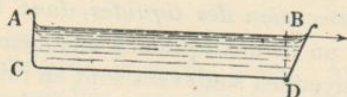


Fig. 45.

vase rectangulaire plat ABCD a une paroi verticale BD mobile autour d'une charnière horizontale D. On maintient BD incliné ; puis on remplit le vase d'eau et on lâche brusquement BD ; la paroi redevient verticale. Ce phénomène contraire aux lois de l'Hydrostatique est dû à une sorte de tension superficielle du liquide.

Quand la surface est plane, il n'existe qu'une force horizontale ; mais, si la surface est courbe, il existe une force verticale qui s'ajoute ou se retranche à la pression

hydrostatique, suivant que la surface est convexe ou concave. C'est cette force qui produit l'ascension ou la dépression dans les tubes capillaires. Elle varie suivant la courbure des ménisques.

4. *Liquides qui ne mouillent pas les solides.* — Les lois relatives à ce cas sont identiquement les mêmes que dans le cas de liquides qui mouillent les solides, mais, au lieu d'ascension, on observe des dépressions.

§ IV. — APPLICATIONS.

1. *Colonne liquide emportée par un tube ouvert.* — Soit un tube capillaire, dans lequel l'ascension du liquide est h ; il se forme un ménisque concave; ce ménisque produit (§ III-3) une force verticale N qui équilibre le poids de la colonne h ; si nous enlevons le tube, il reste du liquide à l'intérieur; et à sa partie inférieure, si on a pris la précaution de tailler le bout du tube en biseau, il se produit un ménisque de même forme, mais convexe, qui donne donc une seconde force N ; les forces verticales sont alors égales à $2N$, donc elles peuvent soulever une hauteur $2h$. La quantité enlevée du liquide est de longueur $2h$, double de la hauteur d'ascension dans le tube.

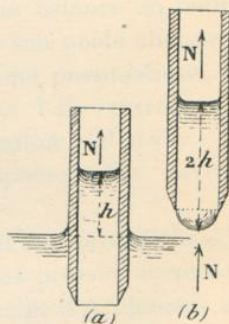


Fig. 46.

Ce phénomène reçoit une application dans les compte-gouttes; on a démontré (Loi de Tate) que les gouttes données par un compte-gouttes sont de poids proportionnel aux diamètres des tubes qui les délivrent.

2. *Exceptions aux lois de l'équilibre des corps flottants.* — Une aiguille d'acier légèrement graissée, placée sur de l'eau, reste à la surface, bien que son poids soit supérieur

à son déplacement ; c'est qu'elle forme à la surface de l'eau un ménisque concave donnant lieu à une force N , verticale, ascendante, qui équilibre le poids (fig. 47).



Fig. 47.

C'est ainsi que l'on voit également des insectes marcher sur l'eau sans enfoncer ; leurs pattes sécrètent des substances huileuses produisant au contact de l'eau des phénomènes capillaires ; des forces telles que N se produisent, équilibrent leur poids et leur permettent de marcher sur la surface.

LIVRE III AÉROSTATIQUE

CHAPITRE I

Pesanteur des gaz. Pression atmosphérique.

§ I. — TOUS LES GAZ SONT PESANTS. PRINCIPE D'ARCHIMÈDE APPLIQUÉ AUX GAZ.

Si nous suspendons au plateau d'une balance un ballon de verre, nous pouvons constater que son poids change et diminue quand, au moyen d'une machine pneumatique, on y fait le vide ; inversement, si on laisse l'air rentrer, nous verrons le plateau qui supporte le ballon s'alourdir. On constate que l'air pris dans l'atmosphère pèse environ 1 gr. 293 par litre.

L'air pesant qui nous entoure jouit des propriétés déjà énoncées pour les liquides, au sujet des pressions exercées sur les corps. En particulier, le principe d'Archimède est applicable aux corps placés dans l'atmosphère : ils perdent de leur poids, un poids égal au poids du volume d'air déplacé.

C'est ce principe qui est appliqué dans les aérostats : si d' est la densité, par rapport à l'eau, d'un corps de volume v , son poids est vd' ; d étant la densité de l'air, vd est la poussée qu'il subit de la part de l'air. Le poids résultant est donc :

$$vd' - vd = v(d' - d).$$

Si d' est plus grand que d , le corps tombera ; si d' est plus petit que d , il montera ; en remplissant donc un ballon

d'un gaz plus léger que l'air (gaz d'éclairage, hydrogène), on donne à l'ensemble une force ascensionnelle ; c'est le cas des ballons.

Une autre conséquence est que les corps pesés dans l'atmosphère n'accusent pas dans la balance leur poids exact, mais leur poids diminué de la poussée de l'air ; dans les mesures de Physique très précises, on est obligé d'en tenir compte et de n'opérer que sur les poids absolus, c'est-à-dire tels qu'on les aurait dans un espace vide d'air.

§ II. — PRESSION ATMOSPHÉRIQUE. BAROMÈTRE.

L'air qui entoure le globe, étant pesant, exerce sur toute la surface terrestre une certaine pression ; c'est la pression atmosphérique. Ce phénomène ne fut découvert qu'au ^{xvii}^e siècle, à la suite des théories de Galilée, des expériences de Torricelli en Italie, des vérifications de Pascal en France.

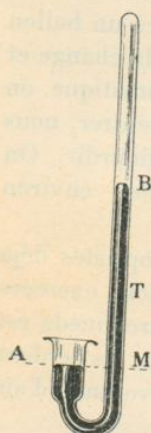


Fig. 48.

On peut mesurer la valeur de cette pression au moyen du baromètre ; un tube T, recourbé à sa partie inférieure, présente une branche B fermée à sa partie supérieure et l'autre A ouverte à l'air libre. Si on a pris les précautions suffisantes pour qu'il n'y ait pas d'air dans la branche B, le poids de la colonne de mercure de la branche B fait équilibre à la pression atmosphérique qui s'exerce sur la surface libre A.

Considérons un plan horizontal passant par la surface libre, soit A M ; à ce plan situé dans le mercure nous pouvons faire application des principes établis en Hydrostatique : la pression est la même en tous ses points, puisqu'il est situé dans le même liquide, qui est ici le mercure.

On constate que la hauteur de la surface libre dans la branche vide d'air B, au-dessus de AM, est d'environ 0^m76 ;

la pression est en M, la densité du mercure étant 13,59 :

$$76^{\text{cm}} \times 13,59 = 1033 \text{ grammes.}$$

Donc la pression en A, qui est équivalente à celle en M, est 1.033 grammes ou 1 kilog. 033 par centimètre carré.

§ III. — BAROMÈTRES. CONSTRUCTION.

On nomme « Baromètres » des appareils destinés à mesurer la pression atmosphérique ; on distingue deux classes principales de baromètres : les baromètres à mercure, qui ne sont que des perfectionnements du premier appareil de ce genre, celui de Torricelli ; les baromètres anéroïdes ou métalliques, qui ne comportent pas de mercure.

1. *Baromètre à cuvette.* — Il se compose d'un simple tube A renversé sur une cuvette C. La différence des niveaux h donne la valeur de la pression atmosphérique.

C'est l'appareil même de Torricelli ; seulement on prend plus de précautions dans sa construction : Torricelli remplissait simplement le tube de mercure, puis, le fermant avec le doigt, le renversait dans la cuvette contenant déjà du mercure.

Pour construire un baromètre, on commence par se procurer du mercure bien pur ; on le lave à l'acide azotique pour le débarrasser de tous les métaux étrangers ; puis, le tube étant disposé suivant l'inclinaison indiquée (fig. 50) et muni d'une boule de verre a , on fait bouillir le mercure 4 ou 5 minutes. On chasse ainsi l'air et l'humidité du tube. Ensuite on détache la boule a et on renverse le tube dans sa cuvette en maintenant le mercure avec le doigt pour l'empêcher de tomber.

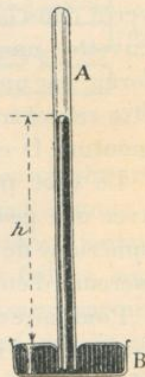


Fig. 49.

Cet appareil a le défaut d'être peu transportable ; un appareil à mercure transportable a été imaginé par le constructeur Fortin.

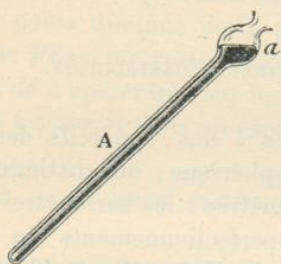


Fig. 50.

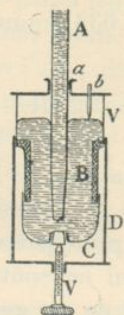


Fig. 51.

2. *Baromètre de Fortin.* — Le principe du baromètre est toujours le même, mais la cuvette est très particulière ; elle se compose de trois parties (fig. 51) : une partie V en verre dans laquelle se trouve le niveau du mercure dans la cuvette ; une partie B en bois, sur laquelle se fixe le fond C formé par une peau de chamois ; ce fond est mobile et peut être relevé au moyen d'une vis *v* qui prend appui sur une monture D en cuivre.

Le tube pénètre en *a* dans la cuvette par un joint fait avec une peau de chamois qui permet à la pression atmosphérique de s'établir dans la cuvette, tout en empêchant le mercure d'en sortir.

Pour faire une lecture, on amène le mercure dans la cuvette à un niveau bien déterminé, au moyen d'un repère *b* constitué par une pointe d'ivoire. Ainsi, au lieu de mesurer chaque fois la distance des niveaux de la cuvette et du tube, il suffit de lire la hauteur du niveau dans le tube au moyen d'une graduation portée par une enveloppe en laiton qui entoure le tube de verre.

Pour transporter l'appareil, on remonte le fond C de la cuvette, de façon que le mercure remplisse complètement la

cuvette et le tube : il forme alors un bloc qui, ne pouvant se déplacer, ne peut briser l'appareil par ses chocs ; en même temps, l'air ne peut rentrer.

Ces appareils sont souvent suspendus sur un support par un système à la Cardan, ce qui permet d'en faire des baromètres de voyage ou de bord.

3. *Baromètre à siphon*. — C'est le genre d'appareils qui a été décrit au § II. Tous ne sont pas transportables ; ils sont généralement adoptés comme baromètres d'appartement.

4. *Baromètres anéroïdes*. — Ces baromètres sont constitués par des boîtes métalliques à parois élastiques, vides d'air et soigneusement fermées. Sous l'action des variations de la pression atmosphérique, ces boîtes sont plus ou moins aplaties, et leurs déformations indiquent les variations de pression.

Les formes fréquemment employées sont indiquées sur la figure 52. En (a) on voit une boîte unique de forme cylindrique, mais ses parois A et B, au lieu d'être planes, sont munies de rainures circulaires de façon à être plus élastiques.

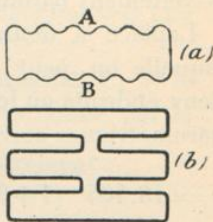


Fig. 52.

La forme (b), employée dans les appareils enregistreurs, consiste en un empilage de boîtes cylindriques réunies à leur centre par des bouts de tubes ; ces boîtes ajoutent leurs déformations. Celles-ci, en général, très faibles, sont amplifiées par des systèmes de leviers qui agissent sur une aiguille ; les déplacements de l'aiguille se font devant un cadran qui doit être gradué par comparaison avec un baromètre à mercure.

§ IV. — INDICATIONS DU BAROMÈTRE.

En un même point, l'observation du baromètre montre que la hauteur du mercure varie ; l'étude de ces variations,

Physique et chimie. — GILLE.

en intensité et en rapidité, peut fournir des prévisions du temps (cf. Météorologie). La hauteur moyenne dans nos climats est 758^{mm}.

Si on change de poste d'observation, les variations dues à l'état de l'atmosphère étant supposées défalquées de nos observations, on remarque que la hauteur barométrique varie avec la latitude et avec l'altitude à laquelle on se place.

La pression atmosphérique diminue quand on s'élève dans l'atmosphère; c'était à prévoir, en effet, puisque la couche d'air qui donne la pression diminue au fur et à mesure qu'on s'élève. Cette propriété peut servir à mesurer la distance qui sépare verticalement un lieu, de la surface de la mer; cette opération géodésique est parfois appelée Nivellement barométrique.

Laplace a donné la formule suivante, au moyen de laquelle on peut calculer la différence d'altitude r entre deux endroits où les températures sont t et t' , les hauteurs barométriques corrigées H et H' , la latitude λ :

$$r = 18.405^m (1 + 0,002552 \cos 2\lambda) \left[1 + 2 \frac{t + t'}{1.000} \right] \log \frac{H}{H'};$$

cette formule ne donne d'ailleurs que des résultats approchés. Pour des hauteurs inférieures à 1.000 mètres, Babinet donne la formule:

$$r = 16.000^m \left(\frac{H' - H}{H' + H} \right) \left[1 + 2 \frac{t + t'}{1000} \right],$$

qui ne contient pas de logarithme.

Nous avons dit que les hauteurs portées dans ces formules doivent être les hauteurs corrigées; en effet, suivant la température, la densité du mercure varie; suivant la latitude, son poids varie; enfin, suivant les diamètres des tubes employés, les dépressions capillaires ont des valeurs diverses. Les mesures barométriques précises exigent les corrections des erreurs dues à ces divers phénomènes.

CHAPITRE II

Compressibilité des gaz.

§ I. — LOI DE MARIOTTE.

On sait que les gaz soumis à une compression subissent une diminution de volume ; la loi de Mariotte relie la pression supportée par un gaz à son volume :

Les volumes occupés par une masse donnée de gaz, à température constante, sont inversement proportionnels aux pressions qu'elle supporte.

Si V est le volume correspondant à la pression P , V' le volume correspondant à la pression P' sera donné par la relation : $\frac{V}{V'} = \frac{P'}{P}$, ce qu'on peut écrire autrement :

$$P V = P' V'.$$

Si donc nous avons une masse de gaz déterminée, à température constante, que l'on soumet à des pressions différentes, le produit PV du volume occupé par le gaz et de la pression sera constant.

§ II. — VÉRIFICATIONS DE LA LOI DE MARIOTTE.

1. *Vérifications avec les tubes de Mariotte et de Torricelli.* — Le tube de Mariotte permet la vérification pour les pressions supérieures à une atmosphère ; c'est un tube recourbé à deux branches verticales A , B (fig. 53) ; l'une, A , est courte et fermée, l'autre, B , est longue et ouverte.

On introduit du mercure qui isole dans la branche A un certain volume de gaz ; le niveau étant le même dans les

deux branches (fig. 53 a), on constate que le gaz, qui peut être de l'air ou tout autre gaz, occupe un volume V . Le niveau étant le même des deux côtés, c'est que le gaz étudié est à la pression atmosphérique extérieure.

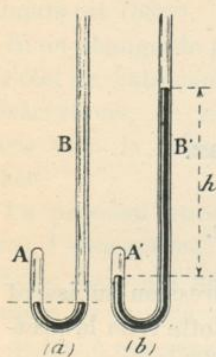


Fig. 53.

Si, maintenant, nous introduisons dans la branche ouverte du mercure de façon que la différence entre les niveaux des deux chambres soit h correspondant à la hauteur barométrique, on fait supporter au gaz en A' une pression égale à la pression atmosphérique plus une autre fois la pression atmosphérique.

On constate que le volume de gaz en A' est devenu $\frac{V}{2}$.

On a donc pour la pression A le volume V .

$$\frac{V}{2A} = \frac{V}{2A}$$

En opérant sur les pressions croissantes $3A$, $4A$, etc. on obtient les volumes $\frac{V}{3}$, $\frac{V}{4}$ etc., comme le prévoyait la loi de Mariotte.

Le tube de Torricelli permet la vérification dans le cas de pressions inférieures à la pression atmosphérique. Un tube A (fig. 54) plonge dans une cuve profonde C; on fait plonger le tube de façon à isoler une certaine masse de gaz au fond du tube: quand le niveau est le même dans la cuve et dans le tube (fig. 54 a), le gaz contenu dans le tube est à la pression extérieure, donc à la pression atmosphérique. On constate qu'il occupe un certain volume V .

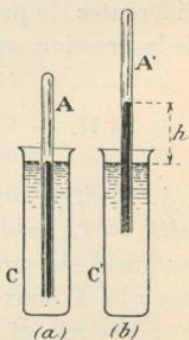


Fig. 54.

Si on soulève le tube, le mercure monte dans le tube; si on a soulevé de façon à obtenir une différence de niveau h (fig. 54 b) correspondant

à la moitié de la hauteur barométrique, la pression en A' sera : 1 atmosphère — $1/2$ atmosphère = $1/2$ de la pression atmosphérique.

On constate alors que le volume est devenu $2V$; de même, sous des pressions plus faibles, on obtient des volumes croissants. Le gaz, soumis aux pressions $A, \frac{A}{2}, \frac{A}{3}$, etc., prend les volumes $V, 2V, 3V$, etc.

La loi de Mariotte se trouve donc vérifiée pour les pressions supérieures et inférieures à la pression atmosphérique.

2. *Vérifications plus précises de la loi de Mariotte.* — Un grand nombre d'expériences furent faites au XIX^e siècle, qui montrèrent que la loi de Mariotte n'était qu'approchée. Regnault publia, en 1847, les résultats d'expériences montrant qu'aucun gaz ne suivait exactement la loi de Mariotte.

Des expériences subséquentes (Natterer, MM. Cailletet et Amagat) montrèrent les variations du produit AV ¹; ces essais portaient sur des pressions allant jusqu'à 3.000 atmosphères, accusant alors des divergences très considérables avec la loi de Mariotte.

Mais on peut admettre qu'en pratique la loi de Mariotte permet, pour les gaz éloignés de leur point de liquéfaction à la température ordinaire (air, oxygène, azote, hydrogène), de résoudre avec une approximation suffisante tous les problèmes jusqu'à 150 atmosphères.

§ III. — MESURE DES PRESSIONS. MANOMÈTRES.

Les Manomètres, qui sont les appareils servant à mesurer les pressions, peuvent se classer en trois groupes :

1. Ce produit est plus souvent désigné sous la forme PV ; V étant le volume occupé par une certaine masse de gaz sous la pression P .

Manomètres à air libre ; Manomètres à air comprimé ; Manomètres métalliques.

L'unité de mesure ordinairement employée pour les mesures de pression est l'*atmosphère*, c'est-à-dire la pression donnée par l'air à la surface du sol ; soit 1 kg. 033 par centimètre carré. Dans les applications diverses aux machines on emploie plus fréquemment le kilogramme par centimètre carré. On voit immédiatement que si P est la pression en kilogrammes, p celle en atmosphères :

$$P = 1,033 p.$$

1. *Manomètre à air libre.* — Ce manomètre comporte une branche verticale ouverte à la partie supérieure A (fig. 55). Le gaz dont on veut mesurer la pression est mis en communication avec l'autre branche par le tuyau B. La différence des niveaux h indique la pression supportée par le gaz en B, en outre de la pression atmosphérique.

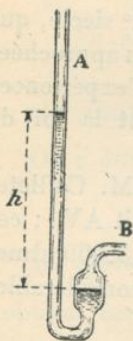


Fig. 55.

On voit immédiatement que pour mesurer les pressions de 10 atmosphères, par exemple, il faut un tube de $10 \times 76 \text{ cm.} = 7^m 60$ de longueur.

Aussi cet appareil très précis n'est-il guère commode ; M. Amagat, pour obtenir une pression de 430 atmosphères, dut donner à la colonne une hauteur verticale de 327 mètres (les expériences étaient faites dans un puits de mine).

Un artifice imaginé par Desgoffe permet de réduire la hauteur de la colonne libre ; c'est en quelque sorte une presse hydraulique renversée.

La pression à mesurer est établie en B sur un petit piston p (fig. 56) de section s ; ce piston fait corps avec un grand piston qui appuie sur le mercure communiquant avec le tube vertical ouvert A.

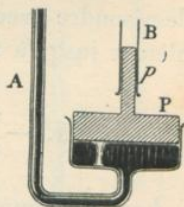


Fig. 56.

Si P est la pression en B, l'effort produit sur le piston p est : Ps . Cet effort est réparti sur la surface S du piston P , donc la pression sous P est $\frac{Ps}{S}$; au lieu de mesurer la pression P on mesure la pression réduite dans le rapport $\frac{s}{S}$. Si $\frac{s}{S} = \frac{1}{100}$, on mesurera le centième seulement de P .

Cet appareil, perfectionné par M. Amagat, lui a servi dans ses expériences et permis de mesurer les pressions jusqu'à 3.000 atmosphères.

2. *Manomètres à air comprimé.* — La branche verticale A, au lieu d'être ouverte à l'air libre, est fermée à sa partie supérieure, et contient de l'air ; la pression établie en B est contrebalancée par la différence des niveaux du mercure, mais surtout par la pression de l'air comprimé en A.

Cet appareil est gradué par comparaison avec un manomètre à air libre ; il offre l'inconvénient d'être peu précis pour les fortes pressions, car les variations de compression sont alors peu considérables ; en outre le verre supporte difficilement les fortes pressions.



Fig. 57.

3. *Manomètres métalliques.* — Tous les appareils précédemment décrits sont très fragiles ; il ne faut pas songer à les employer sur les machines à vapeur, surtout les machines mobiles, locomotives, locomobiles, vaisseaux, etc. On emploie alors des appareils construits entièrement en métal, par suite moins chers et peu fragiles.

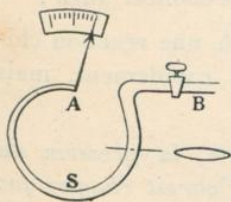


Fig. 58.

Ces appareils se composent d'une spire S en métal, fermée à l'extrémité A et recevant le gaz ou la vapeur sous pression par B . Ce tube peut être enroulé suivant une spire incomplète comme sur la figure 58, ou une spire complète et même plus.

La section du tube est aplatie et forme une ellipse dont le grand axe serait perpendiculaire au plan de la figure 58. Ce tube ainsi rendu flexible offre la propriété que sous l'action d'une pression intérieure, il tend à se dérouler; son extrémité A subit un déplacement que l'on peut noter sur un cadran au moyen d'une aiguille.

Souvent ces déplacements sont amplifiés par un système de leviers.

L'appareil est gradué par comparaison et contenu à l'intérieur d'une boîte en métal.

On voit donc que, par suite de sa construction, l'appareil est peu fragile et peut être placé dans toutes les positions; aussi est-il universellement employé sur toutes les machines; il faut cependant le vérifier de temps à autre à cause des variations de l'élasticité du métal.

§ IV. — MÉLANGE DES GAZ. LOI DE DALTON.

Quand, dans un même récipient, on introduit des gaz différents, il se produit un mélange et il s'établit une pression uniforme. Berthollet étudia les lois qui régissent ce phénomène en mettant en communication des ballons contenant des gaz différents à des pressions différentes.

Il constata que le mélange se faisait (en supposant des gaz qui ne donnent pas lieu à une réaction chimique) intimement au bout d'un certain temps. En mesurant la pression, il put établir une autre loi relative à la pression.

Les lois du mélange des gaz peuvent s'énoncer ainsi :

1. — Les gaz, ne donnant pas lieu à une réaction chimique, se mélangent plus ou moins rapidement, mais d'une manière intime et permanente.

2. — *La température étant constante, la pression du mélange est la somme des pressions qu'aurait chaque gaz s'il occupait seul le volume total.*

On peut donner une expression analytique de cette seconde loi :

Soient des gaz occupant les volumes v , v' , v'' sous les pressions p , p' , p'' .

Soit V le volume du récipient où l'on fait le mélange.

Les gaz occupant seuls ce volume prendraient, suivant la loi de Mariotte, respectivement les pressions :

$$p_1 = \frac{pv}{V}$$

$$p_2 = \frac{p'v'}{V}$$

$$p_3 = \frac{p''v''}{V}$$

La pression totale P cherchée est donc, suivant la 2^e loi de Berthollet :

$$P = p_1 + p_2 + p_3 = \frac{pv}{V} + \frac{p'v'}{V} + \frac{p''v''}{V} = \frac{pv + p'v' + p''v''}{V}$$

ou encore :

$$PV = pv + p'v' + p''v''.$$

On obtient une expression analytique rappelant la loi de Mariotte.

Remarque. — La loi de Berthollet n'est exacte que dans les mêmes conditions que celle de Mariotte; elle n'est applicable que dans les limites et avec la précision que l'on a signalées.

CHAPITRE III

Appareils à faire le vide. — Pompes.

Un certain nombre d'appareils fonctionnent d'après des principes découlant de la loi de Mariotte ; les uns servent à faire le vide dans un récipient, d'autres au contraire à comprimer l'air ; enfin les pompes destinées soit à élever, soit à refouler l'eau peuvent être expliquées par des théories analogues. On décrira donc successivement le fonctionnement des machines à faire le vide ou machines pneumatiques, des machines à comprimer l'air, et des pompes hydrauliques.

§ I. — MACHINE PNEUMATIQUE.

1. *Fonctionnement.* — La machine se compose d'un ou deux corps de pompe tels que A (fig. 58) communiquant par un conduit B avec le récipient C où on veut faire le vide ; fréquemment dans les appareils de laboratoire et de démonstration ce récipient est constitué par une cloche posée sur un plateau ; ses bords sont bien rodés et graissés de façon qu'il ne puisse se faire aucune rentrée d'air entre eux et le plateau.

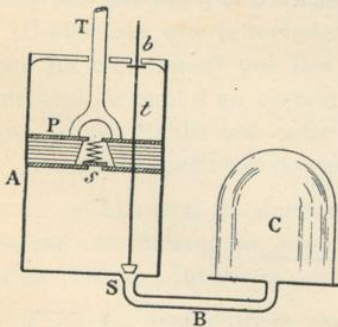


Fig. 59.

Dans le corps de pompe A se déplace un piston P constitué par des rondelles de cuir graissé serrées entre deux disques de métal ; de cette façon on a une étanchéité parfaite le long du cylindre.

Au centre, une soupape s sert à l'expulsion de l'air.

La soupape S est manœuvrée par une tige t passant à frottement dur dans le piston.

Étudions le fonctionnement de l'appareil ; supposons que le piston en bas de course monte ; il entraîne la tige t qui ouvre S et établit la communication avec C ; t est d'ailleurs arrêté par le butoir b qui limite sa levée. L'air contenu dans C et qui ne peut sortir puisque s est fermé, se répand dans un espace plus grand ; sa pression diminue ; quand P redescend, il ferme S et comprime l'air sous lui ; mais quand la pression devient supérieure à la pression atmosphérique, elle soulève s et l'air passe au-dessus de P : le piston redescend ainsi jusqu'au bas de course.

2. *Vide.* — On peut évaluer la diminution de pression en C au bout de n coups de piston ; soit V le volume de C et B jusqu'à la soupape S ; v le volume compris entre S et le piston en haut de course.

Au premier coup de pompe l'air compris au début dans le volume V à la pression P se répand dans le volume $V + v$; d'après la loi de Mariotte, il prend la pression :

$$P_1 = \frac{V}{V + v} P,$$

dans le récipient C et la conserve pendant la descente.

Au deuxième coup, il prendra la pression :

$$P_2 = \frac{V}{V + v} P_1,$$

$$\text{ou : } P_2 = \left(\frac{V}{V + v} \right)^2 P.$$

$$\text{Au } n^{\text{ème}} \text{ coup : } P_n = \left(\frac{V}{V + v} \right)^n P.$$

On voit que la pression ne sera jamais nulle ; il faudrait un nombre de coups de piston infini pour la réduire à zéro.

3. *Limite du vide.* — Il y a une autre cause qui empêche

d'atteindre le vide ; quand le piston est en bas de course, il existe un certain volume, appelé espace mort ¹, où l'air se comprime sous le piston.

Il arrive un moment où l'air est comprimé sous P jusqu'en bas de course sans arriver, avant la fin de la course, à soulever s : il n'y a donc plus expulsion d'air, par suite on ne diminue plus la pression.

Quelle est cette pression-limite ? Soit p la pression-limite cherchée, u le volume de l'espace mort, P la pression atmosphérique. Quand on arrive à la limite, l'air contenu dans le corps de pompe, soit le volume v à la pression p , une fois comprimé dans le volume u , a une pression égale ou inférieure à P :

Il faut donc pour être à la limite :

$$P \geq \frac{p v}{u}; \text{ la limite est } p = \frac{u P}{v};$$

plus u sera petit et v grand, plus on approchera du vide absolu. En fait, on ne peut, pour des causes diverses, rentrées d'air, etc., tomber au-dessous d'une pression de 2 ou 3 millimètres de mercure.

4. *Appareils industriels.* — Ils sont basés sur des principes analogues, mais munis de plusieurs cylindres. On peut signaler également les appareils à mercure basés sur le principe du baromètre : au-dessus de la colonne mercurielle il existe un vide presque absolu ; en remplissant de mercure un récipient et en le vidant alternativement, par ascension et descente du mercure, on en fait une pompe sans espaces morts. On arrive ainsi à obtenir un vide bien plus parfait qu'avec les appareils à piston.

Ces appareils à mercure sont plutôt des appareils de laboratoire ; dans la pratique industrielle, on cherche à produire, non pas un vide parfait, mais des diminutions de pression, faciles à obtenir avec des pompes.

1. On l'appelle aussi espace nuisible ; en machine à vapeur le nom d'espace mort est le plus communément employé.

§ II. — COMPRESSEURS D'AIR.

1. *Fonctionnement.* — Un corps de pompe A contient un piston P ; en levant le piston, il y a diminution de pression sous le piston et l'air extérieur, refoulant la soupape s_1 , pénètre en dessous. Quand le piston redescend, l'air se comprime ; s_1 se ferme, s_2 est ouvert par la pression et l'air contenu sous le piston est refoulé dans le récipient R.

On peut trouver, comme pour la machine pneumatique, la pression obtenue dans R après n coups de piston.

Soit P_0 la pression initiale dans R ; P la pression atmosphérique ; V le volume de R jusqu'à la soupape s_2 ; v le volume du corps de pompe compris sous le piston P et jusqu'aux soupapes, s_1, s_2 .

Si l'on suppose qu'il n'y a pas d'espace mort, tout l'air compris sous le piston sera refoulé dans R.

On a donc dans R un mélange de deux volumes : l'un déjà dans le récipient V à la pression P_0 , l'autre v à la pression P ; en appliquant la loi de Berthollet :

$$P_1 = P_0 + P \frac{v}{V} ;$$

car P_0 est la pression du 1^{er} volume occupant seul le volume v ; $P \frac{v}{V}$ est la pression du volume d'air envoyé par la pompe s'il était seul dans le volume V.

Au deuxième coup de piston :

$$P_2 = P_0 + P \frac{v}{V} + P \frac{v}{V} = P_0 + 2 P \frac{v}{V} .$$

Au $n^{\text{ème}}$

$$P_n = P_0 + n P \frac{v}{V} .$$

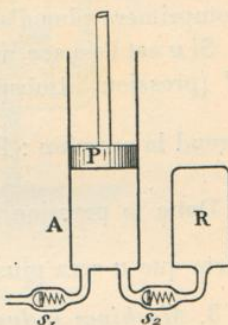


Fig. 60.

2. *Limite de la pression.* — Il ne semble pas qu'il y ait de limite à la pression qu'on peut établir dans R ; en donnant à n une valeur très grande, P_n sera très grand. Mais la machine cessera de fonctionner à une certaine valeur de P_n , à cause de l'espace mort. Quand l'air comprimé par le piston dans cet espace ne pourra plus refouler s_2 , on ne comprimera plus d'air dans R.

Si u est l'espace nuisible, l'air de volume v et de pression P (pression atmosphérique) comprimé dans cet espace prend la pression : $P_1 = P \frac{v}{u}$

Donc la pression limite est $P_1 = P \frac{v}{u}$, d'autant plus forte que u sera plus petit et v plus grand.

3. *Machines industrielles.* — Elles sont basées sur les mêmes principes, mais à plusieurs cylindres ; de plus pour obtenir de très fortes pressions (plusieurs centaines d'atmosphères), l'air comprimé dans un premier cylindre est envoyé ensuite dans un second qui le comprime à son tour, parfois même dans un troisième.

On arrive ainsi à diminuer l'influence des espaces morts et à obtenir des pressions considérables.

§ III. — POMPES HYDRAULIQUES.

1. *Classification.* — On laissera de côté tous les appareils élévateurs d'eau basés sur l'emploi de norias ou chapelets de récipients, de seaux équilibrés, etc., pour ne considérer que des appareils munis de pistons, dont la théorie se rattache à la loi de Mariotte et à la pression atmosphérique.

Parmi ceux-ci on distingue les pompes aspirantes, les pompes foulantes, les pompes aspirantes et foulantes. Leurs formes diffèrent un peu, mais il est toujours facile de les classer par les définitions suivantes :

Le corps de la pompe aspirante est placé à une certaine

hauteur au-dessus du niveau de l'eau, et l'eau sort au niveau du corps de pompe (fig. 61 a).

Le corps de la pompe foulante est placé au niveau de

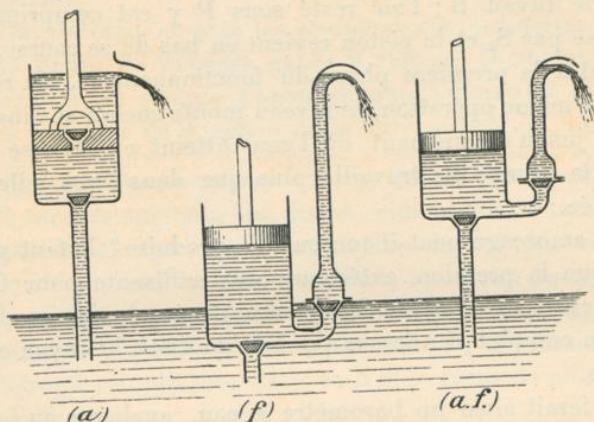


Fig. 61.

l'eau, et l'eau refoulée sort à un niveau plus élevé (fig. 61 f).

Enfin, la pompe aspirante et foulante, qui participe des deux précédentes, a son corps placé au-dessus du niveau de l'eau et refoule l'eau à un niveau plus élevé.

2. *Pompes aspirantes.* — Au début du fonctionnement, l'air occupe l'intérieur du corps de pompe, A, le tuyau B, de telle sorte que le niveau de l'eau est à la même hauteur MN, à la surface extérieure et dans le tuyau B. On dit que la pompe est désamorçée. Il faut l'amorcer.

a) *Amorçage de la pompe aspirante.* — Le piston P étant supposé en bas de sa course est soulevé, l'air compris dans le tuyau B soulève S_1 et se répand dans le volume formé par la pompe et le tuyau B. Il y a donc diminution de pression à l'intérieur; par suite, sous l'action de la pression atmosphérique

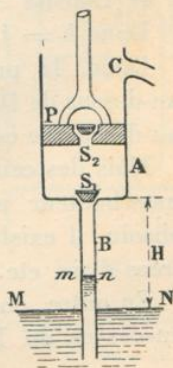


Fig. 62.

agissant sur MN, l'eau monte dans le tuyau B, jusqu'à un niveau *mn*.

Quand le piston P redescend, le clapet S_1 retombe et isole le tuyau B; l'air resté sous P y est comprimé et expulsé par S_2 et le piston revient en bas de sa course. On revient à la première phase du fonctionnement. En répétant la même opération, le niveau monte encore et ainsi de suite jusqu'au moment où l'eau atteint et dépasse S_1 ; alors la pompe ne travaille plus que dans l'eau, elle est amorcée.

Cet amorçage peut-il toujours se produire? Il faut pour cela que la pression extérieure soit suffisante pour faire monter le niveau jusqu'à S_1 , en admettant qu'on puisse faire le vide complet du dessus du liquide dans le tuyau et la pompe.

On ferait ainsi un baromètre à eau, analogue au baromètre à mercure mais où la colonne mercurielle serait remplacée par une colonne d'eau.

A quelle hauteur s'élève cette colonne? Elle fait équilibre à la pression atmosphérique qui est de 1 kg. 033 par centimètre carré; il y aura donc une hauteur h en centimètres telle que : $h \times 1 \text{ cm}^2 = 1.033 \text{ grammes}$, en supposant l'eau à 4° (Densité = 1).

Donc $h = 1.033 \text{ centimètres ou } 10^{\text{m}} 33$.

Donc, la pression atmosphérique ne peut élever l'eau au-dessus de 10^m 33; la soupape S_1 ne devra pas être placée au-dessus de cette hauteur¹.

Mais des causes diverses empêchent le fonctionnement à une hauteur moindre; la pompe ne peut faire le vide absolu, il existe des espaces morts, il se produit des rentrées d'air, etc.

En outre, on verra au Chapitre de la Vaporisation que, au-dessus du liquide, il s'établit une pression due à la

1. C'est à la suite de l'observation de l'impossibilité qu'avaient des fontainiers de Florence de pomper l'eau à plus de 10 mètres de profondeur que Galilée découvrit la pesanteur de l'air et la pression atmosphérique.

vapeur saturée, pression qui croît avec la température et qui diminue encore la hauteur à laquelle on peut pomper; on ne peut pas *pomper de l'eau chaude* avec une pompe aspirante.

En pratique, et pour les températures ordinaires, la hauteur limite ne dépasse guère 9 mètres. Donc une pompe aspirante ne pourra s'amorcer que lorsque le clapet S_1 sera à moins de 9 mètres de la surface MN du liquide.

b) *Fonctionnement normal.* — Quand l'eau a atteint S_1 , à la montée suivante du piston, elle le suit; à la descente consécutive, l'eau passe au-dessus de lui par S_2 . A la seconde montée le piston soulève cette eau au-dessus de lui, et elle se déverse par C; pendant ce temps, le vide se faisant sous le piston, l'eau, par suite de la pression atmosphérique remplit tout l'espace B et le corps de pompe sous le piston.

Le fonctionnement se fait alors d'une manière continue.

3. *Pompes foulante et aspirante foulante.* — Quand on veut monter de l'eau à une hauteur supérieure à 10 mètres, il faut employer un autre appareil; on peut employer soit la pompe foulante, soit la pompe aspirante et foulante. En se reportant à la figure 61, on voit que la pompe foulante est toujours dans le liquide et par suite toujours amorcée.

Elle peut élever l'eau à n'importe quelle hauteur, à condition qu'on exerce sur le piston un effort suffisant.

La pompe aspirante et foulante participe des deux précédentes; elle exige un amorçage préalable, mais permet le refoulement à toute hauteur.

Souvent les pompes employées en pratique sont à double effet, c'est-à-dire que l'aspiration est faite par les deux

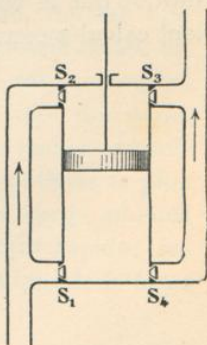


Fig. 63.

faces du piston ; les deux courses, montante et descendante, servent à faire sortir l'eau dont le jet est ainsi plus continu ; la figure 63 montre la disposition d'une telle pompe du type aspirant et foulant.

Les clapets S_1 , S_2 sont les clapets d'aspiration, S_3 , S_4 de refoulement ; ces clapets sont contretenus par des ressorts qui les appliquent normalement sur leur siège.

4. *Réservoir d'air.* — On n'obtient pas encore, avec le dispositif à double effet, un jet très continu ; aux extrémités de course, dans le renversement de

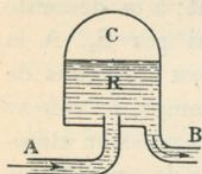


Fig. 64.

marche du piston, il n'y a pas d'eau refoulée et, par suite, il y a interruption du jet ; pour obtenir un jet continu, on met un réservoir d'air intermédiaire R ; l'eau refoulée par la pompe en A arrive dans R et comprime l'air dans le fond C ; au

moment où l'eau arrive en quantité moindre par A , l'air comprimé en C refoule en B l'eau qui se trouve en R .

Ce récipient R sert de volant au débit et le régularise à condition que le volume d'air et les débits des tuyaux A , B soient calculés convenablement.

LIVRE IV

CHALEUR

CHAPITRE I

Définitions. — Thermométrie.

§ I. — DÉFINITIONS.

La chaleur est la cause de nos sensations de chaud et de froid; quant à son origine et son essence, des hypothèses vraisemblables ont été faites, mais on ne peut donner d'elle une définition exacte. C'est donc par ses effets que nous pourrions seulement définir la chaleur : elle fait fondre les solides, transforme en vapeurs les liquides, fait augmenter le volume des corps, etc.

Bien que l'on ne puisse, avec certitude, donner une définition de la chaleur, souvent la terminologie usitée lui attribue les qualités d'un fluide matériel, impondérable; on parle de quantités de chaleur, on dit que des corps perdent de la chaleur; ce ne sont là que des manières commodes de parler et d'écrire. En réalité, l'hypothèse la plus vraisemblable est que les molécules des corps chauds seraient animées d'un mouvement vibratoire rapide; les quantités de chaleur ne seraient donc autres que de la force vive.

§ II. — THERMOMÉTRIE.

On reconnaît à la main que tous les corps ne sont pas au même état calorifique, mais nos sens ne nous permettent pas d'évaluer les différences très petites qui peuvent exister entre deux corps.

Si les sensations produites par deux objets sont iden-

tiques, nous disons qu'ils sont à la même température ; si l'un produit une sensation de chaud, l'autre de froid, on dit que l'un est à une température plus élevée que l'autre. La notion de température naît donc des différentes sensations que nous éprouvons.

Mais ces sensations ne sont pas assez précises, a-t-on dit ; aussi faut-il employer des appareils sensibles et constamment identiques à eux-mêmes pour déterminer les températures ; on utilise pour cela un des effets de la chaleur sur les corps, la dilatation.

Les physiciens, qui ont en vue des expériences très précises, emploient des appareils compliqués qui tirent leurs indications de la dilatation des gaz ; pour les expériences de précision ordinaire et tous les cas de la pratique, c'est la dilatation des liquides qui est utilisée. On parlera donc des deux types couramment employés : thermomètre à mercure, thermomètre à alcool.

§ III. — THERMOMÈTRE A MERCURE.

1. *Avantages du mercure.* — Le mercure a de nombreux avantages comme liquide thermométrique : il se dilate très régulièrement ; en sa qualité de métal, il se met rapidement en équilibre de température avec le milieu ambiant ; enfin, il peut servir dans des limites assez étendues, ne se congelant pas facilement et n'entrant en ébullition qu'à une haute température.

2. *Construction.* — Une tige de verre A, forée d'un canal capillaire, se termine à une extrémité par un réservoir R, à l'autre extrémité par une ampoule ouverte G. Dans cette dernière, on met du mercure et on chauffe le réservoir R de façon que l'air contenu dans R et A, s'échauffant, se dilate et s'en aille en passant à travers le mercure de G. Quand la température baisse, l'air se contracte, le mercure pénètre dans la partie capillaire et rentre dans R (fig. 63).

On recommence plusieurs fois cette opération, jusqu'au moment où, le réservoir R étant presque plein, on fait bouillir le mercure qui envahit A et expulse devant lui l'air restant; après cette opération, tout est plein de mercure.

On détache alors G et on chauffe l'appareil jusqu'à avoir du mercure dans toute la tige A; on ferme alors à la lampe le tube; l'appareil est construit.

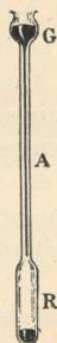


Fig. 65.

3. *Graduation du thermomètre.* — Il faut tracer sur l'appareil une échelle que devra parcourir le niveau du mercure aux différentes températures.

Pour cela, on commence par marquer deux points fixes correspondant à deux températures bien déterminées et faciles à reproduire.

On verra, en étudiant les changements d'état, que, lorsqu'un corps change d'état, sa température reste constante pendant toute la durée du changement d'état¹.

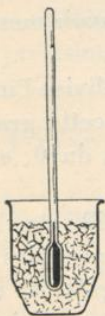


Fig. 66.

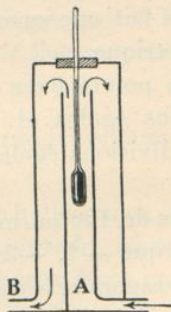


Fig. 67.

On utilise cette propriété pour marquer sur le thermomètre deux points caractérisés par la fusion de la glace et l'ébullition de l'eau, qui seront marqués 0 et 100 sur l'échelle.

1. On appelle changements d'état les transformations en liquide d'un solide ou d'un gaz, en gaz ou vapeur, d'un solide ou d'un liquide, et les transformations inverses.

Le thermomètre est placé dans un vase qui contient de la glace râpée et additionnée d'eau distillée; le niveau s'arrête à un point qui est repéré et constitue le 0.

Quand un thermomètre vient d'être construit, on détermine le 0 et on le marque sur la tige; si l'on refait quelque temps après cette détermination on trouve un autre point; c'est ce qu'on appelle le déplacement du zéro. Dans les mesures de précision on doit vérifier, avant de faire des déterminations, que le zéro n'a pas subi de déplacement.

La détermination du second point fixe se fait dans la vapeur d'eau saturée; mais on verra que sa température varie avec la pression extérieure; on prend la vapeur d'eau saturée sous la pression de 760^{mm} de hauteur barométrique.

Le thermomètre est placé dans une enveloppe double; la vapeur est amenée en A au centre, puis elle passe autour de la première enveloppe et s'en va en B; on évite ainsi les inégalités de température qu'introduiraient les condensations dues à la température extérieure.

Si la pression extérieure n'est pas exactement 760^{mm} de mercure, on fait une correction après avoir mesuré la hauteur barométrique.

Ces deux points fixes marqués, on divise l'intervalle en 100 divisions égales et on prolonge cette graduation au moyen de divisions égales, au-dessous du 0, et au-dessus de 100.

Au-dessus de 100 on marque 101, 102, etc.; au-dessous de 0 on marque -1, -2. Ces divisions égales sur la tige doivent correspondre à des capacités égales du canal capillaire; la tige doit donc être bien régulière et bien calibrée; elle est vérifiée avant la construction.

§ IV. — THERMOMÈTRE A ALCOOL.

1. *Construction.* — Le liquide employé est l'alcool, légèrement teinté pour rendre la lecture plus facile; la construction de l'appareil est facile: on chauffe l'ampoule

et la tige qui n'est pas encore fermée et on plonge l'extrémité dans de l'alcool qui, au refroidissement, monte dans l'ampoule ; on redresse l'appareil et on fait bouillir l'alcool, ce qui est facile puisqu'il bout à 79° . On chasse ainsi l'air et l'humidité. On renverse à nouveau dans l'alcool qui remplit toute la tige et l'ampoule ; car les vapeurs se condensent et le liquide remonte par la pression atmosphérique.

On chauffe pour faire sortir l'excès de l'alcool et on ferme en laissant un peu d'air qui comprime la colonne d'alcool et l'empêche de se séparer en plusieurs tronçons.

2. *Graduation.* — On peut fixer le 0 dans la glace fondante comme on l'a fait pour le thermomètre à mercure ; mais on ne peut fixer le point 100 puisqu'il y a ébullition beaucoup plus tôt. On gradue par comparaison avec un appareil à mercure en limitant la graduation aux environs de 60° .

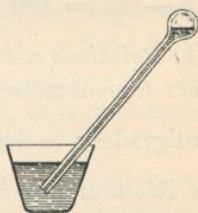


Fig. 68.

Ce thermomètre est économique, mais d'une précision moindre que le thermomètre à mercure.

§ V. — ÉCHELLES THERMOMÉTRIQUES.

1. *Échelle centigrade.* — L'échelle qui a été indiquée précédemment est l'échelle centigrade, marquant 0 dans la glace fondante, 100 dans la vapeur d'eau sous 760^{mm} de pression extérieure. C'est le physicien suédois Celsius qui a introduit cette échelle ; elle est généralement adoptée en France et dans les ouvrages français les températures sont données en degrés centigrades.

2. *Échelle Réaumur.* — Le physicien français Réaumur (1731) proposa les mêmes points fixes, mais en divisant leur intervalle en 80 parties seulement ; le thermomètre Réaumur marque donc 0 dans la glace fondante, 80 dans

la vapeur d'eau bouillante sous la pression de 760^{mm}. Cette échelle est peu usitée.

3. *Échelle Fahrenheit.* — Fahrenheit proposa (1714) une échelle très employée en Hollande, en Angleterre, en Amérique; le 0 correspond à la température obtenue dans un mélange en parties égales de sel ammoniac ($\text{Az H}^4 \text{Cl}$) et de neige; l'autre point fixe est obtenu dans la vapeur d'eau bouillante comme pour les autres échelles. Cet intervalle est divisé en 212 parties.

Dans la glace fondante, le thermomètre Fahrenheit marque 32°; donc les 100 divisions centigrades valent $212 - 32 = 180$ divisions Fahrenheit.

4. *Relations entre les températures marquées par les différents thermomètres.* — Soit C la température en degrés centigrades; le degré centigrade valant $\frac{80}{100} = \frac{4}{5}$ du degré Réaumur, on aura un nombre de degrés Réaumur :

$$R = \frac{4}{5} C.$$

De même la conversion des degrés Fahrenheit se fera en multipliant C par $\frac{180}{100} = \frac{9}{5}$, ce qui donne le nombre de degrés Fahrenheit au-dessus de 0 centigrade, par suite au-dessus de 32 Fahr. Donc en définitive, en échelle

Fahrenheit :
$$F = \frac{9}{5} C + 32.$$

On a donc les relations :

$$R = \frac{4}{5} C \text{ ou } C = \frac{5}{4} R,$$

$$F = \frac{9}{5} C + 32; \text{ ou } : C = (F - 32) \frac{5}{9},$$

qui permettent d'effectuer toutes les transformations.

CHAPITRE II

Dilatations et Densités.

§ I. — DILATATION DES SOLIDES. COEFFICIENTS DE DILATATION.

1. *Définitions.* — Les corps solides sous l'influence d'une élévation de température augmentent de volume; si on a mesuré leurs dimensions, on constate que les longueurs, les surfaces, les volumes ont augmenté. Il y a donc trois manières d'envisager les phénomènes de dilatation : la dilatation linéaire, la dilatation superficielle et la dilatation cubique.

On appelle Coefficient de dilatation linéaire l'allongement que prend l'unité de longueur d'un corps lorsque sa température s'élève de 0° à 1° .

On définirait d'une manière analogue les coefficients de dilatation superficielle et de dilatation cubique.

Les coefficients de dilatation linéaire et de dilatation cubique sont seuls employés en pratique; ils sont liés par une relation simple : le coefficient de dilatation cubique est triple du coefficient de dilatation linéaire.

Soit en effet un cube ayant pour arêtes à 0° l'unité; il est fait d'une substance dont le coefficient de dilatation linéaire est λ ; donc à 1° , ses arêtes sont venues à la longueur $1 + \lambda$. Le volume à 1° est le produit des trois longueurs, soit : $(1 + \lambda)^3 = 1 + 3\lambda + 3\lambda^2 + \lambda^3$.

λ est toujours très petit; λ^2 et λ^3 sont négligeables; le corps à 1° a comme volume très sensiblement : $1 + 3\lambda$. Son volume à 0° étant 1, 3λ est l'accroissement de volume du corps passant de 0 à 1° : c'est la définition du coefficient de dilatation cubique.

2. *Usage des coefficients.* — Soit une barre de longueur L_0 à 0° ; quelle sera sa longueur à t° ? En supposant que λ , le coefficient de la dilatation linéaire, soit constant dans les limites $0 - t$, l'allongement de la barre sera $L_0 \lambda t$.

La longueur totale sera donc :

$$L = L_0 (1 + \lambda t).$$

De même, si k est le coefficient de dilatation cubique d'un corps, le volume V_0 à 0° devient à t° :

$$V = V_0 (1 + kt).$$

On voit immédiatement que l'on peut connaître la variation de densité des solides, dont on a parlé précédemment ; on a défini la densité : la masse de l'unité de volume d'un corps ; cette unité de volume à t° est donc devenue $1 + kt$.

$$\text{On a à } 0^\circ : \quad d_0 = \frac{m}{1},$$

$$\text{à } t^\circ : \quad d_t = \frac{m}{1 + kt}.$$

$$\text{D'où :} \quad d_t = \frac{d_0}{1 + kt}.$$

§ II. — MESURE DES COEFFICIENTS DE DILATATION LINÉAIRE.

Les premières expériences précises ont été faites par Lavoisier et Laplace ; actuellement, pour étudier les dilatations, on se sert du comparateur. Cet appareil se compose de

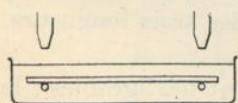


Fig. 69.

deux auges placées devant deux microscopes qui servent à lire les graduations que l'on a tracées sur les règles à étudier.

Une de ces auges contient une règle graduée, maintenue à une température constante ; cette règle est d'une longueur connue.

Dans l'autre auge on met la barre à étudier et on fait varier la température. On fait une première lecture, la température étant t ; en amenant la règle étalon à la place de la barre à étudier, on mesure la longueur L_t .

On fait une deuxième lecture à température différente t' . On obtient $L_{t'}$.

λ étant le coefficient de dilatation cherché :

$$L_t = L_0 (1 + \lambda t),$$

$$L_{t'} = L_0 (1 + \lambda t'), \quad \text{d'où :} \quad \frac{L_t}{L_{t'}} = \frac{1 + \lambda t}{1 + \lambda t'}.$$

On en tire λ .

On constate dans ces expériences que le coefficient de dilatation du verre et des métaux est constant, ou à peu près, entre 0 et 100°. A des températures plus élevées il varie et d'une manière différente suivant les substances.

On observe en outre que la plupart des substances, une fois refroidies, reviennent à leur longueur primitive.

Les coefficients de dilatation linéaire varient avec les substances; on trouve en effet pour :

le fer en fil	0,0000144,
le laiton	0,0000188,
le verre	0,0000080 à 0,0000090,
le bois de sapin	0,0000030 à 0,0000040.

§ III. — DILATATION DES LIQUIDES. DÉFINITIONS.

Il faut distinguer pour les liquides deux sortes de coefficients. Notons auparavant que ce ne sera jamais qu'un coefficient de dilatation cubique qui sera employé; sa définition sera la même que dans le cas des solides.

Mais tout liquide est contenu dans une enveloppe qui se dilate aussi; le liquide a donc un coefficient de dilatation absolue, relatif à l'augmentation réelle de volume du liquide, et un coefficient de dilatation apparente relatif à l'augmentation de volume que le liquide semble prendre.

Une expérience simple met en évidence ces phénomènes ; dans un ballon C (fig. 70), mettons un liquide dilatable qui s'élève à un niveau AB à la température ordinaire, de l'alcool par exemple ; si on plonge brusquement le ballon dans un récipient contenant de l'eau chaude, on voit le niveau de l'alcool baisser et venir en B₁.

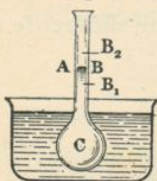


Fig. 70.

C'est que l'enveloppe s'échauffe seule d'abord ; elle augmente de volume, offrant à l'alcool un espace plus considérable ; puis l'alcool s'échauffe peu à peu, monte,

dépasse son ancien niveau AB et vient à un niveau B₂.

Il existe une relation permettant d'évaluer le coefficient de dilatation apparente k , connaissant le coefficient de dilatation absolue k_a et le coefficient de dilatation de l'enveloppe K .

Prenons en effet une masse égale à l'unité de volume, d'un liquide à 0°. Élevons de 1° la température ; elle paraît être devenue $1 + k$; mais chaque unité de volume de l'enveloppe s'est accrue de K ; donc le volume apparent $1 + k$ est en réalité $(1 + k)(1 + K)$. Le volume exact à 1° de la masse liquide est donc $(1 + k)(1 + K)$ ou par définition du coefficient de dilatation :

$$1 + k_a = (1 + k)(1 + K).$$

En développant : $1 + k_a = 1 + k + K + kK$; le produit kK de deux quantités très petites est négligeable ; il vient donc : $k_a = k + K$.

§ IV. — MESURE DES COEFFICIENTS DE DILATATION DES LIQUIDES.

1. *Dilatation absolue du mercure.* — Les expériences de Dulong et Petit, reprises par Regnault, ont permis de fixer le coefficient de dilatation absolue du mercure. Mais il fal-

lait pour cela éliminer la dilatation de l'enveloppe; les appareils employés permettent d'obtenir ce résultat; ils sont basés sur le principe des vases communicants.

Deux vases verticaux A, A' sont réunis par un tube horizontal très mince BB'; le mercure contenu dans l'appareil est entouré dans la branche A de glace fondante (0°), dans la branche A' d'huile à température constante t . On a le même liquide à des températures différentes; la surface de séparation se trouve dans BB'.

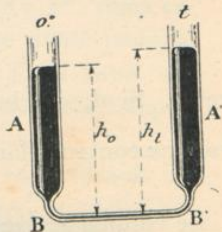


Fig. 71.

On peut donc appliquer la relation des vases communicants à ces deux liquides qui se maintiennent à des niveaux différents; on prend les hauteurs des surfaces libres au-dessus de l'axe du tube horizontal BB'.

Si d_o est la densité à 0°, d_t la densité à t ° du mercure :

$$\frac{h_o}{h_t} = \frac{d_t}{d_o}.$$

D'autre part, si ε_a est le coefficient de dilatation absolue du mercure, on sait que $d_t = \frac{d_o}{1 + \varepsilon_a t}$;

$$\text{donc :} \quad \frac{h_t}{h_o} = 1 + \varepsilon_a t.$$

$$\text{d'où :} \quad \varepsilon_a = \frac{h_t - h_o}{h_o t}.$$

Il suffit donc de mesurer $h_t - h_o$, h_o , et t .

Les expérimentateurs précités ont trouvé qu'entre 0 et 100° le coefficient moyen de dilatation absolue du mercure

est $\frac{1}{5550}$.

2. *Dilatation apparente du mercure.* — Un récipient en verre, dont la forme est indiquée sur la figure 72, est pesé vide, puis rempli de mercure à 0° et pesé à nouveau. Par différence on déduit le poids du mercure contenu P.

On chauffe à t° ; il sort un poids p de mercure ; par suite il reste dans l'appareil un poids $P-p$. On peut en déduire le coefficient de dilatation apparente du mercure dans le

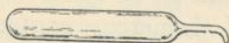


Fig. 72.

verre. Si d_0 est le poids spécifique du mercure à 0 , le volume contenu dans le verre est à 0° : $\frac{P}{d_0}$.

Le volume restant est, ramené à 0° , $\frac{P-p}{d_0}$ qui multiplié par le binôme $1 + \varepsilon t$ de dilatation apparente doit donner $\frac{P}{d_0}$; puisque le volume restant, à t° , semble occuper toujours le volume primitif.

$$\text{Donc : } \frac{P-p}{d_0} (1 + \varepsilon t) = \frac{P}{d_0}; \quad \text{ou} \quad \frac{P-p}{d_0} \varepsilon t = \frac{p}{d_0};$$

$$\varepsilon = \frac{p}{(P-p)t}.$$

Dulong et Petit ont trouvé pour ce coefficient de dilatation apparente du mercure : $\frac{1}{6480}$.

3. — En utilisant la formule trouvée précédemment, $k_a = k + K$, on déduit K ; en répétant la détermination de la dilatation apparente sur un liquide quelconque, on peut, au moyen de la même formule, retrouver k_a .

On a donc ainsi le moyen d'étudier la dilatation absolue des liquides.

Des expériences nombreuses ont été faites sur ces sujets et ont permis de trouver les variations des coefficients des liquides avec la pression et la température.

§ V. — MAXIMUM DE DENSITÉ DE L'EAU.

1. *Eau pure.* — La dilatation de l'eau suit une loi très différente de celle des autres liquides ; l'eau, en effet, quand la température s'abaisse, se contracte jusqu'à 4° ; mais en continuant le refroidissement, le liquide se dilate jusqu'à son point de congélation, 0° . Donc à 4° , l'eau subit un maximum de contraction, par suite, présente à cette température un maximum de densité.

Une ancienne expérience de Hope met en évidence ce phénomène : une éprouvette A est munie de deux thermomètres T et T' donnant la température des couches inférieures et supérieures de l'eau qu'elle contient. Un manchon M entoure l'éprouvette à mi-hauteur et contient un mélange réfrigérant.

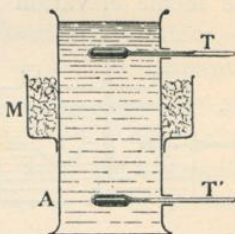


Fig. 73.

Si on met de l'eau à température ordinaire, 15° par exemple, l'eau se refroidit et se contracte ; cette eau refroidie, plus dense, va au fond et le thermomètre T' enregistre des températures décroissantes, qui atteignent 4° ; pendant ce temps T est resté à peu près stationnaire.

Quand le thermomètre inférieur a atteint 4° , T indique des températures qui décroissent et vont jusqu'à 0° ; on peut donc en conclure que l'eau au-dessous de 4° est de densité inférieure à celle à 4° .

Des expériences précises de Despretz ont permis de vérifier que c'est bien à 4° que se présente le maximum de densité ; il a constaté en outre que la variation de densité de 4° à 100° est très irrégulière.

2. *Solutions salines.* — Despretz a montré également que la présence de sels dissous dans l'eau abaisse la température du maximum de densité ; l'eau de mer en particu-

lier a son maximum au-dessous de son point de congélation : elle se congèle à $-1^{\circ}70$ et son maximum de densité serait à $-3^{\circ}67$. Les expériences sont donc assez difficiles, puisqu'il faut opérer sur un liquide en surfusion. (Cf. plus loin.)

§ VI. — DILATATION DES GAZ.

1. *Expériences de Gay-Lussac.* — Les gaz sont plus dilatables que les solides et les liquides, c'est-à-dire que, pour une même élévation de température, ils présentent des

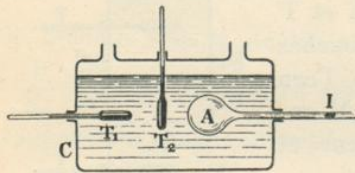


Fig. 74.

augmentations de volume bien plus considérables ; Gay-Lussac étudia leur loi de dilatation et donna une formule qui porte son nom.

L'appareil de Gay-Lussac était constitué comme l'indique la figure 74 : dans une caisse C sont placés deux thermomètres T_1 et T_2 destinés à indiquer exactement la température ; un réservoir A muni d'une tige divisée contient le gaz. Le gaz était introduit avec précaution dans le réservoir pour éviter d'y mettre en même temps de l'humidité qui eût faussé les résultats.

Un index de mercure I, se déplaçant dans la tige divisée, indiquait l'expansion du gaz ; on connaissait la pression subie par le gaz par les indications du baromètre.

Connaissant le rapport de graduation de la tige au volume de A, on en déduisait les dilatations ; Gay-Lussac trouva ainsi un coefficient de dilatation α , égal pour tous les gaz et sensiblement constant entre 0° et 100° , ayant pour valeur :

$$\alpha = 0,00375 = \frac{1}{267}.$$

On a donc : $V = V_0 (1 + \alpha t)$, en supposant la pression constante.

2. *Expériences récentes.* — Les expériences de Gay-Lussac furent discutées par divers physiciens, en particulier par Regnault en France et plus tard par M. Amagat.

On put ainsi constater que le coefficient α n'avait pas la valeur indiquée par Gay-Lussac ; qu'en outre, il était variable pour les différents gaz et variable, pour chaque gaz, avec la pression, la température et qu'il n'était pas le même si on faisait les expériences à volume constant ou à pression constante.

Mais, en pratique, les différences étant peu notables, on peut employer la formule : $V = V_0 (1 + \alpha t)$, en donnant à (α) la valeur qui convient pour chaque gaz. Pour les gaz éloignés de leur point de liquéfaction, l'air, l'hydrogène, l'oxyde de carbone, on peut prendre, dans les intervalles de température 0° — 100° , et aux environs de la pression atmosphérique,

$$\alpha = \frac{1}{273} = 0,003665.$$

3. *Formule générale de la dilatation.* — Si on se tient dans ces limites, on peut donner une formule générale comprenant à la fois la loi de Mariotte et celle de Gay-Lussac.

Le volume d'une masse de gaz étant V , sa pression P , sa température t , quel sera le volume sous la pression P' , à la température t' ?

Supposons d'abord que la température reste constante et égale à t , et que la pression passe de P à P' ; le volume V devient V_1 donné par la loi de Mariotte :

$$PV = P'V_1 \text{ ou } V_1 = V \frac{P}{P'}.$$

La pression étant maintenue constante et égale à P' , éle-

Physique et chimie. — GILLE.

vons la température de t à t' ; la loi de Gay-Lussac nous permettra de trouver la variation de volume.

En effet, si au lieu de passer de t à t' on passe de t à 0, on obtient un volume V_0 tel que $V_1 = V_0(1 + \alpha t)$. Le volume V' à t' sera : $V' = V_0(1 + \alpha t')$.

$$\text{Donc : } \frac{V_1}{V'} = \frac{1 + \alpha t}{1 + \alpha t'} \quad \text{ou } V' = V_1 \frac{1 + \alpha t'}{1 + \alpha t},$$

la pression demeurant toujours P' .

En remplaçant V_1 par sa valeur précédemment trouvée, il vient :

$$V' = \frac{PV}{P'} \times \frac{1 + \alpha t'}{1 + \alpha t}$$

$$\text{ou autrement : } \frac{PV}{1 + \alpha t} = \frac{P'V'}{1 + \alpha t'}$$

$$\text{Ce qu'on peut écrire : } \frac{PV}{1 + \alpha t} = \text{constante.}$$

Cette expression permet de résoudre tous les problèmes de dilatation et compression des gaz dans les limites et avec les restrictions qui ont été indiquées.

§ VII. — DENSITÉ DES GAZ.

1. *Définitions.* — On appelle densité d'un gaz le rapport de son poids à celui d'un égal volume d'air, pris dans les mêmes conditions de température et de pression; ou, plus exactement, le gaz et l'air étant à la température de 0° et à la pression de 760^{mm} de mercure.

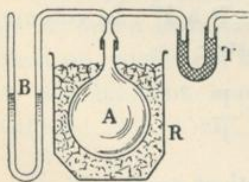


Fig. 75.

2. *Mesure de la densité. Méthode de Regnault.* — Un ballon A en verre, d'une dizaine de litres de capacité, est placé dans un récipient R contenant de la glace fondante (0°). On fait le vide dans ce ballon et on laisse rentrer le gaz ou l'air par un tube T contenant des substances

desséchantes; le ballon est en communication avec un baromètre B, qui indique la pression de l'air ou du gaz contenu. On pourra ainsi faire les corrections nécessaires, si la pression n'est pas exactement 760^{mm}.

Le ballon rempli est fermé, essuyé et pesé; pour éviter les ennuis d'une correction due à la poussée de l'air (on a signalé déjà en Aérostatique que les poids qu'indique la balance sont faussés par le déplacement de l'air), on suspend à l'autre plateau de la balance un ballon identique, donnant par suite la même poussée dans n'importe quelles conditions extérieures.

En opérant successivement sur un ballon vide d'air, plein d'air, plein d'un autre gaz, on obtient les poids et la densité du gaz par rapport à l'air, à condition de faire les corrections nécessaires pour ramener les poids à leur valeur correspondant à 760^{mm} de pression.

Les expériences reprises par M. Leduc ont donné les résultats suivants :

Poids du litre d'air sec à 0° sous la pression de 760^{mm} : 1 gr. 2932 à Paris (latitude 48° 50' 14" — altitude 60^m). On peut en déduire, connaissant les variations de g , le poids en un point quelconque du globe.

Densités :

Hydrogène, 0,06747	Azote, 0,9720.
Oxygène, 1,1050	Acide carbonique, 1,5290.

3. *Poids d'un volume donné de gaz.* — Le poids d'un décimètre cube de gaz à la pression P (évaluée en millimètres de mercure) et à la température t peut se déduire des lois de Mariotte et de Gay-Lussac.

Le poids du décimètre cube d'air à 0° et 760^{mm} étant 1 gr. 2932, le poids du décimètre cube d'air à t et P est :

$$p \text{ (air)} = 1 \text{ gr. 2932} \frac{P}{(1 + \alpha t) 760}$$

Pour un gaz quelconque de densité d :

$$p \text{ (gaz)} = 1,2932 \frac{Pd}{(1 + \alpha t) 760}$$

On trouve ainsi pour poids du décimètre cube de gaz à 0° et 760^m :

$$p \text{ (gaz)} = 1,2932 d.$$

Azote,	1,2561	Hydrogène,	0,0896
Oxygène,	1,4298	Acide carbonique,	1,9774

CHAPITRE III

Changements d'état.

Un corps peut exister sous trois états : solide, liquide, gazeux ; on peut, par des variations de température et de pression, le faire passer d'un état à l'autre ; certains passent de l'état solide à l'état liquide par un état intermédiaire : l'état pâteux.

§ I. — LOIS DE LA FUSION.

1. — Le phénomène de la fusion des corps, ou passage de l'état solide à l'état liquide, est soumis à deux lois expérimentales :

1^{re} Loi. — Sous une pression constante, la température à laquelle chaque substance entre en fusion est déterminée et invariable.

2^e Loi. — Pendant toute la durée de la fusion la température reste constante.

Il y a exception cependant pour certains corps qui passent par un état pâteux avant de fondre ; on ne peut alors déterminer avec précision leur point de fusion.

Inversement, si un corps passe de l'état liquide à l'état solide (solidification), il suit des lois analogues : la solidification se fait à une température déterminée qui reste constante pendant toute la durée de la solidification. Cette température est la même que celle qui caractérise la fusion.

Par définition du zéro centigrade, l'eau se solidifie à 0°, sous la pression atmosphérique ; on trouve pour les autres substances, par exemple :

Suif	33°	Plomb	326	Argent	945
Paraffine	46°3	Zinc	415	Fontes de fer	1050 à 1200
Soufre	114°5	Aluminium	625	Aciers	1250 à 1450

2. *Phénomènes accompagnant la fusion ou la solidification.* — Certains corps en passant de l'état liquide à l'état solide augmentent de volume, d'autres diminuent. La transformation de l'eau en glace se fait avec une augmentation notable de volume : sa densité est 0, 930 ; c'est pourquoi elle flotte sur l'eau.

Elle acquiert de ce fait une force d'expansion considérable au moment de sa transformation ; c'est ainsi qu'elle fait éclater les tuyaux de conduite d'eau, les récipients trop bien remplis et bien bouchés.

La fonte de fer, le bismuth, l'antimoine offrent le même phénomène d'augmentation de volume ; la plupart des autres substances se contractent par solidification.

3. *Influence de la pression extérieure sur la température de fusion.* — On peut amener un changement très sensible de la température de fusion en modifiant la pression extérieure sur les corps ; en général, les corps se dilatent en passant de l'état solide à l'état liquide ; la pression extérieure est un obstacle à l'expansion ; l'accroissement de pression extérieure élèvera donc la température de fusion.

L'effet sera inverse pour les substances qui augmentent de volume en passant à l'état solide.

Les expériences de Bunsen, William Thomson, M. Amagat ont montré cette influence. On a trouvé par exemple pour la paraffine :

Pressions	: 1 atm.	85 atm.	100 atm.
Température de fusion :	46°3	48°9	49°9

Le regel de la glace met le même fait en évidence : en comprimant de petits morceaux de glace dans un moule on les fait se souder et constituer une masse de glace unique et translucide ; la glace a fondu par compression et s'est congelée ensuite, n'étant plus comprimée.

4. *Exceptions aux lois de la fusion. Surfusion.* — La surfusion est un phénomène qui consiste dans l'abaissement

notable du point de solidification des liquides au-dessous de leur température normale de solidification.

De l'eau laissée immobile peut être amenée jusqu'à -12° sans qu'elle se solidifie ; mais sitôt qu'on la remue ou qu'on la touche, il se forme de la glace et la température remonte à 0° . Des expériences analogues réussissent sur un grand nombre d'autres substances, le soufre, le phosphore, etc.

Le liquide en surfusion est donc dans un état instable, mais qui n'en constitue pas moins une exception aux lois de la fusion.

§ II. — DISSOLUTION DES SOLIDES.

1. *Définition.* — Un solide plongé dans un liquide peut disparaître, par suite de la dispersion de ses molécules dans celles du liquide ; le sucre, la plupart des sels se dissolvent dans l'eau ; c'est évidemment encore un passage de l'état solide à l'état liquide.

On appelle ce phénomène fusion aqueuse ou plus communément dissolution.

Cette action est souvent d'origine chimique ; l'eau en dissolvant la baryte ou l'anhydride sulfurique réagit chimiquement sur ces corps : ce n'est pas à proprement parler une dissolution, mais bien une réaction que la chaleur dégagée nous signale comme très énergique. Mais dans la dissolution du chlorure de sodium ou du sucre, il est difficile de trouver les caractères d'une combinaison. Il s'ensuit que les phénomènes observés sont souvent fort différents.

2. *Solution saturée.* — A une température déterminée, une masse déterminée du dissolvant ne peut dissoudre qu'une quantité déterminée d'un solide ; quand cette quantité se trouve dissoute dans le dissolvant, on dit que la solution est saturée.

Si, par exemple, dans 100 grammes d'eau pure, on ajoute progressivement et par petites quantités un corps

soluble, le solide disparaît et se dissout au fur et à mesure; puis, à un moment donné, il cesse de se dissoudre et reste dans la solution à l'état solide : c'est que l'on a atteint la saturation.

Cette quantité qui détermine la saturation varie avec la température; la quantité de solide qu'un dissolvant peut dissoudre n'est donc pas la même à toutes les températures; de plus, elle augmente avec la température pour

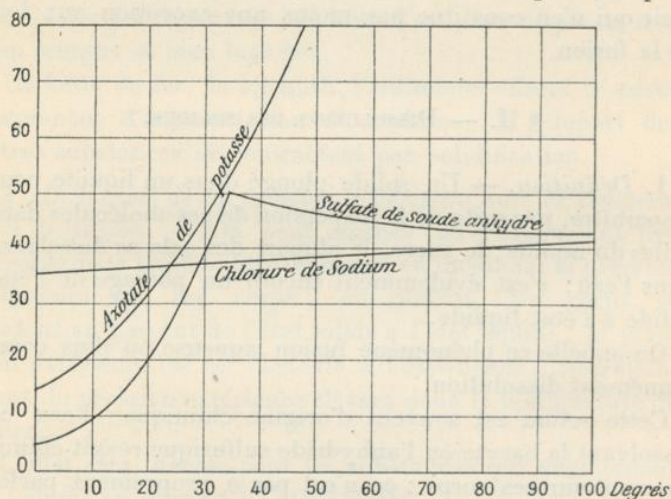


Fig. 76.

certaines substances et diminue pour d'autres; enfin, elle croît parfois jusqu'à une certaine température et diminue ensuite.

On trace souvent, pour exprimer ces faits, des courbes de solubilité; en portant en abscisses les températures, en ordonnées les quantités en poids des sels qu'on peut dissoudre dans 100 parties du dissolvant, on obtient des courbes régulières.

La figure 76 montre des exemples; le chlorure de sodium a une solubilité constante avec la température ou presque.

L'azotate de potasse a, au contraire, une solubilité très rapidement croissante.

Le sulfate de soude anhydre a une solubilité croissante d'abord, puis décroissante à partir de 33°.

La conséquence est que, si nous avons une solution d'azotate de potasse saturée à 20° et si la température s'élève, la solution ne sera plus saturée, elle pourra dissoudre à nouveau du sel. Si la température s'abaisse, il y aura trop de sel dans la dissolution et il s'en précipitera une partie.

Pour déterminer la solubilité d'une substance à une certaine température, on en introduit un excès avec le dissolvant dans une fiole et on l'agite longtemps en maintenant une température constante et égale à celle considérée. On abandonne ensuite la solution à elle-même; on vérifie la température au bout d'une heure ou deux et on prélève une partie pour doser la quantité dissoute.

3. *Influence des substances déjà dissoutes.* — Une solution saturée d'un sel peut généralement dissoudre une certaine quantité d'un sel tout différent; et alors elle devient apte à dissoudre à nouveau une quantité supplémentaire du premier sel. Il se présente d'ailleurs de nombreuses anomalies dans ces phénomènes¹; ce qui est caractéristique, c'est qu'une solution saturée d'un sel puisse en dissoudre d'autres.

4. *Exceptions aux lois de la dissolution. Sursaturation.* — Une solution saturée, refroidie, doit, avons-nous dit, laisser déposer le solide; mais si le refroidissement est opéré avec précaution, et à l'abri de l'air, il ne se déposera rien. L'expérience est facile avec le sulfate de soude hydraté.

On provoque le dépôt brusque du sel de la solution sursaturée en introduisant un petit cristal de sulfate de soude; même par le simple passage de l'air dans la solution, on

1. La plupart des anomalies qui se présentent dans l'étude des dissolutions viennent de ce que les sels métalliques forment avec l'eau de véritables combinaisons dites hydrates.

provoque la précipitation, car il se trouve dans l'air de petites particules de sulfate qui agissent pour produire cet effet.

En général, pour produire le dépôt du sel d'une solution sursaturée, il faut la présence d'un cristal du sel en solution ou d'un sel isomorphe.

Mais certaines solutions peu stables à l'état de sursaturation (chlorure de calcium, azotate d'ammoniaque) précipitent par frottement d'un corps quelconque dans le vase.

La sursaturation est donc un phénomène faisant exception aux lois de la dissolution, comme la surfusion fait exception aux lois de la fusion.

§ III. — VAPEURS. DÉFINITIONS.

1. *Vaporisation*. — Le passage de l'état liquide à l'état gazeux porte le nom de vaporisation. Tantôt les vapeurs se forment tranquillement à la surface des liquides sans agitation de la masse, et l'on dit qu'il y a *évaporation*; tantôt il y a *ébullition*, c'est-à-dire production dans toute la masse de bulles de vapeur qui l'agitent en venant éclater à la surface.

2. *Vapeurs saturantes ou saturées*. — Quand dans un récipient nous avons, à l'état stable, de la vapeur encore en contact avec du liquide qui lui a donné naissance, on dit que la vapeur est saturante ou saturée; elle suit des lois particulières que nous étudierons plus loin.

3. *Vapeur sèche*. — Si un liquide s'est complètement transformé en vapeur, de telle sorte que nous n'ayons plus dans un récipient donné le corps qu'à l'état gazeux, on dit que la vapeur produite est sèche.

Elle n'est plus alors qu'un gaz et elle suit les lois des gaz, tant qu'elle ne s'est pas transformée partiellement en liquide; si elle est assez loin de ce point de transformation,

elle suit les lois de Mariotte et Gay-Lussac, avec les restrictions que l'on a déjà indiquées. Quand elle se rapproche de son point de liquéfaction, elle s'écarte notablement de ces lois.

4. *Liquéfaction des gaz.* — Les gaz ne sont autres que les vapeurs de corps qui, dans les conditions ordinaires de pression et de température, ne peuvent exister à l'état liquide. En soumettant les gaz à une température et une pression convenables, on peut les faire revenir à l'état liquide. Les gaz ne sont donc autre chose que des vapeurs sèches.

§ IV. — VAPEURS SATURANTES. TENSION MAXIMUM.
(CAS DES VAPEURS DANS LE VIDE.)

1. *Tension.* — Nous supposerons le cas des vapeurs saturantes dans le vide, c'est-à-dire dans un espace où il n'existe que la vapeur en contact avec le liquide qui lui donne naissance.

Dans ces conditions, la vapeur étant saturante, la pression ne dépend pas du volume qu'elle occupe, mais seulement de la température ; cette tension croît avec la température.

On peut le montrer très simplement pour des tensions inférieures à la pression atmosphérique au moyen d'un tube barométrique plongeant dans une cuve à mercure ; on introduit dans le tube un peu de liquide ; ce liquide émet des vapeurs qui ont une certaine tension ; cette tension et la hauteur h de mercure dans le tube équilibrent la pression barométrique.

Si on met le tube dans les positions A, B, C, on voit qu'en faisant varier le volume de la vapeur, la hauteur h du mercure reste sensiblement constante, ce qui prouve que la tension de la vapeur n'a pas varié.

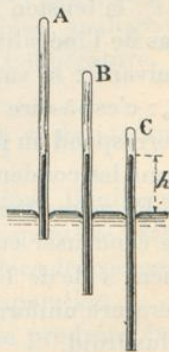


Fig. 77.

Si on fait varier la température extérieure, h varie ; on voit donc ainsi que la tension de vapeur ne dépend que de la température.

Il existe par suite, pour chaque vapeur, une tension qui est la tension maximum ; on ne peut l'augmenter par compression de la vapeur. Si on part de la vapeur sèche, en la comprimant on augmente sa pression jusqu'au moment où elle commence à se liquéfier et à devenir vapeur saturante : et à partir de ce moment, la pression reste constante. C'est donc bien une tension maximum pour la vapeur, qu'elle soit sèche ou saturante, à cette température.

2. *Paroi froide ; principe de Watt.* — Supposons deux vases A, B, mis en communication et contenant le même

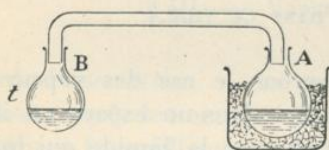


Fig. 78.

liquide ; l'un d'eux, A, est maintenu dans la glace à la température 0° ; l'autre est à une température plus élevée, t .

Si tout l'ensemble était à 0° , la tension de la vapeur serait f_0 ; si l'ensemble était à t° , la tension serait f_t ; et $f_0 < f_t$. Il se produit dans le cas de l'inégalité indiquée, 0 en A et t en B, le phénomène suivant : la vapeur dans tout l'ensemble est à la pression f_0 ; c'est-à-dire que la pression de l'ensemble est celle qui correspond au point le plus froid. Cette propriété est utilisée dans les condenseurs de machines à vapeur.

En même temps, le liquide contenu en B distille et vient se condenser en A, jusqu'au moment où B est complètement vide de liquide et où toute l'enceinte est à une température uniforme et égale à 0° , donc à celle du point le plus froid.

Il y a donc transport du liquide du point le plus chaud au point le plus froid.

3. *Mesure des tensions maximums des vapeurs.* — On devrait donc, en raison du phénomène de la paroi froide,

toujours supposer une enceinte à température uniforme, ou considérer la température du point le plus froid comme réglant la pression dans l'enceinte.

Les mesures de tension des vapeurs saturantes ont été exécutées par Dalton, Arago, Regnault dans le cours du XIX^e siècle ; en particulier pour l'eau qui a une importance considérable, étant donné son emploi dans la machine à vapeur.

On constate que même au-dessous de 0°, il existe de la vapeur ayant une certaine tension. On trouve ainsi :

Température	Tension en $\frac{m}{m}$ de mercure.	Température	Tension en $\frac{m}{m}$ de mercure.
— 30	0,386	120	1491,280
— 20	0,927	140	2717,63
— 10	2,093	160	4651,62
0	4,600	180	7546,39
20	17,391	200	11688,96
50	91,982	220	17390,35
100	760,000	230	20926,40

La détermination a été faite pour la plupart des liquides usuels, alcools, éthers, etc., et des tables analogues indiquent la relation entre la pression et la température.

§ V. — FORMATION DES VAPEURS. ÉVAPORATION ET ÉBULLITION.

1. *Évaporation.* — Dans l'atmosphère, tout liquide se transforme peu à peu en vapeur et finit par disparaître ; sans agitation de la masse, il se forme par la surface des vapeurs qui s'en vont dans l'atmosphère. C'est l'évaporation.

Dalton a étudié la rapidité avec laquelle se produit l'évaporation ; supposons d'abord qu'elle se produise dans un espace illimité où la pression atmosphérique est H , et où il existe de la vapeur d'eau ayant une tension f . La température est t au moment de l'expérience ; à cette température

correspond une tension F de vapeur d'eau dans le vide (cf. tableau précédent). Dalton a trouvé que la quantité d'eau évaporée pendant un temps déterminé pouvait s'exprimer par :

$$Q = A \frac{S}{H} (F - f),$$

S est la surface libre du liquide, A un coefficient dépendant des conditions extérieures (agitation de l'air, etc.).

Donc plus l'air contient d'humidité (plus f est grand), plus l'évaporation est lente; si on diminue la pression atmosphérique au-dessus du liquide, l'évaporation est plus rapide. Dans le vide elle est presque instantanée.

Cette formule ne convient évidemment pas à l'air calme; dans ce cas, la couche d'air immédiatement en contact avec le liquide se sature de vapeur et arrête l'évaporation; au contraire si elle est balayée et renouvelée, le liquide diminue plus rapidement.

Dans un espace limité, il en est autrement; en effet, la vapeur formée se réunit à celle qui existe déjà et tend à augmenter sa pression; en même temps l'évaporation diminue. Elle devient nulle quand $f = F$, c'est-à-dire quand la tension de vapeur dans l'air est égale à celle qu'elle aurait dans le vide à la même température.

On verra plus loin les lois relatives à ces mélanges des gaz et des vapeurs.

2. *Ébullition.* — L'ébullition est la production de vapeur dans toute la masse du liquide; on constate que ce phénomène suit des lois bien déterminées :

1^{re} loi. — L'ébullition commence à une température bien déterminée, variable d'un liquide à l'autre, mais toujours la même pour un liquide placé dans les mêmes conditions de pression. En outre la température du liquide reste constante pendant l'ébullition.

2^e loi. — Un liquide entre en ébullition quand la tension

ou force élastique de sa vapeur est égale à la pression extérieure qui s'exerce à sa surface.

D'après l'énoncé de ces lois on voit pourquoi on a choisi l'ébullition de l'eau pour fixer un point de l'échelle thermométrique ; sous la pression de 760 mm (pression atmosphérique moyenne) l'eau entre en ébullition à la température qu'on a appelée 100°.

On voit, d'après le tableau du § IV, que sous la pression de 91 mm 98 l'eau bout à 50°. On constate sur les montagnes où la pression atmosphérique est plus faible qu'au niveau de la mer, que l'eau bout à des températures inférieures à 100°.

On pourra, en connaissant la loi qui relie la pression d'une vapeur saturante dans le vide à la température, déduire la température à laquelle le liquide bout à la pression atmosphérique ordinaire, d'après la deuxième loi.

On trouve ainsi :

Alcool	79°	huile de lin	316°
Essence de térébenthine	157°	mercure	360°, etc.

3. *Exceptions aux lois de l'ébullition.* — En faisant chauffer de l'eau bien purgée d'air, on peut élever sa température notablement au-dessus de 100° ; mais en introduisant une tige de métal ou de bois qui entraîne des bulles d'air, on provoque l'ébullition ; il semble donc qu'il soit nécessaire d'avoir, au sein du liquide, de petites bulles d'air autour desquelles commence l'ébullition.

Une autre anomalie se présente : c'est la caléfaction ; si on chauffe fortement une coupelle métallique A (fig. 79) et qu'on y projette de l'eau, cette eau se rassemble en un globule B et ne bout pas, quoique la température de A soit très supérieure à 100°.



Fig. 79.

On constate avec un thermomètre que la température de B est de 96° à 98° à la partie basse, 90° à la surface supérieure (Expériences de M. Berger sur de gros globules). De

plus, le globule ne touche pas la coupelle A, il en est séparé par une couche de vapeur.

Ce phénomène ne se produit que si A est à une température supérieure à 140° ; si on laisse refroidir A, quand la température atteint 140° (pour l'eau), le globule s'étale et entre en ébullition violente.

Ces particularités sont facilement explicables ; à la température de 140° et aux températures supérieures, les propriétés capillaires de l'eau, différentes de celles à la température ordinaire, lui permettent de subsister en globule comme du mercure ; en outre, il se produit au contact de A une évaporation rapide et une gaine de vapeur qui isole et rafraîchit le globule suffisamment pour que sa température reste inférieure à 100° .

§ VI. — MÉLANGE DES GAZ ET DES VAPEURS.

On a vu précédemment que, dans un espace limité et plein d'air, la vapeur d'eau prenait une tension égale à celle qu'elle aurait eu dans le vide à la même température.

Cette loi est générale et s'applique à tous les liquides ; on constate en outre que cette pression s'ajoute à celle de l'air ou du gaz déjà contenu dans l'enceinte.

Dans le cas où les vapeurs ne sont pas saturantes ($f < F$), la seconde loi s'applique également : les gaz et les vapeurs, se mêlant entre eux, prennent une tension totale égale à la somme des tensions qu'ils auraient individuellement dans le même espace.

Il ne faut pas oublier que, si la tension de la vapeur f est inférieure à la tension maxima F qu'elle aurait dans le vide à la même température, la vapeur constitue une vapeur sèche, par suite un gaz, et suit approximativement les lois de Mariotte et Gay-Lussac.

Il n'est donc pas étonnant de retrouver l'énoncé de la loi du mélange des gaz.

Remarque. — Si le baromètre marque une pression H , et que la tension de la vapeur d'eau soit f , la pression de l'air est $H - f$.

§ VII. — HYGROMÉTRIE.

1. *Son objet.* — L'hygrométrie a pour objet la détermination de la proportion de vapeur contenue soit dans l'atmosphère, soit dans un volume d'air limité.

Le degré d'humidité ou état hygrométrique se définit généralement ainsi : c'est le rapport entre la tension de la vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère et la tension qu'aurait la vapeur d'eau à la même température si l'air était saturé.

Si f est la tension de la vapeur et F celle de la vapeur saturée à la même température, l'état hygrométrique est :

$$e = \frac{f}{F}.$$

Cet état hygrométrique ne dépend donc pas de la quantité absolue de vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère, mais de la tension f ; quand l'air est froid, il est saturé avec peu de vapeur ; quand il est chaud, au contraire il en faut une plus grande quantité. Quand on chauffe un appartement, on ne diminue pas la quantité de vapeur contenue, mais on diminue son humidité en reculant le point de saturation.

Les appareils employés pour déterminer e sont les hygromètres ; il en existe quatre types principaux : les hygromètres chimiques, les hygromètres à absorption, les hygromètres à condensation et les psychromètres.

2. *Hygromètre chimique.* —

On fait passer un volume connu d'air sur une substance desséchante, du chlorure de

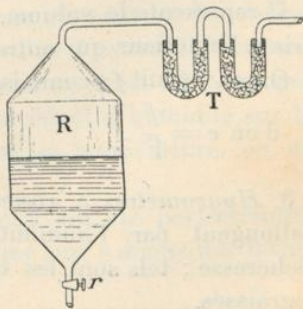


Fig. 80.

Physique et chimie. — GILLE.

calcium par exemple. On a pesé la substance avant le passage de l'air, on la pèse ensuite ; on a par différence le poids p d'eau recueillie. Si V est le volume d'air qui a passé, t la température, f la tension de vapeur dans l'atmosphère, on peut, connaissant la densité de la vapeur t , calculer f ; en effet il suffit d'appliquer les formules qu'on a données du poids des gaz à des températures et pressions variables.

La densité de la vapeur d'eau définie comme la densité des gaz est : 0,622. On a donc :

$$p = V \times 1,293 \times 0,622 \frac{1}{1 + \alpha t} \frac{f}{760}.$$

L'appareil est disposé comme l'indique la figure 80 ; un réservoir R plein d'eau porte un robinet r à sa partie inférieure. Si on l'ouvre, l'eau s'écoule et aspire l'air par une série de tubes T qui contiennent les matières desséchantes.

Soit U le volume d'air dans R ; il n'est pas égal au volume d'air pris à l'extérieur, car, à l'extérieur, il y avait de la vapeur d'eau à la pression f , au lieu que dans R il y a excès d'eau et l'air est saturé d'humidité, donc contient de l'eau à la pression F . En appliquant la loi de Mariotte, on a donc la relation :

$$V (H - f) = U (H - F), \quad \text{d'où } V = U \frac{H - F}{H - f}.$$

U représente le volume d'eau écoulé ; V est le volume pris à l'extérieur qui entre dans l'expression de p .

On en déduit f ; connaissant la température t , on connaît F , d'où $e = \frac{f}{F}$.

3. *Hygromètres à absorption.* — Certaines substances s'allongent par l'humidité et se raccourcissent par la sécheresse ; tels sont les cheveux, une fois qu'ils ont été dégraissés.

Sur ce principe est basé l'hygromètre de Saussure ; un cheveu est tenu en un point fixe A ; il s'enroule sur une

poulie B qui conduit une aiguille ; un poids p tend le cheveu dans la gorge de la poulie.

Ses allongements et ses raccourcissements provoquent donc des déplacements de l'aiguille sur un cadran.

Pour le graduer, on place l'appareil sous une cloche où se trouvent des substances desséchantes ; au bout d'une quinzaine de jours, le cheveu a atteint son raccourcissement maximum ; on marque 0 au point indiqué.

On le met ensuite sous une cloche dont les parois sont mouillées ; en quelques heures il a acquis son allongement maximum ; on marque 100 et on divise l'intervalle en 100 parties égales.

Cette division ne correspond pas à des valeurs proportionnelles de e ; il faut une table pour indiquer la concordance ; en outre, une table faite pour un hygromètre ne peut servir pour un autre, les cheveux ne suivant pas tous la même loi de raccourcissement.

Ces appareils sont donc peu précis ; mais ils sont transportables et n'exigent aucun calcul.

4. *Hygromètres à condensateur.* — Un corps est placé dans l'air et refroidi progressivement au-dessous de la température ambiante ; il arrive un moment où la tension de la vapeur d'eau contenue dans l'air f est égale à la tension maxima de la vapeur d'eau correspondant à la température du corps ; il se fait alors un dépôt d'humidité sur le corps. Si on connaît à ce moment sa température, on en déduit f .

Ces appareils inventés par Daniell ont été perfectionnés par Regnault et Alluard ; ce dernier leur a donné une forme commode.

Un vase V a une paroi formée d'une lame bien polie, argent ou laiton doré ; une lame C encadre la précédente et sert de point de comparaison.



Fig. 81.

Dans le vase se trouve un thermomètre T et deux tuyaux A, B, aboutissent, l'un à la partie supérieure, A, l'autre à la partie inférieure, B. On met de l'éther et on le fait évaporer, soit par aspiration en A, soit par refoulement d'air en B. Une fenêtre percée dans la lame V permet de lire la graduation indiquée par le thermomètre.

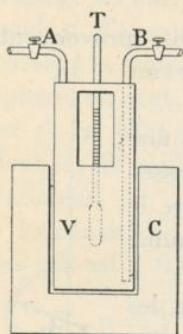


Fig. 82.

Quand la rosée apparaît, le thermomètre marque t' ; on laisse l'appareil se réchauffer et on observe la disparition de la rosée à une température t'' ; on peut admettre que la température caractérisant

le point de rosée est : $t = \frac{t' + t''}{2}$.

5. *Psychromètres*. — Ce sont des appareils qui font connaître le degré d'humidité de l'atmosphère par la vitesse de l'évaporation d'un corps mouillé.

Deux thermomètres T_1 , T_2 , sont placés au voisinage l'un de l'autre; l'un T_1 est sec, l'autre T_2 a son réservoir enveloppé de mousseline constamment humectée par l'eau venant d'un réservoir R. Le thermomètre T_2 marque dans ces conditions une température inférieure à celle de T_1 ; la différence est d'autant plus grande que l'air est moins près de son [point de saturation, car la vitesse d'évaporation est plus grande¹.

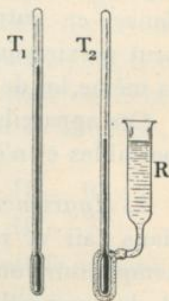


Fig. 83.

Si t et t' sont les températures indiquées, F' la tension correspondant à t' , f la tension cherchée, H la pression barométrique, on admet la relation :

$$t - t' = A \frac{(F' - f)}{H},$$

1. On verra en étudiant les chaleurs de vaporisation la raison de ce refroidissement.

qu'on pourrait démontrer en écrivant que la chaleur rayonnée est égale à la chaleur de vaporisation de l'eau.

On déduit de cette expression :

$$f = F' - \frac{H(t - t')}{A}.$$

Il faut donc, une fois l'appareil préparé, déterminer A ; pour cela on opère d'abord dans un air où l'on a déterminé e avec un hygromètre. On connaît donc f ; on lit t , t' , H et on en déduit F' ; on peut alors tirer A de la formule.

A étant connu, l'appareil est capable de donner les indications dans un air quelconque.

L'inconvénient de cet appareil est que A n'est pas absolument constant : il varie avec la position de l'appareil, la vitesse du vent, etc. ; les observations ne peuvent donc pas, avec cet appareil, être très rigoureuses.

CHAPITRE IV

Calorimétrie.

§ I. — DÉFINITIONS.

1. *Calorimétrie.* — Dans tous les phénomènes précédemment étudiés, il y a des dégagements ou des absorptions de chaleur. La calorimétrie se propose la mesure de ces quantités de chaleur qui provoquent les variations de température ou les changements d'état. On se sert pour cela d'appareils appelés calorimètres.

2. *Calorie.* — Pour mesurer les quantités de chaleur, il faut une unité ; on prend comme unité la quantité de chaleur nécessaire pour amener de 0° à 1° soit 1 kilogramme d'eau pure, ce qui constitue la grande Calorie, soit 1 gramme d'eau, ce qui constitue la petite Calorie.

On a donc deux unités, la grande Calorie étant mille fois plus grande que la petite.

3. *Chaleurs spécifiques.* — On constate que si 1 kilogramme d'eau exige par définition une grande calorie pour passer de 0° à 1° , d'autres corps, de masse égale à 1 kilogramme, exigeront plus ou moins. On définit cette particularité par une caractéristique des corps : la chaleur spécifique ou chaleur nécessaire pour élever de 0° à 1° l'unité de poids du corps (gramme ou kilogramme).

4. — Les méthodes calorimétriques reposent sur des principes que l'on suppose exacts. On suppose d'abord que la quantité de chaleur nécessaire pour élever l'unité de poids d'un corps de t° à $t + 1^{\circ}$ est toujours la même quel que soit t (chaleur spécifique constante). En admettant cette hypothèse, on a les principes suivants :

La quantité de chaleur Q nécessaire pour élever un corps de t à t' est proportionnelle : 1° à son poids ; 2° à la différence $t' - t$.

Quand on mélange deux poids égaux d'une substance, à des températures différentes, la température du mélange est égale à la moyenne des températures.

§ II. — CALORIMÈTRES.

1. *Calorimètre à eau.* — C'est l'appareil le plus employé aujourd'hui ; supposons qu'il s'agisse de déterminer la chaleur spécifique d'un corps ; on le pèse, puis on le porte à une température connue, 100° par exemple en le maintenant dans un courant de vapeur d'eau.

On le plonge alors dans une masse connue d'eau froide, de température déterminée. Il se fait un échange de chaleur : le corps perd de la chaleur qui chauffe l'eau froide ; celle-ci prend, au bout d'un certain temps, une température moyenne qui est aussi celle du corps refroidi ; on la mesure avec le thermomètre ; on déduit de ces données et observations la chaleur spécifique cherchée.

En effet, soit P le poids du corps, T la température à laquelle il a été chauffé ; p le poids d'eau froide, t sa température initiale ; le vase dans lequel est contenue l'eau était aussi à température t au début de l'expérience ; soit p' son poids, c' sa chaleur spécifique.

La température finale étant θ , le corps a perdu une quantité de chaleur $Pc(T - \theta)$; l'eau a gagné $p(\theta - t)$, sa chaleur spécifique étant égale à l'unité.

Le vase a gagné $p'c'(\theta - t)$. Comme il n'y a pas eu d'échanges avec l'extérieur :

$$Pc(T - \theta) = p(\theta - t) + p'c'(\theta - t).$$

$$\text{D'où on déduit : } c = \frac{(p + p'c')(\theta - t)}{P(T - \theta)}.$$

Si c' n'était pas connu, on devrait commencer par le

déterminer, par exemple en ajoutant une masse d'eau (chaleur spécifique = 1) à température connue.

L'appareil est représenté sur la figure 84 ; un vase intérieur en métal (platine) très peu épais contient l'eau dans laquelle se feront les mélanges ; le vase repose sur des pointes de liège et est placé au centre d'un vase B dont l'intérieur est poli pour réfléchir la chaleur rayonnée par A ; il est entouré par un récipient à double enveloppe plein d'eau et garni extérieurement de matière isolante, pour éviter les déperditions de chaleur.

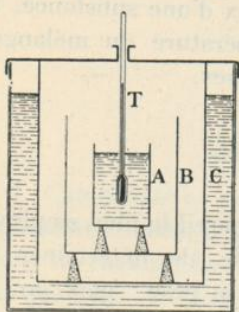


Fig. 84.

Le couvercle s'oppose au rayonnement et à l'évaporation ; un thermomètre plonge dans le calorimètre et permet la lecture des températures.

2. *Calorimètre à glace.* — Black avait inventé une méthode très simple dite du puits de glace ; dans un bloc de glace A, on creuse un trou P que l'on dessèche soigneusement. Au-dessus, on ferme par une plaque de glace B.

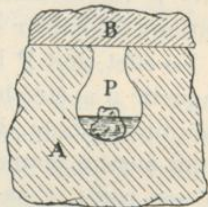


Fig. 85.

Si on introduit un corps chaud dans la glace, on fait fondre celle-ci ; on verra plus loin que la chaleur de fusion de la glace (ou chaleur nécessaire pour fondre 1 gramme de glace) est 80 calories (petites) environ.

Si donc on trouve p grammes d'eau, le corps a dégagé 80 p calories. Sa température initiale était T , finale 0 ; si c est sa chaleur spécifique, il a perdu PcT .

$$PcT = 80p, \text{ d'où l'on déduit } c.$$

Cette méthode, qui a donné l'idée de plusieurs appareils analogues (Laplace et Lavoisier-Bunsen), est moins précise

que celle du calorimètre à mélange, actuellement seul couramment employé.

§ III. — CHALEURS SPÉCIFIQUES.

1. *Solides.* — Les chaleurs spécifiques étudiées par les méthodes que l'on vient d'indiquer sont variables avec les substances ; mais toutes sont inférieures à celle de l'eau. On trouve par exemple :

Argent	0,0570	Glace	0,5040
Cuivre	0,0952	Platine	0,3240
Fer	0,1138	Or	0,0324

2. *Liquides.* — Leurs chaleurs spécifiques sont également inférieures en général à celle de l'eau ; la chaleur spécifique d'un corps à l'état liquide est plus grande qu'à l'état solide. Ainsi l'eau a 1 pour chaleur spécifique par définition, la glace 0,504.

3. *Variations avec les températures.* — Contrairement à ce qu'on a supposé, la chaleur spécifique des corps n'est pas constante ; elle varie avec la température ; mais pour les solides, cette variation est insignifiante entre 0 et 100° ; pour les liquides les variations sont plus importantes, sauf pour l'eau dont la chaleur spécifique est à peu près constante.

4. *Gaz.* — On définit la chaleur spécifique des gaz comme celle des solides et des liquides en la comparant à celle de l'eau. Mais il y a deux cas à considérer pour les gaz : car, lorsqu'on chauffe un solide, son volume varie très peu ; il n'en est pas de même des gaz : ceux-ci peuvent être renfermés dans un volume invariable et l'on détermine le coefficient à volume constant c ; ou bien le gaz est maintenu toujours à la même pression et l'on détermine son coefficient à pression constante C^1 .

1. Le rapport $\frac{C}{c}$ est à peu près le même pour tous les gaz et égal à 1,41

Ce dernier est seul susceptible de détermination expérimentale ; on a, d'autre part, calculé le rapport $\frac{C}{c}$; par suite, connaissant C , on peut déduire c .

Regnault a effectué la détermination de C en faisant circuler un courant de gaz à une température donnée dans un serpentín placé dans le calorimètre. Cette expérience offre d'ailleurs beaucoup de difficultés et exige des corrections, en raison de la durée de l'expérience et du refroidissement par rayonnement.

La détermination a été faite sous la pression de 1 atmosphère environ entre 0° et 200° . Toutes les chaleurs spécifiques ont été trouvées inférieures à 1, sauf l'hydrogène ($C = 3$) ; celle de l'air est 0,237 ; la plus faible, celle du chlore, est 0,121.

En outre, on observe que, pour les gaz éloignés de leur point de liquéfaction, cette chaleur spécifique est indépendante de la pression et de la température.

En somme, pour les gaz qui suivent la loi de Mariotte, le coefficient C est constant pour chaque gaz, quelles que soient la pression constante à laquelle on opère et les différences de température.

§ IV. — CHALEURS DE FUSION ET DE VAPORISATION.

1. *Fusion.* — On a constaté qu'un corps en fondant absorbe de la chaleur et inversement qu'il en dégage en se solidifiant ; ces quantités de chaleur sont égales, donc la chaleur de fusion est égale à celle de solidification.

L'étude de ces chaleurs peut être faite au calorimètre et alors c'est la chaleur de fusion qu'on détermine directement.

Black avait trouvé que celle de la glace était 80 calories ; ce chiffre corrigé par des expériences précises a été ramené à 79 cal. 25. Ce nombre est un des plus considérables ; celui du zinc est 28, 13, de l'étain 14, 25, du soufre 9, 37.

On voit donc que, lorsqu'on chauffe un corps pour le fondre, du moment où il entre en fusion, (sa température reste constante) toute la chaleur dépensée sert à fournir la chaleur de fusion et à opérer le changement d'état.

2. *Vaporisation.* — Les liquides pour se vaporiser absorbent une quantité de chaleur considérable ; on définit la chaleur de vaporisation : le nombre de calories qu'absorbe 1 gramme de ce liquide pour se vaporiser, sans élévation de température (on l'évalue alors en petites calories).

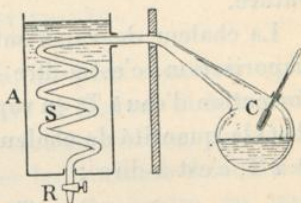


Fig. 86.

Inversement, quand la vapeur se transforme en liquide, elle restitue la même quantité de chaleur ; la chaleur de liquéfaction se définirait de même et on voit qu'elle est égale à la chaleur de vaporisation.

Pour déterminer la chaleur de liquéfaction, on amène la vapeur à se condenser dans un serpent placé dans le calorimètre ; on mesure l'élévation de température et le nombre de grammes condensés. La méthode générale du calorimètre nous donnera le résultat cherché.

3. *Chaleur de vaporisation de l'eau.* — Despretz avait effectué cette détermination de la façon indiquée figure 86 ; une cornue C munie d'un thermomètre sert à vaporiser l'eau, qui passe à l'état de vapeur dans le serpent S où elle se condense ; ce serpent est placé dans le vase d'un calorimètre A.

On pèse l'eau recueillie par le robinet R.

Despretz avait trouvé 540 calories à 100°. Regnault par des expériences plus précises ramena ce chiffre à 537.

Si on ajoute à ces 537 calories, les 100 calories nécessaires pour amener 1 gramme d'eau de 0° à 100°, 637 cal. représentent la *chaleur de vaporisation totale de l'eau à 0°*, c'est-à-dire la quantité de chaleur nécessaire pour amener l'eau de 0° à 100° et la vaporiser à cette température.

Regnault détermina la chaleur de vaporisation totale de l'eau pour différentes températures ; il donna une formule empirique générale :

$$Q = 606,5 + 0,305 T.$$

C'est-à-dire Q représente la quantité de chaleur nécessaire pour amener l'eau de 0° à T° et la vaporiser à cette température.

La chaleur de vaporisation à T° , ou *chaleur latente* de vaporisation, c'est-à-dire la chaleur nécessaire à la transformation d'eau à T° en vapeur à T° , s'obtient en retranchant de Q la quantité de chaleur nécessaire pour amener l'eau de 0 à T , c'est-à-dire :

$$\lambda = Q - T = 606,5 - 0,695 T.$$

Si on considère un poids de 1 gramme, λ et Q sont donnés en petites calories ; si c'est 1 kilogramme, λ et Q sont exprimés en grandes Calories.

CHAPITRE V

Thermodynamique.

§ I. — CHALEUR ET TRAVAIL.

Par de nombreuses expériences, on peut constater qu'il existe une certaine corrélation entre la chaleur et le travail mécanique ; ce dernier peut se transformer en chaleur : les frottements peuvent échauffer les surfaces frottantes ; une balle de plomb lancée violemment contre un mur s'écrase et l'élévation de température subséquente peut être assez forte pour en amener la fusion. Inversement, dans une machine à vapeur, nous brûlons du charbon, donc nous développons de la chaleur et nous recueillons de l'énergie mécanique.

Toute quantité de chaleur est donc susceptible d'une transformation au moins partielle en énergie mécanique ; et inversement tout travail peut être transformé en chaleur.

§ II. — ÉQUIVALENCE.

1. *Principe de l'équivalence.* — Mais il y a plus : il existe une relation numérique entre la quantité de travail et la quantité de chaleur produite par ce travail ; en outre, cette relation est toujours la même et ne dépend pas des machines ni des substances qui ont servi d'intermédiaires : il y a seulement la condition que ces machines se trouvent à la fin de la transformation dans le même état qu'au début, c'est-à-dire n'aient pas subi une modification qui eût pu absorber du travail.

Inversement, à chaque quantité de chaleur correspond une quantité de travail produit et la relation est la même

que dans le cas précédent ; il y a donc équivalence complète entre la chaleur et le travail, quels que soient l'ordre de la transformation, les états intermédiaires et les moyens employés pour effectuer cette transformation.

On nomme Équivalent mécanique de la chaleur, le travail (en kilogrammètres) qui correspond à l'unité de quantité de chaleur (grande Calorie) ; inversement, l'Équivalent calorifique du Travail sera le nombre de Calories correspondant à l'unité de travail (kilogrammètre).

2. Détermination de l'équivalent mécanique de la chaleur.

Expérience de Joule. — Joule faisait tourner un système de palettes P dans un calorimètre à eau A ; deux cordons enroulés dans le même sens sur un tambour T sont tirés par des poids QQ qui mettent l'ensemble en mouvement.

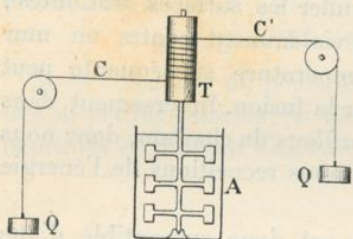


Fig. 87.

Si les poids tombent d'une hauteur H, le travail produit

est PH, P étant la somme des poids :

Dans le calorimètre, θ étant l'élévation de température, la quantité de chaleur produite est : $(m + m'c')\theta$, m étant le poids d'eau du calorimètre, m' le poids des accessoires, c' leur chaleur spécifique.

Donc $\frac{PH}{(m + m'c')\theta}$ représente l'équivalent mécanique de la calorie.

Il y a en outre à faire des corrections, car une partie du travail est absorbée par les frottements ; cette partie était calculée à part et défalquée du travail total.

Joule a fait un grand nombre d'expériences qui l'ont conduit à une moyenne de 425 kilogrammètres pour une grande Calorie.

3. Autres expériences. — On a fait également des expé-

riences sur l'élévation de température produite par un travail déterminé sur du plomb qu'on écrasait ; cette expérience est susceptible d'erreurs ; mais on est arrivé cependant à une valeur voisine de 425 kilogrammètres.

D'autres expériences précises ont conduit à l'adoption du nombre 426 comme équivalent mécanique de la chaleur.

Une grande Calorie équivaut à 426 kilogrammètres.

Inversement $\frac{1}{426}$ est l'équivalent calorifique du kilogrammètre.

§ III. — PRINCIPE DE CARNOT.

Dans la nature nous trouvons des substances capables de nous fournir l'énergie calorifique ; le charbon, par exemple, par sa combustion, dégage de la chaleur.

On utilisera des machines, dites machines thermiques, pour effectuer la transformation de cette chaleur en travail qui suppléera à la force de l'homme, trop limitée.

Mais, pour une calorie dépensée, retrouverons-nous 426 kilogrammètres directement utilisables ? non, pour beaucoup de raisons. Nous aurons des pertes diverses : par exemple, dans une machine à vapeur, la chaudière rayonne de la chaleur qui est perdue dans l'atmosphère, la fumée en entraîne une autre partie ; donc la chaudière n'utilisera pas, pour donner de la vapeur, toute la chaleur qu'on lui donne.

D'un autre côté, dans la machine il y a des pertes par rayonnement et conductibilité, des frottements, des chocs.

A côté de ces causes diverses, et dont on peut concevoir la disparition par les perfectionnements successifs de la machine, il y a une cause de perte qui est inhérente à l'essence même de la machine thermique. C'est ce qu'exprime le principe de Carnot.

Dans les machines, on utilise un corps ou un système de corps qui parcourent un cycle fermé, c'est-à-dire qui

passent par une succession d'états dont le dernier est le même que le premier ; la quantité de chaleur transformée dans la machine est de 1 calorie par 426 kilogrammètres produits.

Mais cette transformation ne peut se faire sans une chute de chaleur. Sadi Carnot a énoncé le principe suivant :

Il ne peut y avoir production de travail par un moteur thermique sans transport de chaleur d'une source chaude sur une source froide.

Donc, la source chaude, dans le cas de la machine à vapeur ce sera la chaudière, fournira une quantité de chaleur Q_1 ; de cette quantité, une partie de Q_0 ira sur la source froide, en vertu du principe précédent ; une autre partie Q_2 sera transformée en travail ; on aura donc :

$$Q_1 = Q_0 + Q_2.$$

et le travail produit :

$$W = E Q_2,$$

E étant l'équivalent mécanique de la calorie.

Si on considère le rapport $\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_0}{Q_1}$ de la chaleur utilisée à la chaleur fournie par la source chaude, on a ce qu'on appelle le *Rendement du cycle* ou coefficient économique de la machine.

On ne pourra donc pas transformer complètement la chaleur Q_1 fournie à la machine ; mais il faudra réduire le plus possible la quantité Q_0 perdue.

Il y a une limite à cette réduction.

Carnot énonça un second principe à ce sujet : Dans une machine parfaite (où Q_0 sera minimum), le rendement est indépendant des agents mis en œuvre, il est fixé par la température des corps entre lesquels se fait en dernier résultat le transport du calorique.

On appelle en Thermodynamique température absolue, une échelle de températures déterminée analytiquement et qu'on peut définir ainsi :

La température absolue est égale à la température centigrade augmentée de 273 degrés.

Donc, la température absolue T d'un corps à température centigrade t est :

$$T = 273 + t.$$

Si, dans le cas qui nous occupe, la température de la source chaude est T_1 , celle de la source froide T_0 , d'après le second principe de Carnot, la machine parfaite, c'est-à-dire de rendement maximum, aura un rendement fonction de T_1 et T_0 .

Et on démontre que :

$$\frac{Q_1 - Q_0}{Q_1} = \frac{T_1 - T_0}{T_1} = 1 - \frac{T_0}{T_1},$$

dans le cas de la machine parfaite.

En résumé : Une machine thermique fonctionnant entre deux températures T_1 et T_0 , T_1 température absolue de la source chaude, T_0 de la source froide, exige pour son fonctionnement le passage d'une quantité de chaleur Q_0 de la source chaude sur la source froide, quantité qui ne sera pas transformée en travail.

Le rendement $\frac{Q_1 - Q_0}{Q_1}$ est au plus égal à $\frac{T_1 - T_0}{T_1}$.

§ IV. — APPLICATION AUX MACHINES.

1. *Machines à vapeur. Hautes pressions.* — On voit immédiatement, d'après l'expression du rendement $1 - \frac{T_0}{T_1}$, l'intérêt qu'il y a à refroidir le condenseur : T_0 est plus faible, et de la vapeur à plus haute pression, T_1 plus élevé. Aussi les machines à haute pression actuelles sont-elles plus économiques que celles à basse pression anciennes. De plus, la surchauffe de la vapeur (Cf. Cours de Machines) permet d'élever T_1 sans augmenter outre mesure les pressions.

Physique et chimie. — GILLE.

Prenons un exemple : une machine admet de la vapeur à 200° ; le condenseur est à 40° ; les températures absolues sont :

$$T_0 = 273 + 40 = 313.$$

$$T_1 = 273 + 200 = 473.$$

Le rendement est $\frac{160}{473} = 0,34$ pour la machine parfaite ; c'est le rendement qu'on ne pourra jamais atteindre quelque perfection que l'on puisse donner à la machine. (Les meilleures machines n'atteignent pas 0,1.)

2. *Détente.* — Accessoirement, on peut rattacher à ces théories l'utilité de la détente dans la machine. Supposons que l'on introduise de la vapeur à 6 kilogrammes et qu'il n'y ait pas de détente ; c'est-à-dire que la vapeur exerce sur le piston pendant toute sa course une pression de 6 kilogs. Par l'évacuation, la vapeur à 6 kilogs va directement au condenseur, emportant la chaleur correspondant à cette pression.

Si, au contraire, on admet pendant une fraction de la course seulement, et qu'on détende ensuite la vapeur, celle-ci diminue de pression, donc aussi de température et quand on évacuera au condenseur, de la vapeur moins chaude s'en ira, emportant donc moins de calories. On diminue la quantité de chaleur Q_0 envoyée de la source chaude sur la source froide.

LIVRE V

ACOUSTIQUE

CHAPITRE I

Nature et qualités du son.

§ I. — NATURE DU SON.

Un son est une impression perçue par l'oreille; l'ouïe ne nous fournit qu'une sensation et nous en reportons la cause aux objets, dits « corps sonores », capables d'émettre des sons.

Comment un objet émet-il un son et comment l'impression atteint-elle nos organes?

1. *Corps sonores.* — Un corps qui émet un son est un corps en vibration; c'est-à-dire qui effectue des mouvements rapides capables d'influencer et de mettre en mouvement le milieu environnant. On peut s'en convaincre de bien des manières: en mettant une bille dans un timbre qu'on fait sonner, on voit la bille sautiller; en munissant une branche d'un diapason D (fig. 88) d'une petite pointe *p* appuyant légèrement sur une plaque de verre enduite de noir de fumée, et en la faisant vibrer, on note sur la plaque les déplacements très rapides du style.

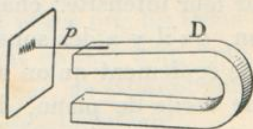


Fig. 88.

2. *Intermédiaire.* — L'intermédiaire entre notre oreille et le corps sonore est généralement l'air; l'air est mis en mouvement par les vibrations et transmet à notre oreille ce mouvement qui l'impressionne. Dans le vide, le son ne se

transmet pas; on a constaté, en faisant le vide dans un ballon en verre, qu'une clochette placée à l'intérieur ne donne plus de sons; si on laisse rentrer l'air, le son devient de plus en plus distinct à mesure que l'air devient plus dense.

§ II. — QUALITÉS DU SON.

Tous les sons ne se ressemblent pas; il y a les bruits les plus divers, dus à des chocs d'objets, à la voix, etc., et les sons dus à des instruments de musique. C'est de ceux-ci que nous parlerons désormais, car ils sont plus faciles à analyser et à obtenir toujours identiques.

1. *Intensité.* — Un son est plus ou moins intense et, si on enregistre les déplacements vibratoires du corps sonore, on constate que plus ils sont considérables, plus le son est fort. Donc, l'intensité du son dépend de l'amplitude du mouvement qui lui donne naissance: avec le même objet, le même instrument, on peut produire des sons intenses ou des sons faibles.

2. *Hauteur du son.* — Les sons diffèrent autrement que par leur intensité; chacun sait, sans en approfondir la raison, qu'il y a des sons aigus et des sons graves; on constate également qu'un même appareil, tel qu'une cloche ou une corde de piano, donne des sons qui, tout en pouvant varier d'intensité, ne changent pas comme hauteur: ils sont toujours aigus ou toujours graves. D'où provient donc cette différence?

Pour en démontrer la cause, on se sert généralement de deux appareils classiques: la roue dentée de Savart et la sirène de Cagniard-Latour.

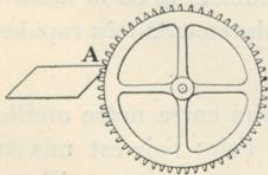


Fig. 89.

La roue de Savart (fig. 89) est une roue, munie d'un grand nombre de dents, que l'on fait tourner rapidement; contre les dents de cette roue on appuie en

A un carton léger ou une lame métallique mince. Si la

roue a N dents et fait n tours à la seconde, la carte est frappée Nn fois à la seconde.

On constate que le son devient plus aigu, monte d'autant plus que l'on augmente la vitesse de rotation et que, par suite, le nombre Nn devient plus grand.

Sirène de Cagniard-Latour. — Dans une caisse C (fig. 90) est amené de l'air par un tuyau aboutissant d'autre part à une soufflerie; cet air

peut passer dans un disque fixe F qui ferme la caisse par des trous.

Un disque mobile M peut tourner autour d'un axe vertical; ce

disque est percé de trous comme le disque

inférieur; mais les trous sont inclinés en sens inverse, de sorte que le jet d'air fait tourner le disque supérieur.

On envoie de l'air et on fait augmenter progressivement la vitesse de rotation; on entend un son qui monte lui aussi progressivement; le son est produit parce que les trous du disque inférieur étant alternativement en face d'un trou et d'une partie pleine du plateau supérieur, ne laissent échapper l'air que par jets interrompus périodiquement.

Un compteur de tours permet de savoir la vitesse de rotation du plateau et, comme on connaît le nombre de trous du disque mobile, on peut déduire de ces deux renseignements le nombre d'interruptions des jets à la seconde.

On voit donc que la hauteur du son dépend du nombre de vibrations à la seconde du corps sonore; une cloche, qui donne toujours le même son, donne toujours aussi le même nombre de vibrations.

Les sons les plus graves, perceptibles à l'oreille, sont de 16 vibrations à la seconde, les plus aigus de 36.000 vibrations; ces sons, graves ou aigus, qui sont à la limite

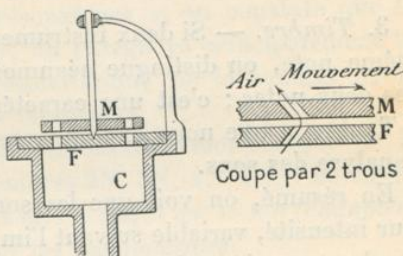


Fig. 90.

de perception de notre oreille, sont d'ailleurs fort pénibles à entendre.

La hauteur des sons est utilisée en musique où les notes diffèrent par des intervalles réguliers ; une note est caractérisée par le nombre de vibrations à la seconde. Les diapasons servant à accorder les instruments donnent, quand on les fait vibrer, le « *la* normal » ou « *la*, » qui est caractérisé par le nombre de 435 vibrations à la seconde.

3. *Timbre*. — Si deux instruments différents donnent la même note, on distingue néanmoins une différence entre ces deux notes ; c'est une caractéristique particulière dite « *Timbre* » que nous expliquerons au paragraphe III par l'analyse des sons.

En résumé, on voit que les sons sont caractérisés par leur intensité, variable suivant l'importance des vibrations, leur hauteur, dépendant du nombre des vibrations et qui est toujours la même pour un instrument tel qu'une cloche, une corde de piano, un diapason ; enfin par le timbre, caractéristique due à la nature de l'instrument producteur du son.

§ III. — ANALYSE DU SON. RÉSONANCE.

Quand un son se produit, par exemple par la vibration d'un diapason, un second diapason donnant la même note (même hauteur de son) se met à vibrer par suite de l'influence de l'ébranlement de l'air qui provoque son mouvement. Mais il faut, pour que cela se produise, que les deux instruments donnent la même note ; s'il en est autrement, le phénomène ne se produit pas. (A condition que les notes ne soient pas des harmoniques l'une de l'autre.)

On peut, au lieu d'un diapason, mettre à côté du premier des sphères creuses ; suivant leurs dimensions, l'air qui y est contenu vibrera quand on produira une note plus ou moins aiguë, les petites sphères vibrant aux notes les plus aiguës.

Si donc, au lieu d'un seul son, caractérisé par un nombre déterminé de vibrations, il s'en produit plusieurs, on constate que plusieurs sphères se mettent à vibrer ; on constate ainsi que le son produit était composé de vibrations de rapidités différentes ; ce système permet donc d'analyser des sons complexes.

Si on utilise cette méthode pour analyser les notes produites par divers instruments de musique, au moyen de ces sphères appelées « résonateurs », on constate que la note n'est jamais simple ; on enregistre principalement le nombre de vibrations caractéristique de la hauteur de la note, mais aussi d'autres vibrations.

Si N est le nombre de vibrations caractéristique de la note, on enregistre les nombres $2N$, $3N$, $4N$, $5N$,... de vibrations à la seconde : on dit que le son N est le *son fondamental*, $2N$, $3N$, etc., en sont les *harmoniques*.

On observe par cette méthode que le timbre des sons est dû aux harmoniques différents qui accompagnent le son fondamental ; ainsi la flûte donne des notes très pures, très peu chargées d'harmoniques, qui se réduisent donc à peu près au son fondamental ; les cordes vibrantes (violon, piano...) en donnent un assez grand nombre, ce qui les affecte d'un timbre différent.

Ce phénomène, que l'on vient d'étudier, de la vibration d'un corps par suite de la vibration au voisinage d'un corps donnant la même note s'appelle *Résonance* ; il est fort important ; et l'on trouve des exemples analogues dans beaucoup d'autres cas que dans l'Acoustique.

CHAPITRE II

Vitesse du son.

§ I. — VITESSE DU SON DANS L'AIR.

Le son se propage dans l'air avec une vitesse qui fut mesurée pour la première fois en 1738, et contrôlée souvent depuis : on constata qu'elle ne dépend que de la température et de la vitesse du vent ; ni l'humidité, ni la pression barométrique n'influent d'une manière sensible ; ni la hauteur, ni l'intensité, ni le timbre n'ont d'importance pour la vitesse de transmission : les sons aigus ou graves, faibles ou forts se transmettent avec la même vitesse.

Mais elle dépend de la vitesse du vent ; si la propagation se fait en sens inverse du vent, il faut retrancher la vitesse de ce dernier ; si tous deux vont dans le même sens, leurs vitesses s'ajoutent.

On a trouvé comme vitesse du son dans l'air non agité, à 0 degré centigrade, 333 mètres par seconde ; et 340 mètres à 15 degrés. La vitesse croît donc avec la température.

§ II. — VITESSE DANS L'EAU.

La vitesse du son fut mesurée par Colladon et Sturm sur le lac de Genève en 1827 ; ils trouvèrent 1.435 mètres à la température de 8° ; donc la vitesse est 4 fois $\frac{1}{2}$ plus grande que dans l'air.

Dans l'eau de mer elle est un peu plus grande : 1457 mètres à la seconde.

§ III. — VITESSE DANS LES SOLIDES.

Elle est encore plus considérable ; Biot l'avait trouvée

égale à 10 fois $1/2$ la vitesse dans l'air pour des tuyaux de fonte ; pour le fer et l'acier, elle est d'environ 15 fois celle dans l'air. On a donc des vitesses de 3.500 à 5.000 mètres à la seconde.

On remarque que plus la densité augmente, plus la vitesse s'accroît ; ainsi la vitesse est plus grande dans l'eau que dans l'air, plus grande dans les solides que dans les liquides.

On peut constater aussi que l'air, en raison de son agitation perpétuelle, est un très mauvais transmetteur du son ; au contraire, l'eau, dont les courants sont toujours bien moins rapides que le vent, donne une transmission très nette et à grande distance. Les solides sont encore plus favorables ; dans les expériences de Biot, un coup frappé sur une extrémité d'une conduite en fonte de 900 mètres de longueur était perçu avec la plus grande netteté à l'autre extrémité. On aura l'occasion, dans le chapitre III, de signaler l'utilisation de ces propriétés.

CHAPITRE III

Appareils récepteurs et émetteurs de son.

§ I. — PORTE-VOIX.

Soit un centre O d'émission de son ; le mouvement vibratoire se répand tout autour et, à distance R , l'énergie est répartie sur toute la surface de la sphère ; si donc on dépense une énergie E , elle est répartie, à la distance R , sur une surface $4\pi R^2$ (en supposant encore qu'elle se transmette sans pertes) ; l'oreille placée à cette distance ne reçoit, si O est

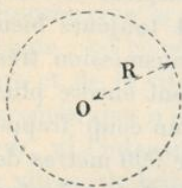


Fig. 91.

son ouverture, que $\frac{E \times O}{4\pi R^2}$.

Car, à distance R , l'énergie par unité de surface est $\frac{E}{4\pi R^2}$; plus R sera grand, et moindre sera l'impression ressentie.

Aussi, pour guider la voix à une certaine distance, on se sert d'un tube dit « Porte-voix » ; le tube cylindrique empêche l'énergie de se répartir sur une sphère et l'énergie se transmet de proche en proche, dans une section constante ; la transmission ainsi faite donne la même énergie par unité de surface en tous les points du tube, sauf bien entendu la diminution due aux pertes par frottements dans le tube et par chocs dans les coudes.

On emploie également des porte-voix progressifs, qui, allant en s'évasant légèrement, conduisent mieux la voix.

§ II. — CORNET ACOUSTIQUE.

C'est un appareil destiné à renforcer le son que l'on veut

écouter ; l'oreille étant en A, le pavillon B de surface d'ouverture S est tourné vers le centre d'émission du son. Si on en est à distance R, comme dans le cas du paragraphe I, l'énergie qui frappe

l'ouverture B est : $\frac{ES}{4\pi R^2}$; elle est cana-

lisée dans l'oreille jusqu'en A. Au contraire,

l'oreille seule n'eût reçu que l'énergie $\frac{EO}{4\pi R^2}$. L'intensité du

son est donc augmentée dans le rapport $\frac{S}{O}$. On voit par là l'utilité de ce cornet pour les oreilles affaiblies des sourds qui perçoivent difficilement les sons.

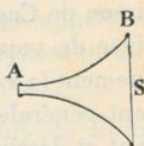


Fig. 92.

§ III. — APPAREILS PRODUCTEURS DE SON. SIFFLETS.

SIRÈNES. CORNES. CLOCHES AÉRIENNES.

En marine ces instruments ont une grosse importance pour signaler la présence d'un bâtiment, surtout par brume ; ils doivent permettre d'éviter les abordages ; de même les signaux sonores placés sur les côtes aux points où se trouvent des dangers en avertissent les bâtiments qui approchent.

Les sifflets sont formés par un appareil de dégagement de vapeur, portant une fente circulaire A ; par cette fente s'échappe la vapeur amenée de la chaudière par le tuyau V ; la vapeur dont le jet est brisé fait vibrer l'appareil et donne un son plus ou moins élevé. Une soupape S commandée de la passerelle permet de régler la durée et la fréquence des sons ; au-dessous, un robinet R (qui peut être reporté jusqu'à la chaufferie ou au tuyautage de vapeur) permet d'éviter les pertes et les condensations de vapeur quand on ne doit pas siffler.



Fig. 93.

D'autres sifflets sont formés par des fentes différentes ou des ouvertures, mais dont le but est toujours de briser le jet de vapeur.

Les sirènes sont généralement constituées, comme la sirène de Cagniard-Latour, par un disque tournant sur l'arrivée de vapeur; le disque en mouvement coupe périodiquement la vapeur, et, de ce fait, produit le son; les sirènes sont généralement munies d'un pavillon allant en s'évasant et destiné à diriger le son surtout sur l'avant du bâtiment.

Sur les bâtiments qui n'ont pas de vapeur à leur disposition, on emploie des cornets que l'on souffle soit mécaniquement, soit simplement à la bouche; de même, des cloches frappées périodiquement peuvent remplir le même rôle.

Tous ces appareils sont malheureusement peu puissants et, malgré les prescriptions des Règlements qui en imposent l'emploi d'une manière bien nette, ils sont souvent insuffisants. Les cornets et les cloches ne portent guère à plus d'un mille, même dans de bonnes conditions atmosphériques.

En outre, toutes ces transmissions aériennes sont influencées par le vent et troublées par la pluie et la brume. Un banc de brume peut intercepter parfaitement le son; il peut produire aussi des réflexions telles que la direction apparente du son ne peut renseigner sur la position réelle du bâtiment qui fait usage des signaux de brume.

§ IV. — CLOCHES SOUS-MARINES.

L'adoption des signaux sous-marins résulte des remarques faites au sujet de la vitesse de transmission du son dans les liquides: la vitesse est très grande et la transmission très régulière. Cette transmission n'est influencée ni par le vent, ni par la brume; elle sera donc toujours très sûre.

Depuis 1905 et 1906, des essais ont été faits sur des appareils réellement pratiques, en Allemagne, en Angleterre, aux États-Unis et au Canada; sitôt après, le déve-

loppement des installations s'est fait très rapidement ; la Compagnie qui exploite les brevets de ces appareils, Submarine Signal C^o, a effectué déjà de nombreuses installations.

Émetteurs. — Les cloches employées sont de forme spéciale, à lèvres épaisses, afin de donner des sons très nets ; elles ont 0^m36 d'ouverture, 0^m90 de hauteur et pèsent 64 kilogrammes. Ces cloches donnent un son caractérisé par 4.215 vibrations à la seconde.

Un marteau les frappe à intervalles réguliers ; ce marteau est mû par un mécanisme placé dans une enveloppe E qui soutient la cloche et la surmonte (fig. 94) ; l'ensemble est suspendu par une chaîne A qui laisse plonger l'appareil à 8 mètres de profondeur environ.

Deux tubes *t* et *t'* amènent l'air comprimé, quand c'est le mode employé pour sonner la cloche.

Les coups sont frappés d'une manière régulière ; par exemple, ils seront séparés par des intervalles de 2 secondes et répartis en séries de 5, séparées elles-mêmes par 6 secondes. On pourra reconnaître ainsi et identifier le bateau-feu qui porte la cloche, comme on reconnaît un phare par ses éclats.

La régularité et la distribution des coups sont donnés par un régulateur automatique dit « Code Ringer ».

L'appareil est mis généralement en mouvement par l'air comprimé (à 1 kg. 75 de pression) ; certains sont mus électriquement.

Certaines installations ont été faites sur des bouées ; la force nécessaire pour battre la cloche est empruntée aux vagues ; par suite, la fréquence des coups ne peut être réglée, on ne peut reconnaître la bouée par une sonnerie caractéristique. Un ressort règle la force des coups qui auront

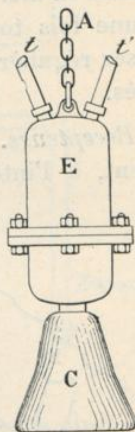


Fig. 94.

toujours ainsi la même intensité ; si donc on ne peut donner une sonnerie bien déterminée à la bouée, on pourra faciliter par des coups d'intensité constante la reconnaissance de la direction et de la distance de la cloche à l'observateur. Les cloches ainsi installées peuvent, avec les vagues très faibles (15 cm.), donner un coup toutes les 6 secondes ; quand la mer est grosse, elles sonnent jusqu'à la fréquence d'une fois toutes les 5 secondes ; la sonnerie est donc assez régulière et assurée par tous les temps, ou à peu près.

Récepteurs. — Les récepteurs sont installés dans le bâtiment, à l'intérieur ; sur deux membrures voisines MM'

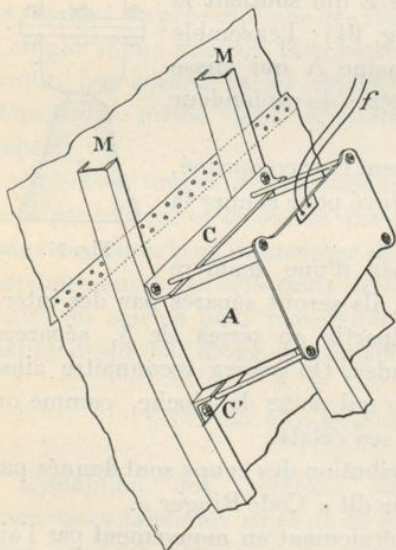


Fig. 95.

(fig. 95) sont fixées deux cornières cc' ; sur ces cornières prennent appui quatre barres qui maintiennent solidement contre le bord d'une caisse A.

Cette caisse est remplie d'eau de mer et dedans sont suspendus, complètement immergés, deux microphones (Cf. Électricité) d'un modèle spécial ; des fils f mettent ces microphones en relation avec des écouteurs placés dans la partie haute du bâtiment.

Il existe deux caisses identiques placées, l'une à bâbord et l'autre à tribord, à une certaine distance de l'avant du navire et assez loin de la flottaison ; elles ne doivent pas cependant être fixées dans les fonds ; elles sont en général aux environs du bouchain ou plutôt au-dessus.

Les fils portant des microphones M et M' (fig. 96) aboutissent à 2, 2', bornes d'un commutateur bipolaire qui permet de brancher le microphone bâbord ou le microphone tribord sur l'appareil écouteur : sur la figure, les traits pointillés montrent la communication avec bâbord. On trouve sur le circuit, une pile P et les deux écouteurs E et E' en quantité, un pour chaque oreille de l'observateur. C'est le schéma d'un téléphone ordinaire.

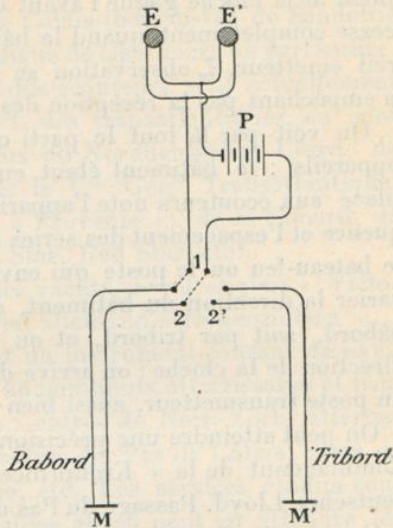


Fig. 96.

L'ensemble E, E', P, commutateur bipolaire, est placé dans le local d'où l'on veut faire les observations, par exemple dans le kiosque de navigation.

L'observateur ayant ces écouteurs aux oreilles, se met en relation par le commutateur avec le récepteur de bâbord ou de tribord par le seul jeu d'une manette. La manœuvre de l'appareil est donc très simple.

Fonctionnement. — On entend avec ces appareils un grand nombre de bruits divers, clapotement de l'eau sur la carène, bruit des hélices ; c'est pourquoi la position des caisses réceptrices doit être choisie à bonne distance de l'avant et de l'arrière, pour éviter d'entendre avec une trop grande intensité le bruit des hélices et celui de la vague formée par l'étrave.

Mais le son des cloches s'entend très nettement et très distinctement de tous les autres bruits qui forment plutôt un grésillement continu dans l'appareil. La perception est à son maximum de netteté quand la cloche se trouve

sur le travers du bâtiment ; le son diminue quand le relèvement de la cloche gagne l'avant ou l'arrière du bâtiment ; il cesse complètement quand le bâtiment a le cap sur l'appareil émetteur. L'observation se fait en marche, la vitesse n'empêchant pas la réception des signaux.

On voit par là tout le parti que l'on peut tirer de ces appareils : le bâtiment étant en marche, un observateur placé aux écouteurs note l'apparition du son et, par la fréquence et l'espacement des séries de coups, peut déterminer le bateau-feu ou le poste qui envoie le signal. En faisant varier la direction du bâtiment, on entend le son soit par bâbord, soit par tribord, et on peut ainsi déterminer la direction de la cloche ; on arrive donc à faire un relèvement du poste transmetteur, aussi bien qu'on relève un feu.

On peut atteindre une précision de 1 degré. (Rapport du Commandant de la « Kronprinzessin Cecilie » du Norddeutscher Lloyd. Passage du Pas de Calais, 23 mars 1908.)

Quant à la distance à laquelle on commence à entendre les cloches, elle varie évidemment avec la direction dans laquelle se présente le poste émetteur ; sauf le cas où on arriverait juste le cap sur la cloche, les sons sont perçus au moins à 5 ou 6 milles de distance. La meilleure observation a été recueillie par le « Kaiser Wilhelm II », le 5 mai 1908 ; le bâtiment marchant à 10 nœuds par brouillard épais dans une mer calme a entendu la cloche du bateau-feu français de Sandettié à 19 milles de distance ; le relèvement de la cloche était d'environ 75° sur l'avant du travers par tribord ; les sons à cette distance étaient très nets et permirent d'identifier sans ambiguïté le poste émetteur.

Applications. — Les États-Unis et le Canada ont actuellement un grand nombre de bateaux-feux et de bouées munis de cloches, sur la côte d'Atlantique ; l'installation doit être généralisée sur la côte d'Atlantique, celle du Pacifique et sur les Grands Lacs. L'Allemagne a pourvu de bateaux-feux la Mer du Nord et la Baltique ; la

Suède, la Belgique, la Hollande commencent à en garnir leurs côtes. En France et en Angleterre, des installations ont été faites sur le Pas de Calais (bateau-feu de Sandettié près Dunkerque) et sur la digue de Cherbourg en particulier.

Les navires ayant reçu des écouteurs sont actuellement très nombreux ; la plupart des transatlantiques en sont munis ; en particulier ceux du Norddeutscher Lloyd, de la Hamburg Amerika, de la C^{ie} Gén^{le} Transatlantique, (« Savoie », « Lorraine », « Provence »), de la Cunard, de l'American, Allan, White Star, Red Star, etc.

On peut citer en outre les yachts, royal anglais « Victoria and Albert » et impérial allemand « Hohenzollern ».

C'est donc actuellement un instrument courant de navigation qui est utilisé pour de nombreux atterrissages et passages difficiles par brume : entrée de New-York, atterrissage de Dungeness et passage du Pas de Calais, côtes de Hollande, entrée de l'Elbe, etc. Les services rendus sont actuellement très appréciables et on peut en attendre les meilleurs résultats pour la facilité et la sécurité de la navigation.

Cloches de collision. — Une autre application a été envisagée, sans avoir été jusqu'ici en usage courant ; si un bâtiment possède une cloche, il pourra avec elle, mieux qu'avec un sifflet ou une sirène, signaler sa présence et éviter un abordage ; un modèle spécial a été étudié dans ce but par la Submarine Signal C^o. Une cloche est plongée dans un coqueron à l'avant du navire et ce compartiment est rempli d'eau ; la cloche peut ainsi émettre des sons et devenir un moyen de communication facile et sûr. Il pourrait, par brume, indiquer exactement la position du bateau muni de la cloche avec plus de certitude que les sifflets qui s'entendent à peu de distance et surtout ne donnent aucune indication précise sur la direction.

LIVRE VI

OPTIQUE

CHAPITRE I

Propagation de la lumière.

§ I. — DÉFINITIONS.

1. *Lumière*. — La lumière est la cause des phénomènes qui affectent chez nous le sens de la vue ; nous percevons les phénomènes produits au moyen de nos yeux.

2. *Corps lumineux*. — Les corps lumineux sont ceux qui émettent de la lumière : le soleil, les corps qui brûlent ou sont incandescents, par exemple ; comme ils émettent de la lumière qui affecte le sens de la vue, ils sont perceptibles à notre œil. Mais ils ne sont pas les seuls à jouir de cette propriété : les corps éclairés reçoivent la lumière d'une source quelconque et la renvoient ; c'est le cas de la plupart des corps naturels.

3. *Corps opaques. Corps transparents*. — Les corps opaques ne se laissent pas traverser par la lumière ; le bois, les métaux sous une certaine épaisseur ne se laissent pas traverser par la lumière. En général, si on réduit tous les corps à une épaisseur suffisamment faible, ils sont transparents, ils laissent passer la lumière.

4. *Milieu homogène*. — Un milieu homogène est un espace dont toutes les parties présentent la même composition et jouissent des mêmes propriétés.

§ II. — PROPAGATION RECTILIGNE.

1. — La lumière, dans un milieu homogène, se propage en ligne droite.

Si donc, entre un objet lumineux et l'œil, on interpose un corps opaque, la lumière est interceptée.

On appelle rayon lumineux, la direction rectiligne suivant laquelle se propage la lumière; un ensemble de rayons, constituant une sorte de cylindre lumineux ou de cône, prend le nom de faisceau. Dans le cas d'une source très éloignée les rayons sont sensiblement parallèles (soleil), le faisceau est un cylindre, la lumière est dite en faisceau parallèle. Si la source lumineuse est rapprochée, le faisceau est un cône émanant du point lumineux; la lumière est en faisceau divergent.

On verra qu'avec des appareils d'optique on peut faire converger les rayons sur un point, la lumière est dite alors en faisceau convergent.

2. *Ombres.* — Soit un point lumineux S et un corps opaque A ; si on mène un cône de sommet S tangent au corps A , ce cône détermine en arrière du corps, la zone non éclairée par la source S , puisque le corps opaque arrête les rayons lumineux. Ce cône, par son intersection avec un plan P , donne l'ombre portée par le corps A (fig. 97).

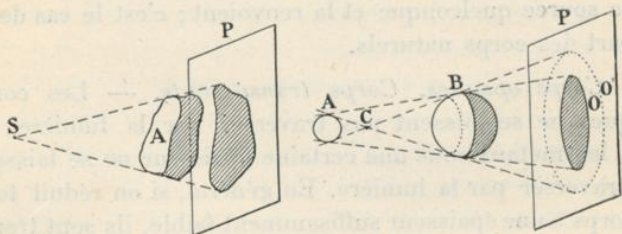


Fig. 97 et 98.

Supposons au lieu d'un point lumineux une sphère lumineuse A et une sphère opaque B ; il existe deux cônes de révolution tangents à chaque sphère (fig. 98).

Le cône qui contient les deux sphères du même côté de son sommet, c'est-à-dire le cône le moins ouvert, détermine la région où le corps A est complètement masqué par le

corps opaque B. Par intersection avec un plan P, il détermine un cercle o d'ombre ; on ne peut de l'intérieur de ce cercle o voir aucun point du corps éclairant.

Le cône de sommet c détermine, par son intersection avec P, un cercle o' ; la région comprise entre o et o' est dite la pénombre ; c'est une région où l'ombre diminue en allant de o vers o' et en tout point de cet espace annulaire oo' , on peut voir une partie du corps lumineux A.

Les cercles de contact des cônes sur le corps opaque B déterminent les régions d'ombre propre, d'où l'on ne peut voir qu'en partie ou pas du tout le corps éclairant.

3. *Application à la chambre noire.* — Si, dans une paroi d'une boîte fermée, on perce un petit trou A, il se formera sur la paroi opposée à A des images des corps lumineux. Une bougie B, par exemple, envoie de petits cônes de lumière émanant des différents points et ces cônes, par intersection avec le fond de la boîte, donnent de petites taches lumineuses dont l'ensemble constitue une image de B.

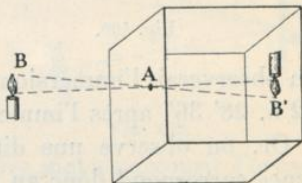


Fig. 99.

On voit immédiatement sur la figure que B' est renversée ; en outre, plus le trou A est petit, plus les taches constitutives de l'image B' sont petites, et, par suite, plus l'image est nette.

La chambre noire ainsi constituée a été le premier appareil de photographie ; on verra comment avec des lentilles on peut obtenir des images plus nettes et surtout plus lumineuses.

§ III. — VITESSE DE LA LUMIÈRE.

La lumière se propage avec une vitesse telle qu'à la surface de la terre il n'y a pas d'intervalle appréciable entre le moment où un phénomène lumineux se produit et celui

où l'œil le perçoit. Mais cette vitesse est quand même appréciable et a été mesurée plusieurs fois.

1. *Méthode de Rømer*. — Le premier satellite de Jupiter disparaît dans l'ombre de ce dernier à des intervalles égaux à 42 h. 28' 36".

Supposons que le phénomène s'observe quand la terre est en T_1 , Jupiter en J_1 ; quand la terre sera en T_2 , Jupiter en J_2 , on observera à nouveau une immersion; pendant le temps que la Terre met à aller de T_1 à T_2 , il s'est produit n immersions.

Si la propagation de la lumière était instantanée, on observerait l'immersion en T_2 , un temps égal à n fois 42 h. 28' 36" après l'immersion observée en T_1 .

Or, on observe une différence de temps; cette différence correspond donc au temps que la lumière met à parcourir $T_1 T_2$ diamètre de l'orbite terrestre.

Rømer trouva un nombre qui, corrigé postérieurement par Delambre, donna 310.000 kilomètres. En reprenant ces calculs au moyen des données astronomiques plus précises qu'on possède aujourd'hui, on trouve 299.000 kilomètres à la seconde.

2. *Méthode de Fizeau (1839)*. — Fizeau mesurait la vitesse de la lumière en cherchant le temps qu'elle mettait à parcourir deux fois la distance Montmartre-Suresnes.

Une roue dentée R tourne suffisamment vite et un rayon lumineux passe en A ; si la roue était immobile, un miroir, placé à une certaine distance normalement à la direction du rayon, renverrait le rayon lumineux exactement en A et celui-ci retraverserait la roue. Mais si pendant la durée du trajet la roue a tourné d'une dent, il se

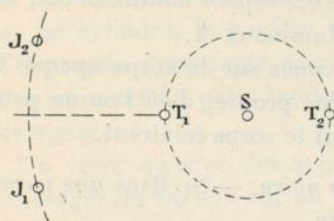


Fig. 100.

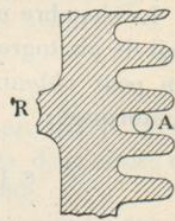


Fig. 101.

présente un plein au retour et on ne voit plus le faisceau lumineux.

Connaissant la vitesse de la roue et l'écartement des dents, on déduit la vitesse de la lumière. Fizeau avait trouvé 315.000 kilomètres.

M. Cornu en répétant ces expériences (1873-1875) trouva 298.400 kilomètres et 300.400 kilomètres dans deux séries d'expériences.

3. *Méthode de Foucault* (1850-1862). — Une source lumineuse S envoie la lumière sur un miroir mobile M ; M réfléchit la lumière sur un miroir fixe F qui la renvoie sur M ; si M était immobile, le rayon lumineux reviendrait en S.

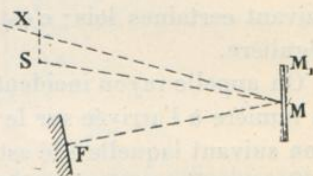


Fig. 102.

Mais M tourne très vite (jusqu'à 800 tours à la seconde).

Pendant le temps que la lumière met à parcourir l'espace $2 \times FM$, le miroir qui était en M s'est déplacé et est venu en M_1 ; le rayon réfléchi, au lieu de revenir suivant MS, revient sur MX.

On observe la distance SX et, du nombre de tours du miroir M, on déduit la vitesse de la lumière.

Foucault avait trouvé par cette méthode 298.000 kilomètres. Il s'ensuit de ces diverses expériences qu'on peut admettre le chiffre 300.000 kilomètres en moyenne comme vitesse de la lumière.

Foucault, en interposant un tube plein d'eau entre F et M, put calculer également la vitesse de la lumière dans l'eau.

Il constata que la vitesse de la lumière est plus faible dans l'eau que dans l'air.

CHAPITRE II

Réflexion de la lumière.

§ I. — DÉFINITIONS ET LOIS DE LA RÉFLEXION.

1. *Réflexion régulière.* — Quand un rayon lumineux rencontre une surface polie, il change de direction, en suivant certaines lois; c'est le phénomène de la réflexion régulière.

On appelle rayon incident la direction rectiligne que suit la lumière à l'arrivée sur le miroir, rayon réfléchi la direction suivant laquelle elle est renvoyée.

On appelle angle d'incidence et de réflexion, les angles que font ces directions avec la normale à la surface réfléchissante au point d'incidence.

Les lois de la réflexion sont les suivantes:

1^{re} Loi. — Le rayon incident et le rayon réfléchi sont dans un même plan normal à la surface réfléchissante; ce plan contient donc la normale au point d'incidence.

2^e Loi. — Les angles d'incidence et de réflexion sont égaux.

2. *Réflexion irrégulière ou diffusion.* — Quand la lumière tombe sur un corps dont la surface est imparfaitement polie, elle est renvoyée dans toutes les directions et constitue la lumière irrégulièrement réfléchie ou diffusée.

§ II. — MIROIRS PLANS.

1. *Point lumineux.* — Soit une surface réfléchissante parfaitement plane MN; un point lumineux A envoie des rayons AC, AC' réfléchis en CD, C'D suivant les lois de la

réflexion que l'on a indiquées. Par conséquent, on a l'égalité des angles : $\widehat{ACN} = \widehat{NCD}$.

Prolongeons DC jusqu'en A' à sa rencontre avec AO perpendiculaire au miroir ; les angles $\widehat{ACN}$, $\widehat{NCD}$ étant égaux, il en résulte l'égalité des angles $\widehat{ACO}$, $\widehat{OCA'}$ et les 2 triangles rectangles AOC, AOC', ayant un côté OC commun et les angles aigus en C égaux, sont égaux ; on en déduit l'égalité des côtés AO, A'O.

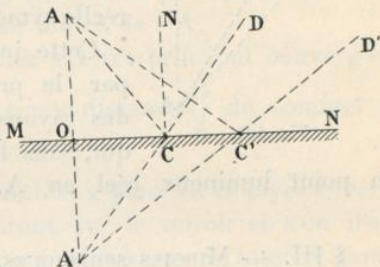


Fig. 103.

Donc un rayon réfléchi CD, quelconque, semble venir de la direction AC' symétrique de AC par rapport à la surface réfléchissante MN ; un autre rayon C'D' y passera aussi. Ce point A' semble donc être le centre du cône de lumière divergente formé par les rayons réfléchis. L'œil placé dans la région DD' serait affecté par les rayons CD, C'D' comme si le point lumineux était placé en A'.

A' est l'image du point A, et, comme elle n'existe pas réellement dans l'espace, on l'appelle *image virtuelle*.

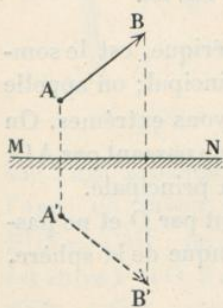


Fig. 104.

2. *Objet lumineux*. — Soit un objet lumineux AB placé devant un miroir-plan MN ; les différents points de cet objet donnent dans ce miroir des images virtuelles symétriques par rapport au plan MN.

L'ensemble de ces images virtuelles partielles constitue une image virtuelle totale de l'ensemble ; cette image est symétrique de l'objet.

3. *Images virtuelles et réelles*. — Les cas précédemment

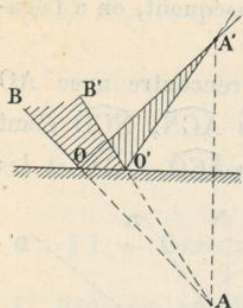


Fig. 105.

étudiées sont relatifs à la lumière en faisceau divergent ; s'il tombe un faisceau convergent sur un miroir plan, il convergera au point symétrique de celui où il aurait convergé.

On obtient donc ainsi une image réelle symétrique de l'image virtuelle.

Cette image virtuelle est formée par le prolongement hypothétique des rayons (fig. 105) tels que BA, qui, sans le miroir, auraient formé un point lumineux réel en A.

§ III. — MIROIRS SPHÉRIQUES. ÉTUDE GÉOMÉTRIQUE.

1. *Miroirs sphériques. Définition.* — Les miroirs sphériques sont constitués par une portion de sphère ou calotte sphérique ; le centre O de la sphère est le centre de courbure du miroir ; toute droite passant par ce point est normale à la surface, par suite, tout rayon passant par ce point se réfléchira sur lui-même.

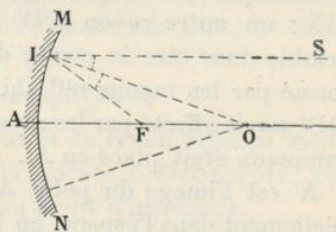


Fig. 106.

Le point A, sommet de la calotte sphérique, est le sommet du miroir ; la droite AO est l'axe principal ; on appelle ouverture du miroir l'angle $\widehat{MON}$ des rayons extrêmes. On nomme section principale une section plane passant par AO ; ainsi la figure 106 représente une section principale.

Un axe secondaire est une droite passant par O et ne passant pas par A ; donc un diamètre quelconque de la sphère, qui ne soit pas l'axe principal.

2. *Miroirs concaves. Foyer.* — Soit un miroir concave MN et un rayon lumineux SI parallèle à l'axe ; OI est la

mera en P son image; ces deux points jouissant de propriétés réciproques sont dits foyers conjugués.

Si au lieu d'être entre F et O, le point lumineux se trouvait en P_1 , entre A et F, son image serait virtuelle en P'_1 ; réciproquement le faisceau convergent de sommet P'_1 donnera une image réelle en P.

On voit immédiatement la disposition des rayons en les comparant au chemin suivi par un rayon parallèle à l'axe principal : S, I, F.

P_1 et P'_1 sont encore conjugués, mais l'un d'eux est virtuel; donc quand un des foyers conjugués dans un miroir concave est situé entre le foyer et le sommet, l'autre est virtuel.

4. *Point lumineux situé sur un axe secondaire.* — Soit un point P situé sur l'axe secondaire OA'. Il donne dans le miroir une image située sur OA' en un point P' qu'on peut déterminer facilement.

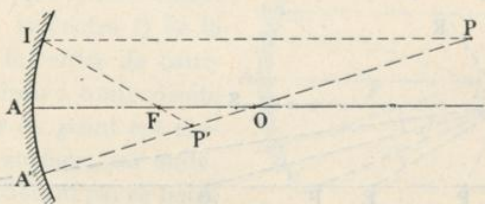


Fig. 108.

En effet, le rayon PI parallèle à l'axe principal, après réflexion, passe en F; donc par son intersection avec OA' donne P' foyer conjugué de P.

Ce foyer sera réel ou virtuel suivant la position de P, par rapport au plan perpendiculaire à l'axe et passant par F.

On voit que dans tous les cas on pourra obtenir une image réelle ou virtuelle qui sera située sur le même axe, principal ou secondaire que le point lumineux.

5. *Image d'un objet.* — Soit un objet lumineux PQ; il donnera une image dont nous pourrions déterminer la posi-

tion facilement au moyen du point situé sur un axe secondaire.

En effet, P donne une image P' , que nous déterminons

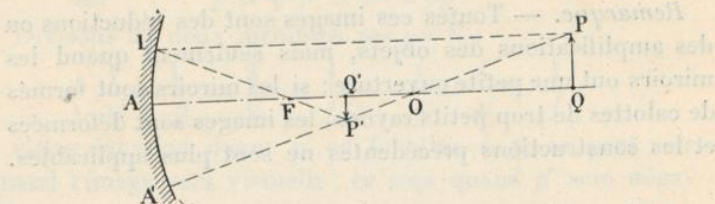


Fig. 109.

par ces deux conditions : P' est sur OP prolongé ; en outre, le rayon PI parallèle à l'axe principal passe par F . Donc l'intersection de ces deux droites donne P' .

Q' est l'image de Q et $P'Q'$ l'image de PQ ; on voit que dans cette position de PQ elle est renversée et plus petite que PQ . Réciproquement, si $P'Q'$ est l'objet lumineux, l'image sera PQ , réelle renversée et plus grande que $P'Q'$.

En faisant la construction pour un objet situé entre A et F , on trouverait une image droite virtuelle et plus grande que l'objet.

6. *Miroirs convexes.* — La théorie est identiquement la même ; on obtient un foyer principal virtuel en F au milieu de OA ; un point Q lumineux sur l'axe donne une image virtuelle en Q' .

Un objet lumineux PQ donne, au moyen de la construction de P' sur l'axe secondaire PO , le point P' . $P'Q'$ image d'un objet lumineux PQ réel est toujours virtuelle et plus petite que l'objet.

On ne pourra donc obtenir d'image réelle avec un miroir

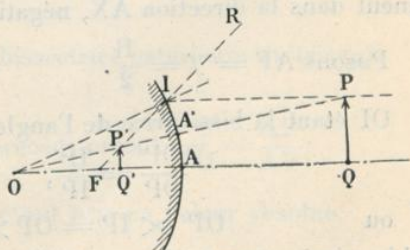


Fig. 110.

convexe qu'au moyen d'un faisceau convergent, par exemple le faisceau convergent en Q' donnera une image réelle Q .

Remarque. — Toutes ces images sont des réductions ou des amplifications des objets, mais seulement quand les miroirs ont une petite ouverture ; si les miroirs sont formés de calottes de trop petits rayons, les images sont déformées et les constructions précédentes ne sont plus applicables.

§ IV. — FORMULES DES MIROIRS DE PETITE OUVERTURE.

1. *Miroirs concaves de petite ouverture. Équation aux foyers conjugués.* — Soit P le point lumineux, P' son image ; on sait que $\widehat{PIO} = \widehat{OIP'}$.

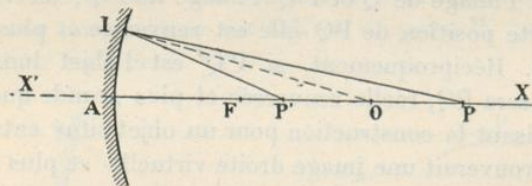


Fig. 111.

Appelons p, p' les distances AP', AP comptées positivement dans la direction AX , négativement suivant AX' .

$$\text{Posons } AF = f = \frac{R}{2}.$$

OI étant la bissectrice de l'angle $\widehat{P'OP}$, on a la relation :

$$\frac{OP'}{OP} = \frac{IP'}{IP},$$

$$\text{ou} \quad OP' \times IP = OP \times IP';$$

si le miroir a une faible ouverture, $P'I$ est égal sensiblement à $P'A$ et PI à PA .

On a donc :

$$OP' \times AP = OP \times AP';$$

remplaçons les lignes par leurs valeurs en fonction de p , p' , f , R :

$$(R - p') p = (p - R) p',$$

ou
$$p R + p' R = 2 p p'.$$

Divisons les deux membres par $p p' R$:

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{2}{R} = \frac{1}{f}, \quad \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}.$$

Cette équation donne p' en fonction de p ; on peut voir quand l'image sera virtuelle; ce sera quand p' sera négatif.

Or :
$$p' = \frac{p f}{p - f}.$$

p' sera négatif quand $p < f$, c'est-à-dire quand le point lumineux sera compris entre A et F ; ce qu'on avait déjà trouvé géométriquement.

2. *Miroirs convexes.* — La formule s'obtiendra de la

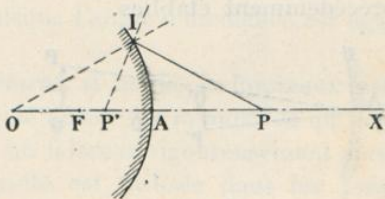


Fig. 112.

même manière. IO est la bissectrice extérieure du triangle $I P' P$; on aura donc :

$$\frac{P'O}{PO} = \frac{IP'}{IP}; \text{ comme précédemment } \frac{P'O}{PO} = \frac{AP'}{AP};$$

ou
$$\frac{R - p'}{R + p} = \frac{p'}{p}, \quad p, p' \text{ étant pris en valeur absolue.}$$

D'où : $p R - p p' = p' p + p' R; \quad p R - p' R = 2 p p';$

et
$$\frac{1}{p'} - \frac{1}{p} = \frac{1}{f}; \quad p, p', f \text{ étant pris en valeur absolue.}$$

Si on remarque que, en prenant les longueurs AP , AP' positives de A vers X , négatives dans le cas contraire, p est négatif, f aussi; on a :

$$-\frac{1}{p'} - \frac{1}{p} = -\frac{1}{f}; p, p', f \text{ étant pris algébrique-}$$
ment;

ou
$$\frac{1}{p'} + \frac{1}{p} = \frac{1}{f};$$
 la formule est la même que dans le cas des miroirs concaves. Donc, dans tous les cas, la formule
$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}$$
 est applicable, à la condition de prendre p , p' et f algébriquement, positifs dans le sens AX à partir du sommet du côté réfléchissant. La différence entre les formules des miroirs convexes et concaves est dans le signe de la distance focale.

3. *Grandeur des objets.* — Soit un objet lumineux PQ ; l'image est en $P'Q'$ et les distances AQ , AQ' sont liées par les relations précédemment établies.

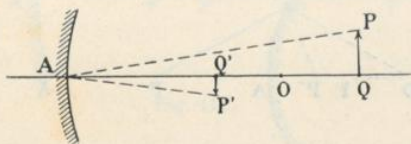


Fig. 113.

OA étant la normale en A à la surface, l'angle $\widehat{PAQ'} = \widehat{Q'AP'}$; les deux triangles APQ , $AP'Q'$ sont par suite semblables et on a :

$$\frac{PQ}{P'Q'} = \frac{AQ}{AQ'} = \frac{p}{p'}.$$

Cette relation donne le rapport des dimensions de l'image et de l'objet. Cette relation est générale et s'applique aussi au cas des miroirs convexes.

On a donc avec ces deux relations le moyen de résoudre tous les problèmes relatifs aux miroirs sphériques.

§ V. — MIROIRS PARABOLIQUES. APPLICATION
AUX PROJECTEURS.

Les relations établies dans le cas des miroirs sphériques ne sont qu'approchées et ne s'appliquent qu'à des miroirs de faible ouverture ; mais il y a un type de miroir pour lequel la convergence en un foyer des rayons tombant parallèlement à l'axe est absolue ; c'est le miroir parabolique.

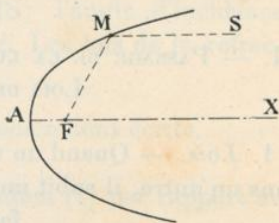


Fig. 114.

La surface réfléchissante est la surface de révolution engendrée par une parabole tournant autour de son axe AX (fig. 114).

Une droite SM parallèle à l'axe et la droite FM font en M des angles égaux avec la tangente et avec la normale à la parabole ; c'est donc le chemin que suivra un rayon lumineux, puisque l'angle d'incidence est égal à l'angle de réflexion.

Réciproquement, si un foyer lumineux est placé en F, il enverra sur le miroir des rayons FM qui, après réflexion, constitueront un faisceau rigoureusement parallèle.

Cette propriété est utilisée dans les projecteurs électriques ; un foyer lumineux intense (lampe à arc ; cf. Électricité) est placé au foyer d'un miroir parabolique. On obtient ainsi un faisceau parallèle qui peut porter à une très grande distance.

Ces miroirs sont faits de verre poli ou de métal argenté et poli.

Le métal a l'avantage d'être plus léger et plus solide, mais il se ternit facilement.

Le verre conserve une très bonne surface réfléchissante ; mais il est fragile et peut se casser par les variations de température.

CHAPITRE III

Réfraction.

§ I. — PASSAGE DE LA LUMIÈRE D'UN MILIEU DANS UN AUTRE. LOIS DE LA RÉFRACTION.

1. *Lois.* — Quand un rayon lumineux passe d'un milieu dans un autre, il subit une déviation en franchissant la surface de séparation des deux milieux ;

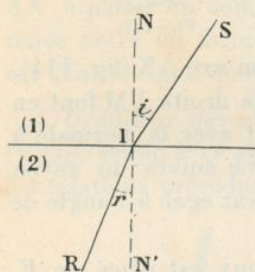


Fig. 115.

par exemple, le rayon incident SI dans le milieu (1) devient, après passage dans le milieu (2), IR dont la direction est différente de SI.

Cette déviation se fait suivant les deux lois suivantes :

1^{re} *Loi.* — Le rayon incident, le rayon réfracté et la normale à la surface de séparation au point d'incidence sont dans un même plan.

2^e *Loi.* — Quelle que soit l'obliquité du rayon incident, le sinus de l'angle d'incidence et le sinus de l'angle de réfraction sont dans un rapport constant. Ce rapport constant s'appelle *Indice de réfraction* du second milieu par rapport au premier.

Les angles d'incidence et de réfraction sont les angles que font les rayons incidents et réfractés avec la normale à la surface de séparation.

On a donc, dans le cas de la figure 115, $\frac{\sin i}{\sin r} = n$; n est l'indice de réfraction du milieu (2) par rapport au milieu (1). Si $n > 1$, le milieu (2) est dit plus réfringent que (1), le

rayon se rapproche de la normale. Si $n < 1$, le milieu (2) serait moins réfringent, le rayon s'écarterait de la normale.

2. *Indice inverse.* — Il y a réciprocité entre le rayon réfracté et le rayon incident; si la lumière venait suivant RI, elle serait réfractée suivant IS; l'angle d'incidence deviendrait r , l'angle de réfraction i . Les lois de la réfraction donnent toujours :

$$\frac{\sin r}{\sin i} = \frac{1}{n}, \text{ d'après l'égalité précédemment écrite.}$$

Donc $\frac{1}{n}$ constitue l'indice du milieu (1) par rapport au milieu (2).

Dans le cas de la figure, $\frac{1}{n} < 1$, (1) est moins réfringent que (2), le rayon s'écarte de la normale.

§ II. — ANGLE LIMITE. RÉFLEXION TOTALE.

Considérons pour la démonstration un point lumineux

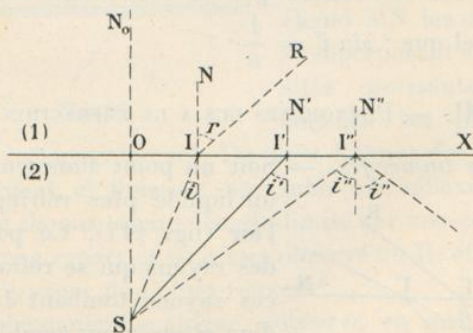


Fig. 116.

S placé dans un milieu (2) (verre par exemple) plus réfringent que (1) (air par exemple) (fig. 116).

Un rayon émané de S, tel que SI, se réfracte en IR

selon la loi $\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{1}{n}$, n plus grand que 1, est l'indice de réfraction du milieu (2) par rapport au milieu (1).

Donc, l'angle r est plus grand que i ; si le point I s'écarte de O vers la droite de la figure, l'angle r croît et le rayon IR se couche sur la surface de séparation.

On arrive à un rayon limite SI' tel que :

$$\frac{\sin i'}{\sin 90^\circ} = \frac{1}{n}, \quad \sin i' = \frac{1}{n}, \text{ le rayon sort tangentiellement à la surface suivant IX.}$$

Si nous poussions au delà, la formule $\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{1}{n}$ nous donnerait pour $\sin i$ des nombres plus grands que 1; il se produit un autre phénomène dit de réflexion totale; le rayon SI'' se réfléchit sur la surface de séparation suivant les lois ordinaires; il reste dans le milieu (2). Il y a réflexion totale.

Donc tous les rayons émanés de S dans le cône décrit par SI' tournant autour de SO se réfractent et sortiront. Les rayons extérieurs subiront la réflexion totale.

Ce cône est caractérisé par un demi-angle au sommet $\widehat{OSI'} = i'$ tel que : $\sin i' = \frac{1}{n}$.

§ III. — PHÉNOMÈNES DUS A LA RÉFRACTION.

1. *Objets immergés.* — Soit un point lumineux S dans un liquide plus réfringent que l'air (fig. 117). Ce point émet des rayons qui se réfractent, et ces rayons tombant dans l'œil d'un observateur semblent venir d'un point R' plus élevé que S . Il y a donc relèvement des objets immergés. C'est ainsi qu'un bâton plongé dans l'eau paraît brisé à la surface de séparation.

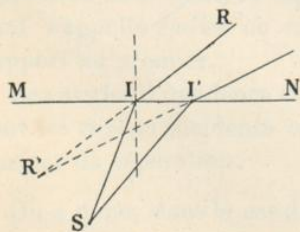


Fig. 117.

2. *Réfraction atmosphérique.* — Les différentes couches d'air sont plus ou moins denses et présentent par suite des indices de réfraction différents ; le rayon lumineux émané de S, venant d'un astre quelconque, subit une série de réfractions et arrive sur la terre avec une certaine direction MR ; c'est cette direction qui est apparente pour notre œil ou nos instruments. Il nous semble voir l'astre dans la direction MR.

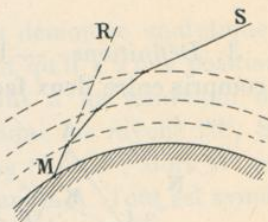


Fig. 118.

Il est donc nécessaire de corriger toutes les observations astronomiques d'un certain angle pour éliminer cette variation de la direction.

3. *Mirage.* — Le mirage est une illusion d'optique fréquente dans les pays chauds et qui fait voir l'image renversée d'objets éloignés. Monge en donna une explication.

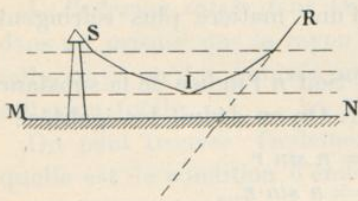


Fig. 119.

Au-dessus du sol très chaud MN les couches d'air se superposent avec des densités croissantes, car les couches les plus chaudes sont au voisinage du sol. Un objet S émet des rayons qui se réfractent et finissent par subir une réflexion totale en I, quand ils ont atteint l'angle-limite sur une couche.

Le rayon repart et peut être observé en R, offrant l'apparence d'émaner de l'objet renversé.

Un phénomène analogue s'observe en mer ; dans l'air on voit l'image renversée des côtes ; c'est un effet analogue, mais inverse ; la mer est froide, les couches inférieures sont plus denses et la réflexion totale se produit dans les couches supérieures.

§ IV. — PRISME.

1. *Définitions.* — Un prisme est un milieu transparent compris entre deux faces planes inclinées l'une sur l'autre ;

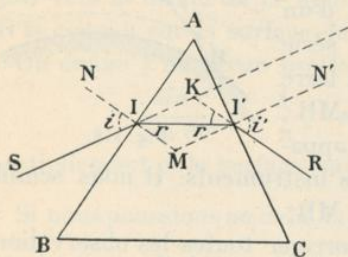


Fig. 120.

la droite intersection de ces deux faces s'appelle l'arête du prisme.

On étudie en général les phénomènes qui se passent dans un plan perpendiculaire à cette arête, ou section principale du prisme ; dans une telle section le

point A (sur l'arête du prisme) est le sommet, BC est la base.

Dans une telle section (fig. 120) un rayon lumineux arrive suivant SI, se réfracte suivant II' et ressort suivant I'R (cas d'un prisme fait d'une matière plus réfringente que l'air).

2. *Formule du prisme.* — Soit n l'indice de la substance du prisme par rapport à l'air. On en déduit les égalités :

$$\sin i = n \sin r$$

$$\sin i' = n \sin r'$$

En outre, l'angle en M du triangle II'M est supplémentaire de A (quadrilatère MI'AI inscriptible) et l'on a :

$$180 - A + r + r' = 180^\circ, \text{ donc } r + r' = A.$$

Enfin la déviation du rayon lumineux est l'angle des deux directions SI, I'R.

Cet angle

$$D = (i - r) + (i' - r') = i + i' - (r + r') = i + i' - A.$$

Les formules du prisme se ramènent donc aux quatre suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} \sin i = n \sin r \\ \sin i' = n \sin r' \\ A = r + r' \\ D = i + i' - A \end{array} \right.$$

qui suffisent à résoudre tous les problèmes relatifs au prisme.

3. *Minimum de déviation.* — On démontre analytiquement et on vérifie expérimentalement qu'il y a une position des rayons lumineux correspondant à un minimum de déviation. Ce minimum a lieu lorsque les rayons RI', SI sont également inclinés sur les faces : $i = i'$; alors II' est perpendiculaire à la bissectrice de l'angle A. Tout est symétrique par rapport à cette bissectrice.

Dans ce cas les formules précédentes se simplifient : D_m , i_m , r_m étant les angles correspondant au minimum, on a :

$$\begin{cases} D_m = 2 i_m - A \\ A = 2 r_m \\ \sin i_m = n \sin r_m = n \sin \frac{A}{2} \end{cases} \quad r_m = \frac{A}{2}$$

4. *Réflexion totale dans les prismes.* — Il peut arriver dans un prisme que le rayon II' tombe sur la face AC de telle sorte qu'il y subisse une réflexion totale.

On peut trouver facilement quelle est la condition d'émergence des rayons I'R.

Soit I le point d'incidence des rayons. Tous les rayons incidents se réfractent à l'intérieur d'un angle I'I'' égal à $2 r_1$, r_1 étant l'angle limite correspondant au rayon rasant la face d'entrée.

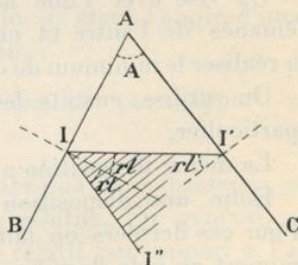


Fig. 121.

Si le rayon II' le plus élevé tombe sur AC en I' de telle façon qu'il soit réfléchi totalement, tous les autres le seront a fortiori.

Il faut pour cela que l'angle en I' soit égal au moins à r_1 c'est-à-dire dans le triangle IAI' :

$$A + 90^\circ - r_1 + 90^\circ - r_1 = 180 ;$$

ou : $A = 2 r_1$.

Pour qu'il y ait émergence des rayons, il faut que $A < 2r_1$. Donc, avec une substance plus réfringente que l'air, si $A > 2r_1$, aucun rayon ne ressortira. Ils seront tous réfléchis totalement.

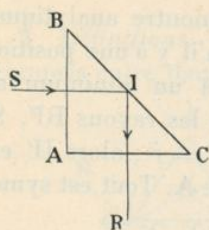


Fig. 122.

On utilise parfois dans les appareils d'optique (jumelles à prismes) des prismes à réflexion totale (fig. 122). Le rayon SI est réfléchi totalement en I et repart suivant IR. Le prisme fait l'effet d'un miroir plan, mais est bien supérieur comme quantité de lumière réfléchie.

5. *Applications du prisme.* — Le prisme a servi à la mesure des indices ; pour les solides on taille un prisme dont on mesure l'angle A. Le prisme est posé au centre d'un goniomètre, c'est-à-dire un cercle divisé muni de deux lunettes.

On vise avec l'une la lumière émanée de l'autre et on cherche à réaliser le minimum de déviation.

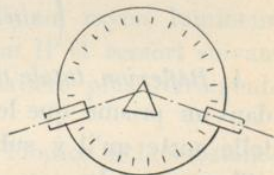


Fig. 123.

On utilise ensuite les formules applicables à ce cas particulier.

La même disposition a été appliquée aux liquides.

Enfin une disposition analogue a servi pour les gaz. Pour ces derniers on fait la détermination de l'indice par rapport au vide (le milieu (1) est le vide, le milieu (2) le gaz étudié).

Biot et Arago trouvèrent pour les gaz la loi :

$$\frac{n^2 - 1}{d} = \text{constante.}$$

d étant la densité et n l'indice absolu ; on admet plutôt maintenant $\frac{n - 1}{d} = \text{constante.}$

6. *Indices relatifs.* — Nous avons vu jusqu'ici les

indices pris par rapport à l'air et les indices pris par rapport au vide.

Supposons deux milieux contigus (1), (2) d'indices absolus n_1 , n_2 (pris par rapport au vide). L'indice relatif du milieu (2) par rapport au milieu (1) est facile à déterminer.

Pour le trouver, supposons (fig. 124) entre les deux milieux un espace vide. Le rayon lumineux suit le chemin $S I_1 I_2 R$ et les angles sont liés par les relations :

$$n_1 \sin i_1 = \sin r_1,$$

$$n_2 \sin i_2 = \sin r_2.$$

$$\text{Or, } r_1 = r_2.$$

Donc en divisant membre à membre :

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{n_2}{n_1}.$$

Si l'espace vide diminue d'épaisseur, la direction des rayons ne change pas ; à la limite, i_1 étant l'angle d'incidence, i_2 sera l'angle de réfraction.

$\frac{n_2}{n_1}$ est l'indice relatif du milieu (2) par rapport au milieu 1.

Connaissant donc les indices absolus des substances, on peut en déduire tous les indices relatifs. En général, on détermine au goniomètre l'indice relatif par rapport à l'air et, connaissant l'indice absolu de l'air, on calcule l'indice absolu.

§ V. — LENTILLES.

1. *Définitions.* — Les lentilles sont des milieux transparents limités par des surfaces courbes de révolution ; nous ne considérerons que les lentilles sphériques limitées par des calottes sphériques ou des plans.

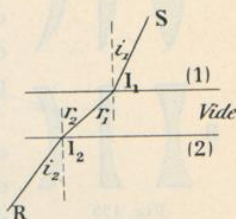


Fig. 124.

On distingue deux types de lentilles : convergentes, qui ont les bords plus minces que le centre (fig. 125-A), divergentes, qui ont les bords plus épais que le centre (fig. 125-B). Elles présentent différentes formes suivant la disposition des surfaces. En suivant l'ordre de la figure 125 on trouve les lentilles : bi-convexe, plan convexe, concave convexe ; bi-concave, plan concave, convexe concave.

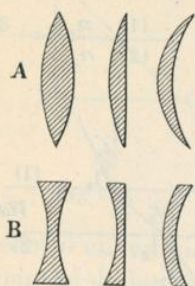


Fig. 125.

On n'étudiera que les lentilles minces, c'est-à-dire que l'on supposera l'épaisseur des lentilles négligeable vis-à-vis des distances relatives des objets et des images ; et que, de plus, les calottes sphériques ont une faible ouverture (une dizaine de degrés).

Les centres des sphères auxquelles appartiennent les surfaces terminales des lentilles sont dits centres de courbure et la ligne de ces centres axe principal. Une section principale est une section plane passant par l'axe principal ; les schémas de la figure 125 sont des sections principales.

Les lentilles sont faites généralement en deux sortes de verre : le crown-glass et le flint-glass. Le flint est beaucoup plus réfringent que le crown.

2. *Foyers principaux. Lentilles convergentes.* — Si un faisceau de lumière parallèle tombe sur une lentille parallèlement à l'axe, on observe que ce faisceau va concourir en un point F dit foyer principal de la lentille.

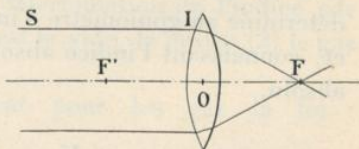


Fig. 126.

Réciproquement, si un point lumineux est placé en F, il émet des rayons que la lentille ramène parallèlement à l'axe ; elle crée donc un faisceau parallèle.

On démontre que la lentille possède deux foyers F, F' situés à des distances égales du centre O et que la longueur

OF, dans le cas d'une lentille biconvexe, est donnée par la relation :

$$\frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R'} \right),$$

n étant l'indice de réfraction de la substance qui constitue la lentille, et R, R' les rayons de courbure des deux faces de la lentille.

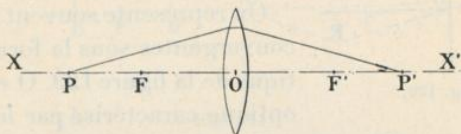


Fig. 127.

3. *Foyers conjugués.* — Si un point lumineux P est placé sur l'axe, il lui correspond un point P' tel que, si OP, OP' , distances de ces deux foyers conjugués au centre de la lentille, sont appelées p et p' , on ait la relation :

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f},$$

p étant compté algébriquement positif de O vers X , p' de O vers X' . On verrait, comme dans le cas des miroirs, que si P est entre F et O , il lui correspond un foyer P' conjugué imaginaire. Il y a également toujours réciprocité entre P et P' .

4. *Centre optique.* — On appelle ainsi un point tel que le rayon qui y passe traverse la lentille sans déviation.

Supposons pour la démonstration une lentille épaisse (fig. 128) et menons deux droites parallèles tangentes aux deux cercles de la section principale $IT, I'T'$.

Le rayon traversant II' est celui qui arrive suivant SI et ressort suivant $I'R$; les angles r et r' sont égaux (alternes internes). $i = i'$ et le rayon $I'R$ est parallèle à IS .

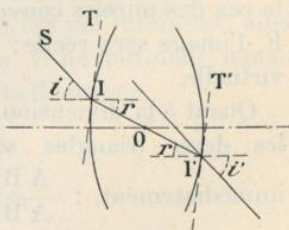


Fig. 128.

Donc le rayon n'a pas été dévié, il n'a subi qu'un petit déplacement latéral.

La droite II' coupe l'axe principal en O et si on suppose la lentille infiniment mince, les calottes sphériques de faible ouverture, ce point peut être considéré comme l'intersection du plan de la lentille avec la

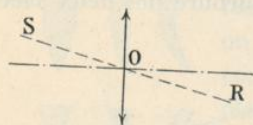


Fig. 129.

ligne des centres ou axe principal. On représente souvent les lentilles convergentes sous la forme schématique de la figure 129. O est le centre optique caractérisé par le fait qu'un

rayon tel que SO sort suivant la même direction OR .

5. *Construction des images.* — Les données précédentes permettent la construction des images ; soit un objet lumineux AB ; en menant AI parallèle à l'axe, l'image A' doit se trouver sur IF' ; le rayon AO passe sans déviation ; A' est donc à l'intersection de IF' et AO .

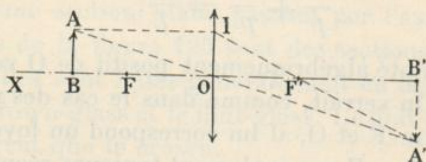


Fig. 130.

On peut faire la même discussion géométrique que dans le cas des miroirs convexes. Si l'objet AB est à gauche de F , l'image sera réelle ; si l'objet est entre F et O , elle sera virtuelle.

Quant à la dimension relative de l'objet et de l'image, les deux triangles semblables ABO , $A'B'O$ donnent immédiatement : $\frac{AB}{A'B'} = \frac{OB}{OB'} = \frac{p}{p'}$; cette relation,

jointe à $\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}$, permet la discussion de tous les problèmes de lentilles.

6. *Lentilles divergentes.* — Les relations et propriétés sont tout à fait analogues. Mais les foyers principaux sont virtuels (fig. 131); O est toujours le cercle optique; et la construction des images se fait d'une manière identique.

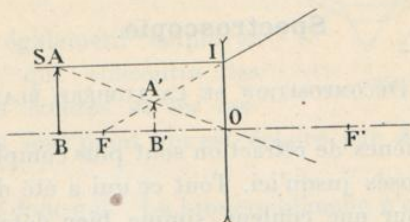


Fig. 131.

On a encore $\frac{AB}{A'B'} = \frac{p}{p'}$; mais la relation aux foyers conjugués est: $\frac{1}{p'} - \frac{1}{p} = -\frac{1}{f}$; avec ces deux relations on peut faire toute la discussion, comme dans le cas des lentilles convergentes.

7. *Aberrations de sphéricité.* — Les lentilles considérées jusqu'ici étaient supposées minces et de faible ouverture; fréquemment les lentilles ne sont pas telles et il en résulte que les rayons ne suivent pas la marche que l'on a indiquée précédemment. Les images formées sont alors confuses.

Pour éviter ces phénomènes, on emploie des lentilles aplanétiques, formées de deux lentilles accolées, qui, par cette disposition, réduisent les aberrations. Mais si elles les réduisent pour un sens d'arrivée des rayons lumineux, elles les augmenteraient en sens inverse. Il ne faut donc jamais retourner les verres des instruments d'optique.

CHAPITRE IV

Spectroscopie.

§ I. — DÉCOMPOSITION DE LA LUMIÈRE BLANCHE.

Les phénomènes de réfraction sont plus complexes qu'on ne les a supposés jusqu'ici. Tout ce qui a été dit est supposé établi pour une couleur simple bien déterminée ; et nous allons voir qu'il existe des couleurs complexes ; en particulier la lumière blanche, la lumière du soleil par exemple, donne des phénomènes particuliers.

Si on fait tomber sur un prisme un faisceau de lumière blanche SI, ce faisceau est réfracté dans le prisme, mais en outre, si on le reçoit sur un écran E, on constate qu'il est étalé et présente une gamme de colorations commençant par du rouge en R et variant insensiblement pour finir au violet en V. Ce sont les couleurs de l'arc-en-ciel.

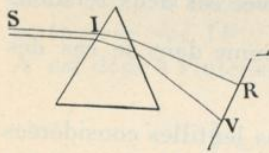


Fig. 132.

Cette gamme est ininterrompue et présente toutes les colorations intermédiaires, mais on a l'habitude de dire qu'on y retrouve sept couleurs, car nous y trouvons sept colorations qui ont un nom particulier ; ce sont dans l'ordre du spectre :

Rouge, orangé, jaune, vert, bleu, indigo, violet.

Si, au moyen d'une fente mince faite dans l'écran E, nous isolons une couleur déterminée, nous pouvons la recevoir sur un autre prisme ; on constate alors qu'elle est déviée et non dispersée ; on peut calculer son indice de réfraction.

On voit ainsi que les indices de réfraction des différentes couleurs du spectre sont différents et croissent du rouge au violet.

On peut inversement recomposer la lumière blanche ; si on met à la suite du premier prisme un second renversé (fig. 133), on annule la dispersion et on obtient le rayon de lumière primitive.



Fig. 133.

On peut également employer une lentille qui concentre les divers rayons colorés et les rassemble en un seul point qui est éclairé par de la lumière blanche.

On conclut donc que : La lumière blanche n'est pas homogène, mais formée d'un grand nombre de radiations que l'on nomme couleurs simples ou primitives. C'est en vertu de l'inégale réfrangibilité de ces couleurs que le prisme produit la décomposition de la lumière.

Couleurs complémentaires. — On nomme ainsi des couleurs qui par leur réunion forment de la lumière blanche ; si dans le spectre nous séparons les radiations en deux groupes, chacun formera par le mélange de ses couleurs constitutives une lumière colorée ; ces deux couleurs, par leur réunion, donneront la lumière blanche.

§ II. — ABERRATION DE RÉFRANGIBILITÉ. ACHROMATISME.

Les lentilles, qui réfractent la lumière comme les prismes, la décomposent également ; on a donné précédemment la valeur de la distance focale principale d'une lentille biconvexe : $\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R'} \right)$; n n'étant pas le même pour les différentes radiations, la lentille aura des foyers différents pour les couleurs du spectre.

Il en résulte que les images données par la lumière blanche sont irisées sur les bords, frangées des couleurs du spectre.

Le problème de l'achromatisme est l'obtention de lentilles

qui donnent en lumière blanche des images non irisées. On y arrive par des combinaisons de lentilles faites de différentes substances ; Dollond, opticien londonien, a le premier, en 1757, achromatisé une lentille en associant (fig. 134) une lentille biconvexe en crown-glass à une lentille convexe concave en flint.



On peut également, en associant un prisme de flint et un de crown, achromatiser le prisme ; on obtient des images déviées et sans irisation.

Fig. 134. Ces questions sont très importantes dans les instruments d'optique où les lentilles employées doivent être à la fois dénuées d'aberrations de réfrangibilité et de sphéricité.

§ III. — RAIES DU SPECTRE SOLAIRE. SPECTROSCOPE.

1. *Raies*. — Quand on produit un spectre solaire très pur, on remarque que ce spectre est sillonné de raies sombres, perpendiculaires à sa longueur ; ce sont les raies du spectre solaire.

Wollaston les signala en 1802 ; mais Fraunhofer, en 1815, les étudia avec soin et les classifia ; il donna aux plus importantes des désignations par des lettres : A, a, B, C, D, E, b, F, G, H. A est à la limite du rouge, D dans le jaune, H dans le violet. Ces raies sont toujours dans la même région du spectre solaire, elles caractérisent une radiation bien déterminée.

Elles sont d'ailleurs fort nombreuses ; Fraunhofer en comptait 354 ; Thollon, sur un spectre de 15 mètres de longueur, en signala 4.000.

2. *Spectroscope*. — C'est un appareil destiné à l'étude des spectres et particulièrement des raies.

L'appareil se compose d'un prisme P très dispersif destiné à la production du spectre ; un collimateur C est constitué par une lentille *l* au foyer de laquelle on place la

source de lumière S. On envoie ainsi un faisceau de lumière parallèle qui est décomposée par le prisme et reçue dans une lunette L.

Un micromètre M est constitué par un deuxième colli-mateur, au foyer duquel se trouvent des divisions très fines gravées sur verre.

Ces divisions sont projetées par l'appareil sur la face de sortie du prisme, s'y réfléchissent et vont dans la lunette L. Elles servent à mesurer la distance qui séparent les différentes raies.

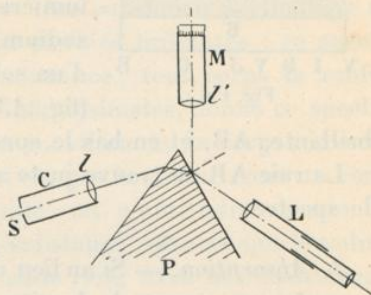


Fig. 135.

En mettant en S une source lumineuse quelconque, ou en y faisant arriver un rayon de soleil, on peut étudier les différents spectres et leurs relations.

§ IV. — ANALYSE SPECTRALE.

1. *Spectre d'un solide incandescent.* — Si nous étudions au spectroscopie le spectre d'un solide chauffé au blanc, nous obtenons un spectre analogue à celui de la lumière solaire, c'est-à-dire allant du rouge au violet, *mais sans raies*. Il est donc absolument continu et régulier.

2. *Spectre d'une vapeur.* — On peut obtenir de différentes manières le spectre des vapeurs : on obtient celui du sodium en mettant un sel de sodium quelconque dans la flamme d'un brûleur Bunsen. On peut obtenir le spectre des gaz en faisant éclater une décharge électrique dans un tube contenant ce gaz plus ou moins raréfié ; on obtient des raies brillantes, au lieu d'un spectre continu, ou une bande cannelée, suivant la pression et le régime des décharges.

Dans les cas où on obtient des raies brillantes, elles se

réfractent de la même manière que la couleur correspondante du spectre continu du solide incandescent.

Si, par exemple, nous envoyons sur le prisme d'un spectroscopie, à la partie haute, la lumière émanée de la vapeur de sodium, et, en bas, la lumière venant d'un solide incandescent, on obtient (fig. 136), en haut une raie jaune brillante, AB, et en bas le spectre continu.

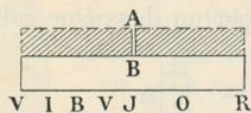


Fig. 136.

La raie AB se trouve juste au-dessus de sa couleur dans le spectre.

3. *Absorption.* — Si au lieu de séparer nos deux spectres, nous faisons passer la lumière blanche sur la vapeur de

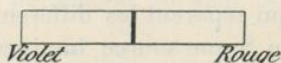


Fig. 137.

sodium, on obtient un spectre continu, mais avec une raie noire correspondant à la position de la raie brillante AB précédente.

Il y a eu absorption des radiations jaunes du spectre continu par la vapeur.

L'expérience sur un autre métal aurait donné des raies d'absorption dans une autre région du spectre. C'est ce qu'on appelle un spectre interverti.

4. *Raies du spectre solaire.* — On en conclut que les raies du spectre solaire sont dues à l'absorption produite par des vapeurs incandescentes ; mais indépendamment de celles-là, on remarque des raies variables suivant l'état de l'atmosphère ; ce sont des raies dues à l'atmosphère, ou raies telluriques.

Si donc on examine dans le spectre solaire les raies correspondant à des métaux connus, on observe la présence du sodium, du fer, du calcium, du magnésium, du chrome,

du nickel, etc. On peut en conclure que le soleil forme une masse à très haute température entourée de vapeurs incandescentes.

5. *Analyse spectrale*. — Une substance particulière est caractérisée par son spectre de raies brillantes : ce spectre est caractéristique de la substance ; tout corps la renfermant, même en quantités infinitésimales, donne ce spectre, mélangé à celui des autres constituants du corps ; inversement, si cette substance n'est pas contenue dans un corps soumis à l'analyse spectrale, on n'obtiendra aucune des raies caractéristiques de la substance ; on a vu que le sodium donnait une raie jaune ; cette raie, avec des instruments puissants, se dédouble en deux raies jaunes voisines.

D'autres corps donnent des raies nombreuses : le strontium donne huit raies : six rouges, une orange, une bleue. Si on met un sel métallique complexe dans un bec Bunsen, on peut, par l'étude de son spectre, déterminer les métaux qui y entrent.

La présence de raies inconnues a conduit à la découverte de métaux nouveaux : rubidium et césium (Kirchhoff et Bunsen), thallium (Crookes), indium, gallium.

§ V. — MÉTÉORES LUMINEUX.

1. *Arc-en-ciel*. — L'arc-en-ciel paraît dans les nuages opposés au soleil quand il tombe de la pluie ; il est formé d'arcs concentriques présentant successivement les couleurs du spectre solaire. Parfois on observe deux arcs concentriques, le cercle intérieur est plus vif que le cercle extérieur ; en outre, dans le cercle intérieur les couleurs vont du violet au rouge, en allant vers l'extérieur ; dans le cercle extérieur, l'ordre est inverse. La théorie indique qu'il peut exister plusieurs arcs-en-ciel, mais rarement on en voit plus de deux.

Le phénomène est dû à la réflexion du soleil dans les

gouttes de pluie et à la décomposition de la lumière blanche qui résulte du passage dans l'eau des rayons lumineux. On observe le même phénomène dans les jets d'eau, dans la rosée, etc., dans tous les cas où se trouvent des gouttes d'eau.

On voit sur la figure 138 la possibilité du phénomène ; un rayon SI arrive dans une goutte d'eau où il se réfracte ;

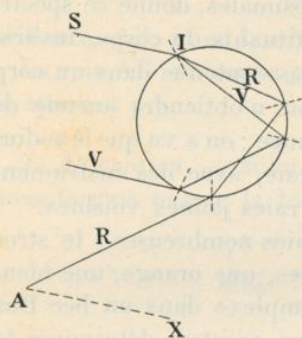


Fig 138.

il se décompose en même temps par suite de l'inégale réfrangibilité des couleurs ; les différents rayons lumineux se séparent et se réfléchissent sur la face interne de la goutte ; ils ressortent suivant les directions V et R.

L'œil placé en A voit suivant R du rouge ; suivant la direction AX il verrait du violet, provenant d'une autre goutte

dans la direction AX. On a donc un arc allant du violet au rouge. Ce phénomène se produit pour toutes les gouttes situées dans un plan perpendiculaire à la direction du soleil et équidistantes de l'observateur ; car elles peuvent donner toutes la même construction de rayons lumineux. Suivant le nombre de réflexions dans les gouttes, on obtient le deuxième ou le troisième arc.

2. *Halo*. — C'est un cercle irisé, simple ou double, concentrique au Soleil ou à la Lune ; le halo est expliqué par la décomposition de la lumière dans de petits prismes de glace qui constituent certains nuages. C'est un effet absolument analogue à celui qui produit l'arc-en-ciel.

Il ne faut pas confondre ces halos avec ce qu'on appelle vulgairement halo et qui est une lueur confuse entourant la lune, due à la présence de nuages qui créent des dispersions de lumière et troublent la netteté des bords ; ce n'est en somme que de la lumière diffusée.

CHAPITRE V

Instruments d'optique.

§ I. — OEIL HUMAIN.

Avant de décrire les instruments d'optique, il est nécessaire de donner quelques notions succinctes sur l'œil, qui nous permet de prendre connaissance des objets lumineux et éclairés.

L'œil n'est autre qu'une chambre noire, où une lentille L ou cristallin forme les images renversées des objets lumineux sur le fond du globe de l'œil en R, ou rétine constituée par l'épanouissement du nerf optique.

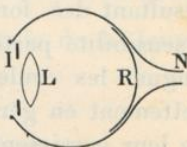


Fig. 139.

Devant le cristallin, en I, se trouve l'iris, sorte de diaphragme qui s'ouvre et se ferme instinctivement suivant l'abondance de lumière ; ouvert en grand dans l'obscurité, il est très réduit dans le grand jour.

Tous les objets n'étant pas à la même distance, les images ne se formeraient pas avec la même netteté, si le cristallin L était invariable ; suivant la distance, l'œil *accommode* le cristallin ; c'est un muscle spécial qui produit des changements de courbure du cristallin et arrive à former sur la rétine par ce procédé des images nettes.

L'œil normal peut accommoder pour des distances variant depuis des milliers de mètres jusqu'à quelques centimètres ; quand, avec l'âge, l'œil se fatigue, il ne peut plus accommoder pour les courtes distances : il est presbyte. Il faut aider le cristallin avec une lentille convexe qui augmente sa convergence.

Si l'œil est trop allongé, l'image se forme en avant de la

rétine, à moins que l'objet observé ne soit très rapproché de l'œil. C'est la myopie ; on la corrige par une lentille divergente qui, diminuant la convergence de l'œil, permet la formation des images plus loin du cristallin.

Le défaut inverse constitue l'hypermétropie ; les images se forment derrière la rétine ; sauf quand les objets sont très éloignés, alors l'image peut se former sur la rétine ; on corrige ce défaut comme la presbytie par l'emploi de lentilles convergentes.

L'astigmatisme est le défaut d'un œil qui est déformé ; il peut être myope dans le sens vertical, tout en restant normal dans le sens horizontal ; on compense ce défaut par des verres cylindriques qui corrigent l'inégalité.

Enfin, l'achromatopsie ou daltonisme n'est pas un défaut résultant des formes de l'œil ou du cristallin ; c'est une insensibilité particulière de la rétine qui l'empêche de distinguer les couleurs. Les contours des objets sont vus nettement en général par les daltoniens, mais les teintes ne leur paraissent pas distinctes.

§ II. — LOUPE.

Soit une lentille convergente L , et un petit objet AB ; on place la lentille devant AB de façon que celui-ci soit très rapproché du foyer, tout en restant entre F et O .

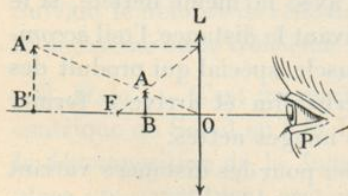


Fig. 140.

On obtient ainsi une image virtuelle $A'B'$, plus grande que AB , d'où semblent émaner les rayons pour l'œil placé en P ; cela permet d'avoir une image

$A'B'$ à distance PA' convenable pour la vision de l'œil et plus grande que l'objet.

La loupe et l'objet seront donc placés plus près de l'œil qu'il ne convient pour les voir, l'objet entre le foyer F et la

lentille, et l'image se formera en $A'B'$ à bonne distance de vision, soit 25 ou 30 centimètres.

Le grossissement est le rapport de l'image à l'objet, soit :

$$\frac{A'B'}{AB} = \frac{OB'}{OB}.$$

On a calculé ce rapport dans la théorie des lentilles convergentes :

$$\frac{OB'}{OB} = \frac{p'}{p};$$

ici on peut le simplifier en vertu de la remarque suivante ; AB est placé très près du foyer F ; on peut admettre qu'il est à ce foyer : $OB = f$; l'œil est placé très près de la lentille, on peut admettre que l'œil est en O . Si Δ est la distance de vision distincte, on a pour expression du grossissement : $G = \frac{\Delta}{f}$; plus la distance focale de la loupe sera faible plus le grossissement sera fort.

§ III. — MICROSCOPE COMPOSÉ.

La loupe ne permet guère de dépasser un grossissement de 100 ; pour obtenir des grossissements plus forts, on se sert du microscope composé qui substitue aux objets une image virtuelle renversée et amplifiée.

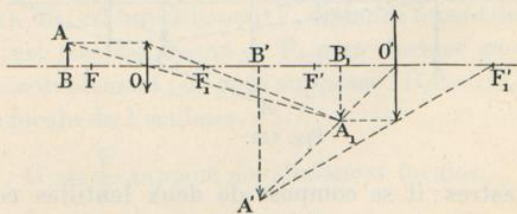


Fig. 141.

La figure 141 montre la disposition schématique de l'appareil qui se compose de deux lentilles convergentes O et O' , O étant l'objectif, O' l'oculaire.

L'objet est placé en AB à l'extérieur de OF , mais près de F . Il donne donc une image A_1B_1 réelle et agrandie, comme l'indique la construction de la figure.

Cette image A_1B_1 tombe entre le foyer F' et le centre optique O' de l'oculaire qui en donne une image virtuelle $A'B'$, observée par l'œil placé dans la région $O'F_1'$.

Grossissement. — Le grossissement peut se définir comme dans la loupe par le rapport $\frac{A'B'}{AB}$; $A'B'$ se forme à une distance $O'B'$ sensiblement égale à la distance de vision distincte. Ce rapport peut s'écrire $\frac{A'B'}{A_1B_1} \times \frac{A_1B_1}{AB}$; c'est le produit des grossissements des deux lentilles.

Connaissant $O'B'$ on peut en déduire $O'B_1$; d'où OB_1 et OB . On peut donc calculer en fonction des distances focales le grossissement de l'appareil. Généralement on le détermine expérimentalement, plutôt que de le calculer.

§ IV. — LUNETTES ASTRONOMIQUE ET TERRESTRE.

1. *Lunette astronomique. Formation des images.* — Cet appareil est destiné à la vision des objets éloignés, en parti-

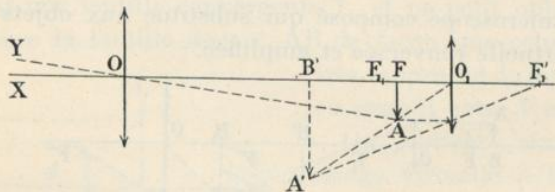


Fig. 142.

culier des astres; il se compose de deux lentilles convergentes, l'une O formant objectif, l'autre O_1 formant oculaire.

L'objet observé étant très éloigné donne dans O une image dans le plan focal de l'objectif, en FA . Cette image FA , tombant entre le foyer F_1 et le centre optique O_1 de la

lentille oculaire, donne une image virtuelle agrandie $B'A'$ qui est observée par l'œil placé dans la région O_1F_1' .

On voit que cet appareil donne des images virtuelles et renversées ; on ne peut plus dire agrandies, car les objets observés placés très loin sont souvent de dimensions considérables.

2. *Grossissement.* — Par ce fait même on ne peut plus définir le grossissement par le rapport des images et des objets comme dans le cas des loupes et microscopes. On définit le grossissement dans les lunettes : le rapport du diamètre apparent de l'image vue dans la lunette, au diamètre apparent de l'objet vu à l'œil nu ¹.

Sur la figure 142 on voit que le diamètre apparent de l'image, en supposant l'œil placé en O_1 ce qu'on a supposé déjà plusieurs fois, est : $\widehat{B'O_1A'}$.

Le diamètre apparent de l'objet est $\widehat{XOY}$, car, l'objet étant très éloigné, on peut supposer l'œil qui observe sans instrument placé en O .

On a donc :

$$G = \frac{\widehat{B'O_1A'}}{\widehat{XOY}} = \frac{\widehat{FO_1A'}}{\widehat{FOA}} ; \text{ or } tg \widehat{FO_1A'} = \frac{FA}{FO_1} ; tg \widehat{FOA} = \frac{FA}{FO}.$$

En remplaçant les angles par leurs tangentes, $G = \frac{OF}{FO_1}$. OF , on l'a dit, est sensiblement F , distance focale de l'objectif ; FA est très rapproché de F_1 pour former une image agrandie notablement ; on peut supposer : $O_1F = O_1F_1 = F_1$, distance focale de l'oculaire.

$$G = \frac{F}{F_1} \text{ rapport des distances focales.}$$

3. *Mesure du grossissement. Anneau oculaire.* — On supposera pour plus de simplicité les foyers F et F_1 confondus, ce qui est presque réalisé, a-t-on vu précédemment.

1. C'est-à-dire l'angle sous lequel on voit l'objet.

L'objectif O éclairé par l'objet observé joue par rapport à l'oculaire O_1 , le rôle d'un objet lumineux et donne dans cet oculaire une image LM réelle et rapetissée; si on déplace une feuille de papier sans la région O_1LM , en attei-

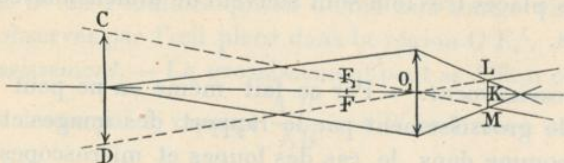


Fig. 143.

gnant le plan LM on obtiendra une image très nette, un cercle petit et très lumineux.

On voit d'ailleurs sur la figure 143 que c'est le point où le cône de lumière émergeant de O_1 présente la section la plus faible.

On a les deux relations:

$$\frac{LM}{CD} = \frac{O_1K}{OO_1} = \frac{O_1K}{F + F_1}; \quad \frac{1}{O_1K} + \frac{1}{OO_1} = \frac{1}{F_1};$$

$$\text{ou:} \quad \frac{1}{O_1K} + \frac{1}{F + F_1} = \frac{1}{F_1}; \quad O_1K = \frac{F_1(F + F_1)}{F};$$

$$\text{d'où:} \quad \frac{LM}{CD} = \frac{F_1}{F} = \frac{1}{G}.$$

En mesurant CD d'une part et LM au moyen d'une plaquette de verre dépoli sur laquelle sont tracées des divisions très fines (Dynamètre de Ramsden), on obtient par leur rapport le grossissement G .

4. *Clarté dans les lunettes.* — C'est le rapport des quantités de lumière reçues sur la rétine en observant un objet à la lunette et à l'œil nu. Il y a deux cas à considérer: a) celui étudié où il y a un grossissement; b) celui où l'objet n'a pas de diamètre apparent (étoiles); on ne peut dans ce dernier cas définir le grossissement.

a. Diamètre apparent sensible. — La quantité de lumière envoyée par l'unité de surface de l'objet est proportionnelle à la surface de l'objectif; soit 1 l'intensité du faisceau envoyé par l'unité de surface de l'objet, l le diamètre de l'objectif, on pourra prendre $\frac{\pi}{4} l^2$ comme quantité de lumière pénétrant dans l'objectif. Mais cette quantité s'éparpille sur un objet G fois plus grand linéairement, donc G^2 fois plus grand superficiellement.

La quantité de lumière relative à l'unité de surface de l'image est donc : $\frac{\frac{\pi}{4} l^2}{G^2}$.

D'autre part, si on observe à l'œil nu, la quantité de lumière sera proportionnelle à la surface de la pupille $\frac{\pi}{4} \omega^2$ (ω diamètre de la pupille).

La clarté est donc :

$$\frac{l^2}{G^2} \cdot \frac{1}{\omega^2}.$$

Si a est le diamètre de l'anneau oculaire, on sait que : $G = \frac{l}{a}$; la clarté est donc : $\left(\frac{a}{\omega}\right)^2$ rapport des carrés des diamètres de l'anneau oculaire et de la pupille.

Ce rapport est plus petit que 1 dans les lunettes; donc les objets sont grossis mais paraissent moins lumineux.

b. Pas de diamètre apparent sensible. — On suppose l'œil dans le plan de l'anneau oculaire; comme cet anneau est plus petit que la pupille, et que tous les rayons tombant dans la lunette y passent, toute la lumière reçue sur l'objectif tombe dans l'œil.

Cette lumière est proportionnelle à la surface de l'objectif $\frac{\pi}{4} l^2$.

A l'œil nu, on recevrait une quantité proportionnelle à

la surface de la pupille $\frac{\pi}{4} \omega^2$. Donc la clarté est : $\frac{l^2}{\omega^2}$, considérablement > 1 .

Les étoiles paraîtront donc bien plus lumineuses parce qu'elles ne sont pas grossies ; on pourra en voir qui seraient invisibles à l'œil nu.

5. *Lunette terrestre.* — La lunette terrestre ou longue-vue est une modification de la lunette astronomique destinée à permettre la vision droite des objets. Cette modification consiste dans l'interposition, entre l'objectif et l'oculaire, de deux verres convergents formant un système appelé véhicule.

La figure 144 représente l'appareil modifié, l'oculaire étant supposé enlevé.

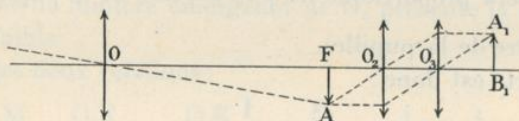


Fig. 144.

Les deux lentilles supplémentaires O_2O_3 sont placées à une distance O_2O_3 égale à leur distance focale commune ; de plus O_2F est aussi égal à leur distance focale.

L'objet donne dans l'objectif, à son plan focal F , l'image FA ; cette image réelle donne, dans le système O_2O_3 , une deuxième image réelle A_1B_1 égale à AF et droite. La construction résulte immédiatement de la propriété : $O_2F = O_2O_3 = O_3B_1 = f$, distance focale commune des deux lentilles O_2O_3 .

Cette image A_1B_1 est observée avec l'oculaire comme précédemment. Il n'y a donc rien de changé aux théories précédentes.

En pratique l'oculaire est formé de deux lentilles et l'ensemble du véhicule et de l'oculaire, invariable comme distance relative de ses différents verres, est déplacé par rapport à l'objectif pour la mise au point.

§ V. — LUNETTE DE GALILÉE.

Cette lunette par l'accouplement de deux appareils identiques constitue la lorgnette de spectacle.

L'objectif supposé à gauche de la figure 145 donne à

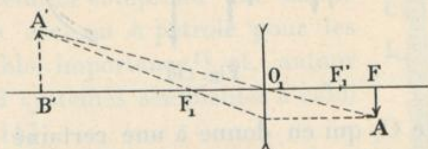


Fig. 145.

son foyer F une image réelle et renversée d'un objet éloigné.

Cette image tombe au delà du foyer F'_1 de l'oculaire qui est constitué par une lentille divergente; on obtient ainsi une image $A'B'$ virtuelle et droite.

Si FA est suffisamment rapproché de F'_1 , l'image $A'B'$ sera très agrandie.

Le grossissement sera comme précédemment, en supposant F confondu avec F'_1 : $G = \frac{F}{F'_1}$.

En pratique les lentilles sont formées, pour achromatiser l'appareil, l'objectif, d'une lentille biconcave en flint serrée entre deux biconvexes de crown; l'oculaire d'une lentille biconvexe en flint entre deux biconcaves en crown.

§ VI. — APPAREILS DE PROJECTION.

Ce sont des instruments destinés à projeter sur un écran des images réelles et amplifiées des objets. Le prototype est la lanterne magique qui renferme le principe de tous ces appareils.

Une source de lumière S envoie ses rayons au moyen

d'un réflecteur concave R dont elle occupe le foyer, sur une lentille O_1 ; cette lentille concentre les rayons lumineux sur l'objet transparent A qui est fortement éclairé. Il est placé un peu au delà du foyer F d'une deuxième lentille

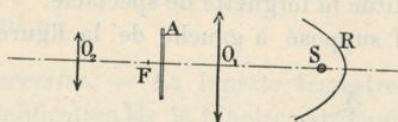


Fig. 146.

convergente O_2 qui en donne à une certaine distance une image réelle et très agrandie qu'on reçoit sur un écran.

On peut calculer le grossissement de l'appareil par les formules ordinaires des lentilles convexes.

Le microscope solaire est un appareil analogue : un réflecteur plan envoie un large faisceau de lumière sur un système convergent qui le concentre sur l'objet à projeter; celui-ci placé comme A par rapport à O_2 donne une image réelle et très agrandie.

§ VII. — PHARES.

Les phares sont destinés à éclairer à une grande distance ; pour éviter la dispersion des rayons lumineux, une source lumineuse puissante est placée au foyer d'une lentille de manière à envoyer un faisceau cylindrique.

Mais il faut éviter les aberrations de sphéricité et l'absorption que produirait un verre trop épais. Les lentilles à échelons permettent de réaliser ces conditions.

Une lentille plan-convexe de faible ouverture L est placée au centre de l'appareil ; tout autour se trouvent une série d'anneaux ABC , qui sont des morceaux de lentilles dont le foyer coïncide avec celui de L .

Les faces postérieures de tous ces éléments sont planes et placées dans le plan postérieur de la lentille L .

On obtient ainsi un appareil optique ayant un foyer

unique et une faible épaisseur; il en résulte l'absence d'aberrations de sphéricité et d'absorption par le verre. Parfois des miroirs annulaires tels que M complètent l'installation pour réfléchir les rayons qui tomberaient en dehors de la lentille.

Cet ensemble ne constitue qu'une partie du phare; celui-ci comprend une lampe (électrique à arc, ou à pétrole pour les feux de faible importance¹⁾) et, autour d'elle, 5 ou 6 systèmes semblables à celui de la figure 147.

Le système optique est fixe dans les feux fixes ou mobile dans les feux à éclats; il tourne alors d'un mouvement régulier. L'appareil est monté soit sur galets, soit sur une masse de fer flottant dans du mercure, afin d'avoir aussi peu de frottements que possible.

Si l'appareil est à éclipses, à éclats de couleur, ou à secteurs colorés, des écrans opaques ou colorés, fixes ou mobiles permettent de réaliser les durées d'éclipse et d'éclats.

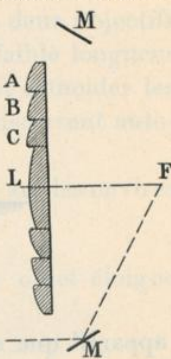


Fig. 147.

§ VIII. — TÉLÉMÈTRES.

Les télémètres sont des appareils destinés à mesurer les distances. On peut les classer suivant leur principe en trois groupes: télémètres à dépression, télémètres à base, télémètres à mesure d'image.

1. *Télémètres de dépression.* — Supposons une lunette placée en A, sur une côte par exemple; elle est située à une hauteur $CA = H$ au-dessus du niveau de la mer.

On vise un point éloigné, un navire par exemple, à la distance $CB = L$. Si φ est l'angle BAC, on a: $L = H \operatorname{tg} \varphi$.

1. Les lampes à pétrole sont souvent munies de manchons Auer.

H peut être connu et φ mesuré. On en déduit L .

Pour que l'appareil soit précis, il faut que la hauteur H soit suffisamment grande; on ne pourra donc utiliser cet

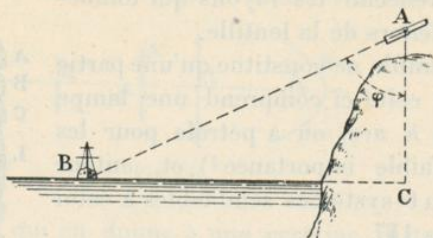


Fig. 148.

appareil que sur une côte élevée ou dans la mâture d'un bâtiment.

En outre, si l'observation est faite sur une côte où la mer a des marées, la hauteur CA varie; il faudra donc des tables donnant les corrections suivant la hauteur de la marée.

Cet appareil est en principe un des télémètres qu'emploie l'artillerie de côte pour les batteries hautes (télémètre Audouard).

2. *Télémètre à base.* — Supposons qu'on ait en deux points d'un rivage placé deux observateurs à une distance connue dite base du télémètre.

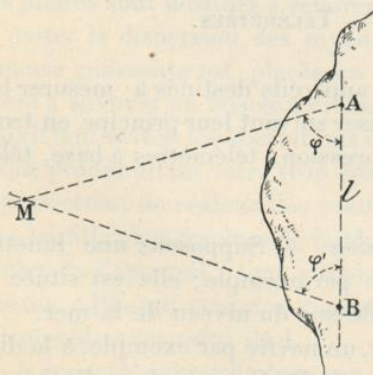


Fig. 149.

Soient par exemple les deux postes A, B ; avec deux lunettes on vise un point M , ce qui permet de mesurer les angles φ et φ' .

Connaissant ces angles et la longueur l , on peut trigonométriquement ré-

soudre le triangle ABM , et par suite déterminer les distances AM, BM .

Une table à double entrée, construite pour une base donnée, peut servir à déterminer rapidement les distances en fonction de φ et φ' .

On a construit des appareils portatifs où deux objectifs se trouvent aux extrémités d'une base de faible longueur (1 mètre). Un seul observateur reçoit et fait coïncider les images des deux objectifs et les distances s'inscrivent automatiquement (télémètres Barr et Stroud).

Ces appareils sont fréquemment employés sur les navires de guerre.

3. *Appareils à mesure d'images.* — Un objet éloigné



Fig 150.

(fig. 150) AB donne une image A'B' dans une lentille L ; le grossissement défini comme pour la loupe est :

$$\frac{A'B'}{AB} = \frac{p'}{p}; \quad \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f},$$

p et p' étant respectivement OB et OB'.

Or :

$$p' = \frac{fp}{p-f}.$$

Donc :

$$\frac{A'B'}{AB} = \frac{p}{p-f}.$$

Si on connaît la dimension de AB, on peut mesurer A'B' et de l'égalité précédente on tire p , la distance cherchée.

L'image A'B' est reçue sur une lame de verre portant des graduations et on l'examine avec une deuxième lentille faisant objectif.

Il faut pour utiliser cet instrument connaître la grandeur de l'objet mesuré, la hauteur des mâts d'un bâtiment par exemple ; il n'est d'ailleurs pas très précis pour des distances considérables.

LIVRE VII. — ÉLECTRICITÉ

CHAPITRE I

Notions préliminaires et définitions.

§ I. — DIFFÉRENTES FORMES DE L'ÉNERGIE.

On appelle Énergie la faculté que possède un corps, ou un système de corps, de produire du travail. Une pierre qui tombe, par exemple, possède de l'énergie.

L'énergie peut se trouver sous quatre formes : Énergie mécanique ; Énergie calorifique ; Énergie chimique ; Énergie électrique.

Les deux premières sont familières à chacun ; nous avons vu en Thermodynamique les relations qui existaient entre elles.

La chimie montre la présence de l'énergie dans les combinaisons des corps ; par exemple le charbon, par la combustion de son carbone, c'est-à-dire son union avec l'oxygène, produit un dégagement de chaleur que l'on peut à son tour convertir en énergie mécanique. C'est le rôle de la machine à vapeur d'effectuer cette transformation.

Enfin, nous verrons dans le courant de cette étude les manières de produire l'énergie électrique par la transformation de l'énergie prise sous une quelconque de ses trois autres formes. Inversement, il sera possible de transformer l'énergie électrique et de reproduire l'énergie sous l'une des autres formes.

§ II. — GÉNÉRATEURS D'ÉLECTRICITÉ.

Ce sont les appareils qui nous permettront de transformer l'énergie prise, sous une forme quelconque, en énergie élec-

trique; suivant la forme de l'énergie à transformer on aura :

- 1° Les piles ordinaires transformant l'énergie chimique;
- 2° Les piles thermo-électriques transformant l'énergie calorifique;
- 3° Les dynamos transformant l'énergie mécanique.

§ III. — RÉCEPTEURS.

Ce sont les appareils, produisant un effet inverse des précédents, qui nous permettront de transformer l'énergie électrique; suivant la forme de l'énergie qu'ils restituent on pourra les classer en trois groupes :

- 1° Récepteurs chimiques; on en parlera dans la question de l'électrolyse et des accumulateurs;
- 2° Récepteurs thermiques; lampes et appareils de chauffage;
- 3° Récepteurs mécaniques; ce sont les moteurs électriques.

§ IV. — RELATIONS NUMÉRIQUES DANS LES TRANSFORMATIONS DE L'ÉNERGIE.

La thermodynamique nous fait connaître les relations qui existent entre l'énergie mécanique et l'énergie calorifique; on trouvera de même des relations entre l'énergie mécanique et l'énergie électrique. Il est nécessaire, avant de commencer l'étude de ces relations, de définir les unités employées.

On a étudié, au livre I^{er}, les unités du Système CGS et les unités employées dans la pratique, ainsi que les relations qui existent entre elles.

En électricité on emploie souvent des unités particulières que nous allons définir et qui toutes dérivent du Système CGS :

1. *Travail*. — L'unité de Travail dans le système CGS est l'erg. L'unité pratique employée en mécanique est le kilogrammètre qui vaut 981×10^5 ergs.

En Électricité on fait un fréquent usage du *Joule* qui vaut 10^7 ergs.

Par suite, 1 kilogrammètre vaut 9,81 joules, autrement dit, 1 joule vaut 0 kgm. 102.

2. *Puissance*. — On n'a pas encore eu l'occasion de définir la notion de puissance; elle deviendra nécessaire en Électricité où l'on se trouvera en présence de machines et de transports d'énergie.

La puissance d'une machine est le travail qu'elle peut fournir pendant l'unité de temps.

Donc, comme tous les systèmes adoptent la seconde comme unité de temps : La puissance d'une machine est le travail qu'elle peut développer en une seconde.

En mécanique, l'unité de puissance est le *Cheval-vapeur*; c'est la puissance d'une machine capable d'effectuer un travail de 75 kilogrammètres en 1 seconde.

En électricité, on emploie le *Watt* qui est la puissance d'une machine effectuant un travail de 1 joule par seconde; on utilise fréquemment un de ses multiples, le *Kilowatt*, qui vaut 1.000 watts.

On peut trouver la relation entre le watt et le cheval-vapeur : en effet, nous savons que le cheval-vapeur vaut 75 kilogrammètres par seconde; le kilogrammètre valant 9,81 joules, le cheval-vapeur vaut :

$$75 \times 9,81 = 736 \text{ joules par seconde, c'est-à-dire } 736 \text{ watts.}$$

Autrement dit, en employant le kilowatt, le cheval-vapeur vaut 0 kw. 736.

Une unité souvent employée est le kilowattheure, travail fourni par une machine de 1 kilowatt de puissance travaillant pendant 1 heure.

Équivalence de la chaleur et du travail. — La thermodynamique nous apprend qu'une grande Calorie équivaut à 426 kilogrammètres.

Notons d'abord qu'en Électricité on fait toujours usage

de la petite calorie, c'est-à-dire la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1 degré centigrade la température de 1 gramme d'eau.

Donc 1 (petite) calorie équivaut à 0 kgm. 426.

Cherchons la relation entre la calorie et le joule ; on sait que le kilogrammètre vaut 9,81 joules ; donc :

1 calorie équivaut à $0,426 \times 9,81$ joules, c'est-à-dire 4,18 joules.

Inversement 1 joule équivaut à : $\frac{1}{4,18} = 0,24$ calorie.

CHAPITRE II

Courant électrique. Lois d'Ohm et de Joule. Unités.

§ I. — COURANT ÉLECTRIQUE.

Quoique des hypothèses vraisemblables aient été faites sur la nature de l'électricité, on ne peut en donner une définition précise ; nous ne pourrions donc définir le courant électrique que par ses propriétés. Un conducteur parcouru par un courant électrique est le siège de phénomènes de quatre ordres différents :

1. *Phénomènes mécaniques.* — Au voisinage du courant, on constate que des aimants ont une tendance à se mettre en mouvement ; un autre courant subit également l'action de forces provenant du premier. On étudiera plus tard ces phénomènes en détail au point de vue de la direction et de l'intensité de ces forces.

2. *Phénomènes calorifiques.* — Un conducteur fin, un fil métallique par exemple, parcouru par un courant, s'échauffe ; si l'élévation de température est suffisante, le fil peut rougir et même fondre ; on en verra l'application dans les lampes à incandescence.

3. *Phénomènes chimiques.* —
Faisons passer le courant dans une solution d'un sel métallique, du sulfate de cuivre par exemple. Pour cela, la dissolution étant placée dans un vase V, on y plonge deux lames de métal ; le platine sera un métal très convenable, car il ne sera pas attaqué par les produits de décomposition.

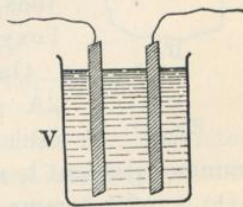


Fig. 151.

En intercalant cet ensemble sur le passage du courant, on constate une dissociation du sel, le cuivre se dépose sur une lame, l'acide sulfurique apparaît à l'autre.

4. *Phénomènes physiologiques.* — Enfin, si nous prenons comme conducteur le corps humain, ce dernier est le siège de phénomènes physiologiques qui produisent des impressions variables suivant l'intensité du courant : ces sensations, qui ne sont pour des intensités faibles qu'une gêne ou une légère souffrance, peuvent devenir intolérables et provoquer des paralysies et même la mort.

Ces divers phénomènes ont un « sens » déterminé ; quand on change le sens du courant, en particulier dans les phénomènes chimiques, on constate des effets différents aux électrodes. On devra donc attribuer un sens au courant.

§ II. — INTENSITÉ.

Les phénomènes précités se produisent avec plus ou moins d'intensité ; suivant leur importance, on dira que le courant est plus ou moins intense.

On pourra prendre, pour définir l'intensité, les phénomènes chimiques susceptibles de mesures très précises ; si nous faisons traverser de l'eau légèrement acidulée par le courant, l'eau se décompose en ses éléments, et nous pouvons recueillir séparément l'hydrogène et l'oxygène.

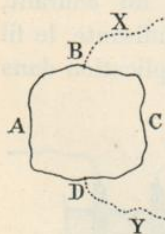


Fig. 152.

On dira qu'un courant qui a décomposé 2A grammes d'eau est deux fois plus intense que celui qui décomposerait A grammes pendant le même temps.

On prendra comme unité de courant le courant qui libérerait 0,0103 milligrammes d'hydrogène par seconde.

Cette unité se nomme l'ampère. On verra plus loin,

par les relations de l'énergie électrique avec l'énergie mécanique, la raison du choix de cette unité.

On constate qu'en tous les points d'un même circuit tel que A B C D, fermé et ne présentant pas de dérivation telle que B X, D Y, l'intensité du courant est la même.

§ III. — QUANTITÉ D'ÉLECTRICITÉ.

La terminologie employée en Électricité emprunte beaucoup d'expressions à l'Hydraulique ; on a le courant électrique, comme on a en hydraulique un courant d'eau. Ce dernier débite une certaine quantité d'eau par seconde : par analogie on dira que le courant électrique débite une certaine quantité d'électricité par seconde. C'est une simple manière de parler, car l'électricité n'est pas une substance pondérable, quoique l'on parle parfois du « fluide électrique ». La quantité d'électricité ne correspond donc à rien de réel et n'est que le produit de notre imagination assimilant le courant d'eau au courant électrique.

Par définition, le courant électrique de 1 ampère d'intensité débite une quantité d'électricité égale à l'unité par seconde. Cette unité se nomme le Coulomb ; le courant de 1 ampère débite 1 coulomb par seconde. Le coulomb est donc l'ampère-seconde ; on emploie fréquemment comme unité son multiple, l'ampère-heure.

Il résulte de ce qui précède que la même quantité d'électricité passe en tous les points d'un même circuit fermé et sans dérivations.

§ IV. — POTENTIEL. VOLT.

Le circuit électrique peut passer dans un conducteur A C B, reliant deux points A, B, avec une intensité variable ; par analogie avec l'eau circulant dans une conduite, avec un débit plus ou moins fort suivant la pression qui la force à passer, on attribue à une caractéristique du courant la

faculté de faire passer l'électricité. Cette caractéristique s'appelle : Potentiel.

Donc plus la « différence de potentiel » entre les deux points A, B sera considérable, plus le courant sera intense ; on a choisi une unité pour la mesure des différences de potentiel : c'est le Volt. Nous verrons comment on peut faire les mesures au moyen d'appareils dit Voltmètres.

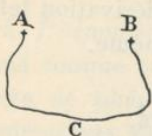


Fig. 153.

En tous cas, on constate que, si un courant de I ampères circule dans le conducteur ACB sous la différence de potentiel V volts, un courant de $2I$ ampères circulera sous la différence $2V$; *il y a donc proportionnalité entre la différence de potentiel ou voltage entre les deux points A et B et le courant circulant dans le conducteur qui relie ces deux points.*

On emploie souvent le terme tension pour désigner une différence de potentiel, on dira par exemple une tension de 200 volts ; les deux expressions sont synonymes.

§ V. — RÉSISTANCE DES CONDUCTEURS.

Supposons que les deux points A et B aient toujours entre eux une différence de potentiel constante ; si nous réunissons ces deux points par un fil gros et court (fig. 154 a) le courant circulera assez intense.

Si on remplace ce fil gros par un fil mince et long (fig. 154 b) il y circulera un courant plus faible ; c'est comme si le conducteur fin et long opposait au passage du courant une *résistance* plus grande.

Soit V la différence de potentiel entre A et B ; réunissons les deux points par un fil de longueur l et de section S ; le

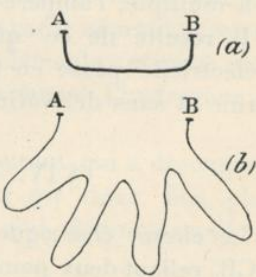


Fig. 154.

courant qui circule est mesuré et trouvé de I ampères ; maintenant mettons un fil de même métal que le premier, de même section, de longueur nl ; le courant ne sera plus que $\frac{I}{n}$.

De même, si, conservant la même longueur l , on avait pris un fil de section $\frac{S}{p}$, le courant eût été $\frac{I}{p}$.

On exprime ces faits en disant : La résistance d'un conducteur est proportionnelle à sa longueur et inversement proportionnelle à sa section.

$R = \frac{aL}{S}$; a est un coefficient caractéristique du métal employé, on l'appelle « coefficient de résistivité ». Très faible pour les métaux, il est considérable pour les autres substances.

On écrit parfois l'expression précédente sous la forme : $R = \frac{L}{cS}$; on voit que $a = \frac{1}{c}$; c s'appelle le coefficient de conductibilité.

Ces coefficients caractérisent la conductibilité des différents corps : les métaux (l'argent principalement, le cuivre, etc.) offrent peu de résistance au courant ; les substances isolantes qui empêchent le courant de passer offrent un coefficient a très grand : leur résistance est énorme.

Par exemple : le bois, la pierre, la porcelaine, etc.

L'unité de résistance s'appelle l'Ohm ; la définition exacte (Congrès international de Chicago) en est la suivante : c'est la résistance à 0 degré centigrade d'une colonne de mercure de 1 millimètre carré de section et de 106 centim. 3 de longueur. Une colonne de sulfate de zinc dissous dans l'eau et de même dimension aurait 350.000 ohms de résistance ; on voit donc l'énorme différence de résistance entre les métaux et les liquides.

§ VI. — LOI D'OHM.

Elle résulte des définitions précédentes de l'intensité, du potentiel et de la résistance.

Si V est la différence de potentiel exprimée en volts entre deux points A et B, R la résistance (en ohms) du conducteur qui relie ces deux points, I l'intensité du courant qui y circule, chiffrée en ampères, on a entre ces trois quantités la relation :

$$V = RI.$$

On voit que, si entre les deux points on a une différence de potentiel de 1 volt et un conducteur de résistance 1 ohm, il circulera un courant de 1 ampère.

On pourra donc donner cette autre définition de l'ohm : c'est la résistance du conducteur qui, sous la tension de 1 volt appliquée à ses extrémités, donne la circulation du courant de 1 ampère.

Le volt et l'ampère étant fixés, on voit que l'unité de résistance est forcément déterminée, puisque la loi d'ohm établit entre ces trois quantités une relation.

On verra au chapitre Électricité Statique les considérations théoriques qui ont provoqué le choix du volt et de l'ampère.

§ VII. — LOI DE JOULE. PUISSANCE D'UN COURANT.

La loi d'Ohm fixe la relation entre les caractéristiques électriques du courant ; ce courant produit des effets calorifiques et chauffe le fil. La loi de Joule relie la quantité de chaleur produite aux caractéristiques électriques.

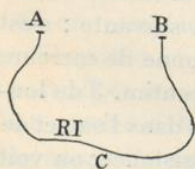


Fig. 155.

Soit un conducteur ACB de résistance R ohms, il y circule un courant de I ampères ; la loi de Joule s'énonce ainsi : La quantité de chaleur dégagée par seconde est égale à :

$$Q = 0,24 RI^2.$$

R étant exprimé en ohms, I en ampères, Q est exprimé en petites calories.

Donc Q étant la quantité de chaleur dégagée par seconde, nous pourrions l'appeler « puissance calorifique » du circuit ACB.

On peut donner son expression sous une autre forme ; en effet, entre les points A, B existe une différence de potentiel qui nous est donnée par la loi d'Ohm :

$$V = RI.$$

$$Q = 0,24 RI^2 = 0,24 I RI = 0,24 VI.$$

La « puissance calorifique » du circuit ACB est égale à $0,24 \times$ l'intensité du courant $\times$ la différence de potentiel.

La chaleur, a-t-on dit (chap. I, § IV-3), équivaut à du travail et on sait que 1 Joule vaut 0,24 calorie. Si donc nous évaluons l'équivalent en travail de cette quantité de chaleur produite par le courant, nous aurons :

Q calories équivalent à 4,18 Q joules.

Donc par seconde :

$$4,18 Q = 4,18 \times 0,24 VI.$$

Or des joules-secondes sont des unités de puissance, des watts : $W = VI = RI^2$, dans le cas d'un conducteur s'échauffant librement.

C'est ce qu'on appelle la Puissance du courant ; ici, nous avons pris pour la démonstration des effets calorifiques seuls, mais si le courant était directement transformé en effets mécaniques, on aurait la même expression.

Remarque. — La puissance du courant exprimée en watts est égale au produit de l'intensité en ampères par la chute de voltage exprimée en volts.

Donc le produit de 1 ampère par 1 volt donne 1 watt. Or 1 ampère par seconde c'est le débit de 1 coulomb ; si de la puissance nous passons au travail :

1 coulomb subissant une différence de potentiel de 1 volt effectue un travail de 1 joule. C'est une autre manière d'ex-

primer la même loi : La quantité d'électricité en coulombs multipliée par la chute de voltage en volts donne le travail effectué par le courant en joules.

§ VIII. — COURANTS DÉRIVÉS.

Au lieu d'un seul conducteur entre deux points A et B, on peut en avoir un certain nombre ; le courant passe dans chacun d'eux et constitue des « courants dérivés ».

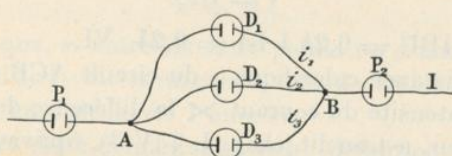


Fig. 156.

Si nous plaçons des appareils à électrolyse qui nous permettront de mesurer l'ampérage ou débit du courant : 1° P_1 et P_2 en amont et en aval des points A et B ; 2° D_1 , D_2 , D_3 sur chacun des courants dérivés, on constate les phénomènes suivants :

La quantité d'électricité passant en P_1 et P_2 est la même ; soit I l'intensité correspondante ; les intensités i_1 , i_2 , i_3 relevées sur les courants dérivés sont telles que :

$$i_1 + i_2 + i_3 = I.$$

C'est identiquement comme une rivière qui a plusieurs bras : les quantités d'eau coulant en amont et en aval des points de bifurcation et de jonction sont les mêmes ; et le débit total est égal à la somme des débits partiels.

On a vu que la résistance d'un conducteur influe sur l'intensité du courant débité (§ V). Ici entre A et B nous avons un certain nombre de conducteurs, de résistances r_1 , r_2 , r_3 . Quelle serait la résistance du conducteur unique qui interposé entre A et B à la place de ces conducteurs donnerait le même débit total I ?

Rien n'étant changé dans le reste du circuit, la différence

de potentiel entre A et B reste la même dans les deux cas. Seulement l'intensité totale I passerait dans ce conducteur.

Soit R la résistance cherchée. On a donc, en appliquant entre A et B la loi d'Ohm, au conducteur cherché :

$$(1) V = R I;$$

et aux conducteurs actuels :

$$(2) V = r_1 i_1 = r_2 i_2 = r_3 i_3 = \dots$$

De plus nous savons que :

$$(3) I = i_1 + i_2 + i_3 + \dots$$

De (1) et (2) nous tirons :

$$I = \frac{V}{R}; i_1 = \frac{V}{r_1}; i_2 = \frac{V}{r_2}; i_3 = \frac{V}{r_3}; \text{etc.}$$

Remplaçons dans (3) $I, i_1, i_2, i_3 \dots$ par leur valeur il vient :

$$\frac{V}{R} = \frac{V}{r_1} + \frac{V}{r_2} + \frac{V}{r_3} + \dots$$

Divisons les deux membres de cette égalité par V :

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} + \dots$$

Si l'on appelle « *conductance* » l'inverse de la résistance d'un conducteur, on peut énoncer la loi suivante :

La conductance du conducteur unique qui remplacerait les conducteurs dérivés est égale à la somme des conductances de ces derniers.

§ IX. — FORCE ÉLECTROMOTRICE D'UN GÉNÉRATEUR ET D'UN RÉCEPTEUR.

1. *Générateur.* — Soit G un générateur d'électricité ; on sait qu'en tous les points d'un même circuit l'électricité circule avec la même intensité ; la loi est générale et s'applique même à l'intérieur du générateur. Mais ce circuit intérieur offre une résistance R et, suivant la loi de

Joule, RI^2 représente la puissance employée à l'échauffer. D'autre part, si V est la différence de potentiel aux bornes, la puissance dépensée dans le circuit extérieur est VI .

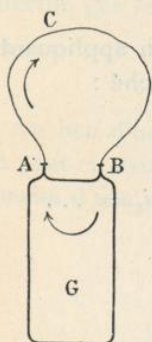


Fig. 157.

La puissance totale fournie par la pile est donc :

$$(1) \quad W = VI + RI^2.$$

Si la pile avait une résistance intérieure nulle, tout se dépenserait dans le circuit extérieur ($RI^2 = 0$), on aurait alors aux bornes une différence de potentiel E telle que :

$$(2) \quad W = EI.$$

De (1) et (2) on peut déduire :

$$EI = VI + RI^2 \text{ ou } E = V + RI.$$

E est appelé force électromotrice de la pile. Cette force électromotrice ne dépend pas des dimensions de la pile, elle n'est fonction que des substances qui la constituent.

On peut donner une autre expression de la force électromotrice d'un générateur ; soit r la résistance du circuit extérieur ; la loi de Joule nous fournit la relation :

$$V = Ir.$$

En remplaçant V par cette expression dans :

$$V + RI,$$

on obtient : $E = Ir + RI = (R + r) I.$

2. *Récepteur.* — Un récepteur est un appareil qui transforme de l'énergie électrique. Soit un appareil R recevant le courant par les bornes A, B ; il est traversé par un courant d'intensité I et entre ses bornes A, B la différence de potentiel est V .

Ce courant qui traverse R produit deux résultats : une partie échauffe le circuit ; si R est la résistance, c'est la puissance RI^2 qui produit cet effet. Une autre partie de la puissance est transformée en travail ; soit W . Comme aux

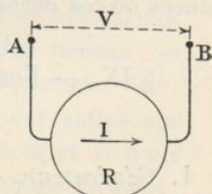


Fig. 158.

bornes A, B la différence de potentiel est V , la puissance fournie au récepteur est VI ;

On a donc :

$$VI = W + RI^2;$$

W est une puissance, nous pouvons la représenter par le produit EI d'un voltage par un ampérage.

$$VI = EI + RI^2 \text{ ou } V = E + RI.$$

On obtient une relation analogue au cas du générateur ; on appelle E force électromotrice du récepteur.

§ X. — LOIS DE KIRCHHOFF.

Soit un réseau de conducteurs ABCDE. A chaque point aboutissent plusieurs conducteurs ; en outre sur les parties AB, BC..., se trouvent des générateurs ou des récepteurs G_1, G_5 . Le sens des courants est indiqué par des flèches.

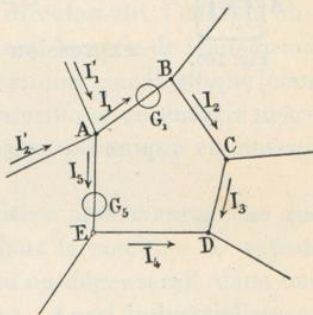


Fig. 159.

1^{re} Loi. — La somme des intensités de tous les courants qui se dirigent vers l'un des sommets du réseau est égale à la somme des intensités de tous les courants qui s'en éloignent.

Dans le cas du sommet A par exemple :

$$I'_1 + I'_2 = I_1 + I_5.$$

2^e Loi. — Si on considère un circuit fermé ABCDEA, la somme des produits de la résistance de chaque conducteur par l'intensité correspondante est égale à la somme des forces électromotrices et contre-électromotrices qui se trouvent dans le circuit, toutes ces quantités étant prises avec des signes convenables.

Si on parcourt le circuit dans le sens ABCD..., il faudra prendre, par exemple, les intensités avec le signe $+$ quand

Physique et chimie. — GILLE.

elles sont dirigées dans le sens ABC..., avec le signe — dans le cas contraire; de même les forces électromotrices ou contre-électromotrices seront prises avec les signes + ou — suivant qu'elles tendront à faire circuler le courant dans un sens ou dans l'autre.

On aura donc :

$$I_1 R_1 + I_2 R_2 + I_3 R_3 - I_4 R_4 - I_5 R_5 = G_1 - G_5,$$

par exemple.

Prenons le cas particulier d'une pile A de résistance intérieure R, débitant un courant d'intensité I dans un circuit de résistance r; E étant la force électromotrice de la pile, d'après la loi de Kirchhoff on aura la relation :

$$E = RI + rI = (R + r) I,$$

expression déjà indiquée au § IX-2.

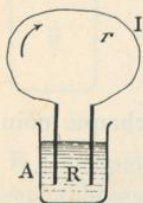


Fig. 160.

CHAPITRE III

Piles.

§ I. — DÉFINITION ET GÉNÉRALITÉS.

Une pile est un transformateur d'énergie chimique en énergie électrique; c'est le premier appareil connu qui ait permis de produire le courant électrique. Mais pour fournir les quantités actuellement employées dans les diverses installations, la pile serait un producteur trop dispendieux.

Aussi, au lieu de transformer directement l'énergie chimique en énergie électrique, on suit la série de transformations suivantes: énergie chimique en énergie calorifique (combustion du charbon). Énergie calorifique en énergie mécanique (machine à vapeur). Énergie mécanique en énergie électrique (dynamo).

Cette longue série est en définitive plus avantageuse que la pile, car le charbon brûlé dans la machine à vapeur coûte moins cher que le zinc qu'on dépenserait dans une pile pour obtenir le même courant. Aussi industriellement emploie-t-on la dynamo conduite par un moteur au lieu de piles.

La première pile fut construite par Volta (1789) en empilant successivement des rondelles de cuivre, zinc, drap mouillé, etc.

§ II. — THÉORIE DE LA PILE.

DIFFÉRENCE DE POTENTIEL AU CONTACT.

1. *Loi des contacts.* — Volta énonça la loi dite des contacts qui recevait une application directe dans sa pile.

Une différence de potentiel prend naissance au contact

de deux métaux différents ; elle ne dépend que de la nature des corps en contact et de leur température.

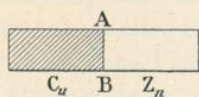


Fig. 161.

Soient (fig. 161) deux morceaux de zinc et de cuivre réunis en AB ; on peut mesurer, au moyen de l'électromètre à quadrants (cf. Électricité Statique), le potentiel absolu en tous les points de cette lame bimétallique.

On constate qu'en tous les points du cuivre le potentiel est le même, V par exemple ; en tous les points du zinc il est le même aussi, mais différent du précédent et plus élevé : $V + v$; v est la différence de potentiel au contact.

Il ne faut pas s'illusionner sur cette différence de potentiel : elle n'est susceptible de fournir aucun courant ; essayons en effet de réunir les deux lames par un fil, du cuivre par exemple (fig. 162).

Le cuivre ayant tous ses points au même potentiel, V , on obtient en (*a*) un potentiel V . En AB du cuivre au zinc, on passe de V à $V + v$; mais en

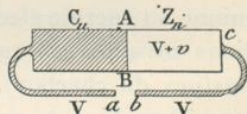


Fig. 162.

c, en repassant du zinc au cuivre on retombe de $V + v$ à V ; donc en *b* on obtient le potentiel V ; en *c* et AB on a la même différence mais en sens inverse, de sorte qu'en définitive les points *a* et *b* sont au même potentiel ; on ne peut par leur réunion obtenir le passage d'un courant.

2. *Pile*. — Tout autre eût été le résultat si, au lieu de réunir directement en *c* le cuivre (*bc*) au zinc, on avait

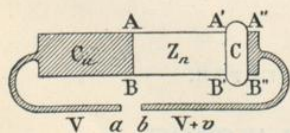


Fig. 163.

fait la réunion par interposition de liquide (fig. 163). En effet on ne constate pas, pour les liquides, de différence de potentiel à leur contact avec les métaux. Entre les deux parties

A'B', A''B'' quoiqu'appartenant à deux métaux différents, mais réunies par un liquide C, on n'aura pas de différence de potentiel.

Par suite, si V est le potentiel du cuivre ($a - AB$), on aura $V + v$ sur le zinc et $V + v$ aussi sur le cuivre ($A''B'' - b$).

Entre les deux points a, b existe donc une différence v ; mais cette différence n'est capable de faire circuler un courant que si l'eau est acidulée; de l'eau pure interposée en C empêche la circulation du courant. Si l'eau est, par exemple, acidulée avec de l'acide sulfurique, celui-ci attaque le zinc et il y a production de sulfate de zinc; c'est l'énergie chimique de cette combinaison qui se transforme en l'énergie électrique du courant produit.

La pile de Volta n'est que la superposition d'un certain nombre d'éléments analogues, au moyen desquels les potentiels successifs sont obtenus égaux à $V, V + v, V + 2v, \dots, V + nv$; n étant le nombre des contacts zinc, cuivre.

§ III. — PILES. POLARISATION.

1. *Pile.* — Au lieu de la disposition peu commode des empilages de Volta, la pile voltaïque est ordinairement constituée de la manière suivante: dans un vase contenant l'eau acidulée (9/10 d'eau et 1/10 d'acide), plongent une lame de cuivre et une lame de zinc. Un fil acb constitue le circuit extérieur où circule le courant. Il passe du potentiel le plus fort au potentiel le plus faible, a-t-on l'habitude de dire, c'est-à-dire dans le sens de la flèche f .

a est le pôle positif souvent indiqué par le signe $+$;

b est le pôle négatif indiqué par le signe $-$.

Les deux lames métalliques se nomment électrodes; a est l'électrode positive, b l'électrode négative.

Le courant va donc de l'électrode positive ($+$) à l'électrode négative ($-$) dans le circuit extérieur acb .

Mais le courant ne se borne pas à la circulation dans le fil extérieur acb ; il circule dans le liquide comme l'indique

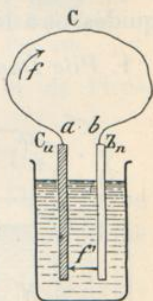


Fig. 164.

la flèche f' , en formant une série de courants dérivés, dont la somme des intensités est égale à l'intensité dans le circuit extérieur.

2. *Polarisation.* — On verra, dans les lois de l'électrolyse énoncées au chapitre suivant, que le courant passant dans un liquide produit une décomposition; le courant intérieur de notre pile, suivant la direction f' , produit cet effet. En même temps que la dissolution du zinc il se produit un dégagement d'hydrogène qui se porte sur le cuivre de la pile et forme autour de lui une sorte de gaine. Au lieu du couple zinc-cuivre, on finit par avoir le couple zinc-hydrogène qui produirait un courant inverse du précédent. Il y a donc d'abord diminution progressive du courant, puis arrêt complet.

§ IV. — PILES A DÉPOLARISANT CHIMIQUE.

On ne peut songer à gratter continuellement la lame de cuivre pour la débarrasser de l'hydrogène qui la recouvre; on a recours à des substances qui se combinent à lui ou se décomposent en donnant des produits qui ne polarisent pas la pile. On donnera deux exemples, l'un de pile à deux liquides, ou à dépolarisant liquide, l'autre à dépolarisant solide.

1. *Pile Daniell.* — Un vase extérieur V contient de l'eau acidulée où plonge le zinc B (fig. 165); le cuivre A, au lieu d'être plongé directement dans l'eau acidulée, est mis dans un vase V', en terre poreuse, qui contient une solution de sulfate de cuivre; ce vase poreux est baigné intérieurement par la dissolution de sulfate, extérieurement par l'eau acidulée; et, grâce à sa porosité qui permet la juxtaposition des liquides, il n'empêche pas le passage du courant.

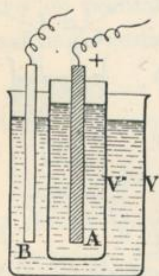
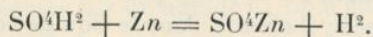
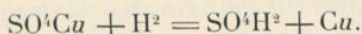


Fig. 165.

L'hydrogène libéré par l'attaque du zinc se porte sur le cuivre :



Mais il se trouve alors en présence de sulfate de cuivre qu'il décompose :



Le cuivre libéré se dépose sur l'électrode positive déjà en cuivre, par conséquent n'altère pas sa composition et n'entrave en rien le fonctionnement. Il y a seulement production de sulfate de zinc à l'extérieur du vase poreux et appauvrissement en sulfate de cuivre à l'intérieur par suite de la décomposition opérée par l'hydrogène. Il faut donc de temps en temps ajouter quelques cristaux de sulfate.

Cette pile très constante est employée fréquemment. (Télégraphes).

2. *Pile Leclanché.* — L'électrode négative A est encore formée par un morceau de zinc; l'électrode positive B est en charbon de cornue et placée au centre d'un vase poreux où sont tassés de petits morceaux de bioxyde de manganèse. Le vase extérieur V contient une dissolution de chlorhydrate d'ammoniaque (AzH^4Cl) où plongent l'électrode A et le vase poreux.

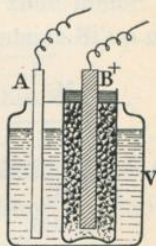
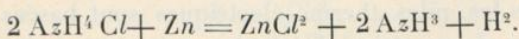
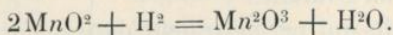


Fig. 166.

La réaction du zinc et du chlorhydrate donne de l'ammoniaque, du chlorure de zinc et de l'hydrogène :



Le chlorure et l'ammoniaque restent dissous; l'hydrogène se porte sur l'électrode positive, le charbon. Mais il attaque et réduit le bioxyde :



L'électrode positive est donc préservée du recouvrement par hydrogène.

Cette pile ne peut servir que par intermittence, car l'action du dépolarisant n'est pas instantanée; il lui faut un certain temps pour absorber l'hydrogène. Sa force baisse donc jus-

qu'à s'annuler, puis, par dépolarisation, elle revient à sa valeur primitive. Elle est employée pour les sonneries, les téléphones, etc.

3. *Zinc amalgamé.* — Le zinc du commerce toujours impur serait attaqué dans ces piles, même quand elles ne fonctionnent pas; pour éviter cette perte, on emploie le zinc dit amalgamé, c'est-à-dire dont la surface est formée par un alliage avec du mercure; on l'obtient en plongeant le zinc décapé dans du mercure. Il s'use ainsi seulement quand le courant passe et ses propriétés au point de vue électrique sont les mêmes qu'auparavant.

§ V. — PILES THERMO-ÉLECTRIQUES.

Soient deux morceaux de métal soudés en A et B; on a vu qu'il existait entre A et B une différence de potentiel, mais il a été démontré qu'il ne pouvait circuler aucun courant dans le circuit $M_1BM_2AM_1$.

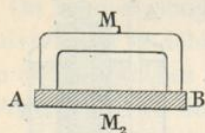


Fig. 167.

Il en est autrement si on chauffe une des soudures; en effet les différences de potentiel au contact dépendent de la température, d'après la loi de Volta. Si les deux soudures A, B sont à des températures différentes, il circulera un courant. C'est l'appareil de Seebeck.

Toutes les piles thermo-électriques sont basées sur ce principe; deux séries de soudures de deux métaux sont maintenues à des températures différentes; il en résulte des différences de potentiel inégales deux à deux, par suite production d'un courant.

Ces appareils qui permettraient de transformer l'énergie calorifique en énergie électrique sont très peu économiques; ils servent à mesurer les différences de température. La pile de Melloni (fig. 168) est formée d'une série de barreaux de bismuth et d'antimoine alternés; la série

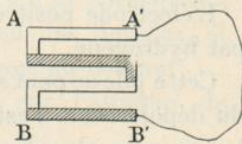


Fig. 168.

de soudures AB étant à une température différente de A'B', il y a circulation de courant.

D'autres appareils faits avec des fils métalliques (Platine et composés du platine) servent à évaluer les très hautes températures (Pyromètres).

§ VI. — COUPLAGE DES ÉLÉMENTS DE PILE.

Une seule pile ne produit pas un courant suffisant pour la plupart des applications ; il est nécessaire d'en employer plusieurs. Mais il existe plusieurs manières de les disposer.

1. *Couplage en tension ou en série.* — Mettons à la suite

les uns des autres des éléments en réunissant le pôle positif de chacun au pôle négatif du suivant. Ainsi, les forces électromotrices tendent toutes à faire passer le courant dans le même sens. Soit I l'intensité de ce courant, R la résistance intérieure de chaque élément ; r la résistance du circuit extérieur AMB.

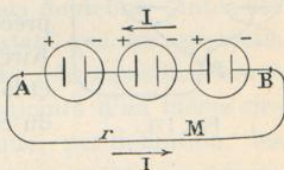


Fig. 169.

On a en vertu de la deuxième loi de Kirchhoff la relation :

$$nE = nRI + rI, \text{ d'où } I = \frac{nE}{nR + r},$$

avec une différence de potentiel entre A et B égale à

$$rI = \frac{nEr}{nR + r}.$$

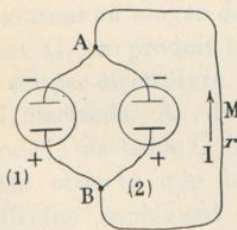


Fig. 170.

2. *Montage en quantité ou en dérivation.* — Réunissons en A les pôles négatifs, en B les pôles positifs. L'intensité dans le circuit extérieur se partage en A ; soit n le nombre des éléments supposés identiques ; l'intensité dans chacun d'eux sera $\frac{I}{n}$.

En appliquant la deuxième loi de Kirchhoff au circuit extérieur et à la pile (1), on a :

$$\frac{1}{n} R + rI = E, \text{ d'où } I = \frac{En}{nr + R}.$$

Et la différence de potentiel aux bornes :

$$rI = V = \frac{nEr}{nr + R}.$$

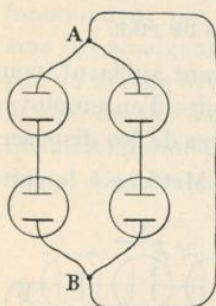
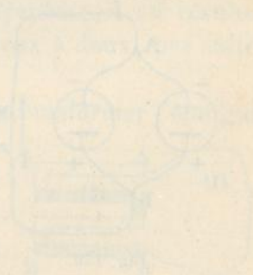


Fig. 171.

3. *Montage mixte.* — Enfin on peut faire un montage mixte ; réunir plusieurs groupes où les piles sont associées en série et monter ces groupes en quantité (fig. 171). On peut trouver comme dans les cas précédents au moyen des lois de Kirchhoff l'intensité dans les circuits et la différence de potentiel aux bornes du circuit extérieur A-B.



CHAPITRE IV

Électrolyse. Accumulateurs.

§ I. — ÉLECTROLYTES. ÉLECTROLYSE.

La plupart des liquides (sels fondus ou en dissolution) ne laissent passer le courant électrique qu'en subissant une décomposition.

Cette décomposition nous a permis de définir l'intensité du courant électrique ; et on a constaté que des appareils permettant de peser les produits de décomposition enregistrent les mêmes effets en tous les points d'un même circuit électrique : en outre on sait que, par définition, les quantités décomposées en un même temps sont proportionnelles aux intensités des courants.

Il reste à compléter l'étude de ces phénomènes et à étudier la manière dont se produit la décomposition, le résultat de la décomposition et les actions secondaires qui en résultent, enfin les lois de Faraday.

§ II. — DÉCOMPOSITION PAR ÉLECTROLYSE.

Si dans un vase V (fig. 172) on place une dissolution d'un sel métallique, et si l'on y fait passer le courant au moyen de deux électrodes A et C, on produit la décomposition du sel par électrolyse.

L'électrode A d'entrée s'appelle anode ; l'électrode C de sortie, cathode.

On observe que la décomposition s'effectue seulement au contact des deux électrodes A et C ; le milieu du liquide peut par suite des actions subséquentes dues à la

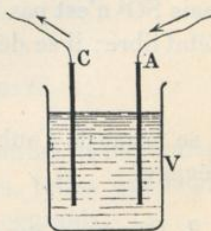


Fig. 172.

libération de certains corps subir des modifications, mais, au moins au début, il ne s'y produit aucun changement.

Le sel métallique est décomposé et le métal se dépose toujours sur la cathode C; le groupement restant se porte sur l'anode.

Par exemple le sulfate de soude SO^4Na^2 se sépare en Na^2 qui va sur C et SO^4 qui se porte sur A; la soude NaOH donne Na sur la cathode, OH sur l'anode.

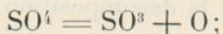
Si au lieu d'un sel métallique on électrolyse de l'eau acidulée, par l'acide sulfurique par exemple, l'acide est décomposé et l'hydrogène joue le rôle d'un métal. Dans l'acide sulfurique SO^4H^2 , H^2 se porte sur la cathode, SO^4 sur l'anode.

§ III. — ACTIONS SECONDAIRES.

L'électrolyse a séparé la molécule chimique en deux parties, mais ces deux parties peuvent soit se décomposer à leur tour, soit agir sur le dissolvant, soit attaquer les électrodes. Ces phénomènes consécutifs à l'électrolyse portent le nom d'actions secondaires.

1. *Décomposition des produits d'électrolyse.* — Soit du sulfate de potassium SO^4K^2 fondu; le courant va porter le potassium K^2 à la cathode, et SO^4 à l'anode.

K^2 se rassemble sous forme d'une gouttelette brillante; mais SO^4 n'est pas la formule d'un corps capable d'exister à l'état libre; il se décompose:



il se forme de l'anhydride sulfurique et de l'oxygène qui se dégage.

2. *Réactions sur le dissolvant.* — Soit l'électrolyse de l'acide sulfurique SO^4K^2 additionné d'eau; d'une part H^2 va à la cathode, SO^4 à l'anode.

L'hydrogène se dégage sans réagir sur l'eau; au contraire à l'anode le radical SO^4 produit une action:



L'oxygène se dégage.

Il se dégage donc en définitive : H^2 à la cathode, O à l'anode; l'acide sulfurique du mélange ne sert que d'intermédiaire et il en subsiste la même quantité. C'est l'eau qui subit une décomposition par suite des actions secondaires.

Quand nous avons dit en définissant le courant que l'eau était décomposée par l'électrolyse, nous n'avons considéré que le résultat; l'acide servant d'intermédiaire est électrolysé et l'eau n'est décomposée que par suite d'action secondaire.

3. *Réactions sur les électrodes.* — Si celles-ci sont susceptibles d'être attaquées par les produits soit de l'électrolyse, soit des actions secondaires, il se produit des réactions; des sels peuvent se former, se dissoudre et modifier la teneur du bain électrolytique.

Quand on veut observer les phénomènes indépendants de ces réactions sur les électrodes, on constitue celles-ci au moyen de substances peu attaquables telles que du platine ou du charbon.

Ces phénomènes sont utilisés par la galvanoplastie, le cuivrage, l'argenture, la dorure, etc.

§ IV. — LOIS DE FARADAY.

Nous avons déjà énoncé un certain nombre de lois concernant les décompositions électrolytiques, telles que la proportionnalité des effets à l'intensité du courant.

On constate également que le poids de sel décomposé est proportionnel au temps, si l'intensité du courant reste constante.

Il en résulte que les quantités de sel décomposées sont seulement fonction des quantités d'électricité qui ont traversé la dissolution.

Ainsi dans l'électrolyse de l'eau, un coulomb dégage 0 millig. 01036 d'hydrogène ; deux coulombs libéreraient 0 millig. 02072 d'hydrogène.

Si on place à la suite les uns des autres plusieurs voltmètres contenant des électrolytes différents, on peut étudier les relations entre les quantités décomposées dans chacun d'eux, puisqu'ils sont traversés par le même courant.

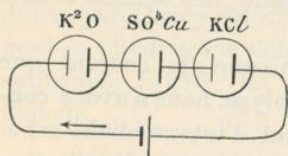


Fig. 173.

Soit par exemple, en série, de l'eau acidulée, une solution de

sulfate de cuivre, du chlorure de potassium fondu.

Les molécules H^2O , SO^4Cu , KCl correspondent à des poids respectifs :

$$H^2O : 2 \times 1 + 16 = 18 \text{ gr.}$$

$$SO^4Cu : 32 + 64 + 63 = 159 \text{ gr.}$$

$$KCl : 39 + 35,5 = 74 \text{ gr. 5.}$$

On constate que, lorsqu'il y a 74,5 grammes de KCl décomposés, il y a $\frac{159}{2} = 79,5$ grammes de SO^4Cu et $\frac{18}{2} = 9$ grammes d'eau décomposés.

Or la chimie classe le cuivre dans les corps divalents, le potassium dans les corps monovalents. H^2 dans l'eau est identique à un corps divalent.

S'il faut n coulombs pour décomposer une molécule d'un sel relatif à un métal monovalent, il en faudra $2n$ pour le sel du métal divalent ; on verrait de même qu'il faudrait $3n$ pour la molécule du métal trivalent.

En somme n coulombs est la quantité d'électricité qui libère une valence d'un métal quelconque.

On a vu que 1 coulomb libérait 0 millig. 01036 d'hydrogène ; H monovalent représentant 1 gramme sera donc libéré par $\frac{1.000}{0,01036} = 96.500$ coulombs.

Ce nombre, 96.500 coulombs, représente la quantité d'électricité nécessaire pour libérer une valence d'un métal quelconque, c'est-à-dire le poids moléculaire du métal divisé par sa valence; soit:

1 gr. d'hydrogène, 108 gr. d'argent, 31,5 gr. de cuivre, 39 de potassium, etc.

§ V. — POLARISATION D'UN VOLTMÈTRE.

FORCE CONTRE-ÉLECTROMOTRICE.

Soit un circuit PVG contenant une pile P, un ampère-mètre G, un voltmètre V. Connaissant la distance des électrodes du voltmètre, la résistivité de la dissolution saline, la surface des lames électrodes en regard, on peut calculer la résistance de la solution.

On peut savoir d'autre part les résistances respectives du galvanomètre, des fils du circuit, de la pile.

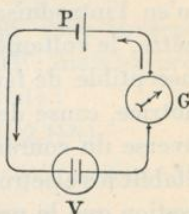


Fig. 174.

Si E est la force électromotrice de la pile, R la résistance totale du circuit, somme des résistances précédemment énumérées, on devrait avoir d'après la loi d'Ohm :

$$I = \frac{E}{R}.$$

Or on constate que l'intensité est plus faible; comme la résistance R n'est pas susceptible d'avoir varié, c'est comme si on avait introduit dans le circuit une force électromotrice, e en sens inverse de E:

$$I' = \frac{E - e}{R}.$$

La pile n'apas varié, ce ne peut donc être que le voltmètre qui par suite du passage du courant fait l'effet d'une force contre-électromotrice.

On dit qu'il y a polarisation du voltmètre.

On observe, en modifiant les surfaces des électrodes, leur distance, que e ne varie pas. Cette force contre-électromotrice n'est fonction que de la nature chimique et physique des électrodes et de l'électrolyte. Elle est donc sous ce rapport tout à fait analogue à la force électromotrice des piles.

On constate également que, si la force électromotrice de la pile E est inférieure à e force contre-électromotrice, le courant passe pendant un temps très court, nécessaire pour produire une polarisation des électrodes et s'annule complètement ensuite.

Enfin si après avoir intercalé le voltamètre dans un circuit tel que l'indique la figure 174, on le retire, on constate qu'en l'introduisant sur un circuit contenant un ampère-mètre, le voltamètre se comporte comme une véritable pile, susceptible de faire passer un courant; et la force électromotrice, cause de ce courant, tend à la faire passer en sens inverse du courant de polarisation. Ce courant secondaire rétablit les électrodes à leur état primitif et supprime la polarisation que le premier courant avait produite.

§ VI. — ACCUMULATEURS.

Les accumulateurs sont des appareils utilisant les propriétés de polarisation des électrodes dans les voltamètres; on commence par faire passer un premier courant qui modifie les électrodes; l'accumulateur devient alors une véritable pile susceptible à son tour de produire un courant dans un circuit fermé.

1. *Accumulateur Planté.* — Deux lames de plomb A , C sont placées dans un vase contenant de l'eau acidulée par l'acide sulfurique.

Lors de la charge, on fait passer un courant indiqué par les flèches (fig. 175). A forme anode, C cathode. Lors de la décharge le courant a le sens indiqué sur la figure 176.

1^{re} Charge. — L'hydrogène se dégage sur C et va dans l'atmosphère. L'oxygène sur A produit de l'oxyde :

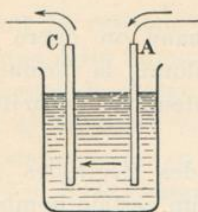
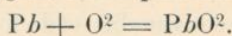


Fig. 175.

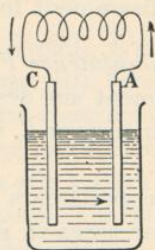
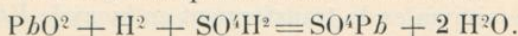
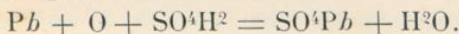


Fig. 176:

1^{re} Décharge. — Le courant passe en sens inverse, l'hydrogène va sur A et réduit l'oxyde PbO^2 ; mais en présence de l'acide sulfurique il donne du sulfate :

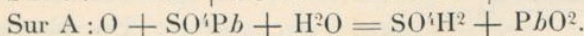
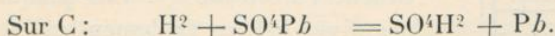


Sur C l'oxygène donne aussi du sulfate en présence de l'acide sulfurique :



Après la première décharge il y a donc du sulfate sur les plaques.

2^e Charge. — C'est le sulfate qui cette fois est décomposé :



On voit que, tant qu'il y aura du sulfate à décomposer, il n'y aura pas de dégagement gazeux.

Quand tout le sulfate sera transformé, d'une part en oxyde PbO^2 , d'autre part réduit en plomb, le plomb sera à son tour oxydé et il y aura des dégagements d'hydrogène comme à la première charge.

La deuxième décharge produit les mêmes effets que la première en formant du sulfate sur les deux électrodes.

Par des charges et décharges nombreuses, on rend le plomb poreux, on forme du sulfate susceptible de se décomposer par une charge convenable et de fournir un courant de durée suffisamment longue.

2. *Accumulateurs Faure.* — Quand on opère comme précédemment sur des lames de plomb, la formation est lente pour arriver à un accumulateur de capacité suffisante.

Les accumulateurs Faure ont des électrodes formées par des carcasses en plomb ayant un certain nombre d'alvéoles où on dépose une matière active.

Au pôle positif on met du minium (Pb^3O^4) délayé avec de l'eau et de l'acide sulfurique ; au pôle négatif, de la litharge (PbO) délayée avec de l'eau et de l'acide.

La 1^{re} charge réduit la litharge à l'état de plomb, et oxyde le minium en le transformant en bioxyde PbO^2 .

Le résultat est le même que dans le cas des plaques en plomb Planté, mais toute la masse de la pâte contribue aux réactions.

3. *Installation des accumulateurs.* — Un certain nombre

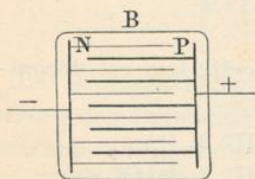


Fig. 177.

de plaques sont disposées parallèlement dans un bac ; les plaques positives sont reliées ensemble et constituent l'électrode +. Les plaques négatives reliées également constituent l'électrode -. Les plaques sont très rapprochées, mais séparées cependant par des baguettes en verre qui empêchent qu'elles ne se touchent.

Une batterie d'accumulateurs est constituée par un certain nombre de bacs qui peuvent être associés comme des éléments de pile.

4. *Charge d'une batterie.* — Si e est la force contre électromotrice de la batterie, il faut un générateur d'électricité

ayant une force électromotrice $E > e$. Le courant de charge sera :

$$I = \frac{E - e}{R},$$

R étant la résistance totale du circuit. L'expérience montre que cette intensité I ne doit pas être forte.

Au début de la charge la force contre-électromotrice d'un élément est environ 1 v. 8; elle s'élève rapidement à 2 v. 1 et reste stationnaire; en fin de charge elle s'élève brusquement à 2 v. 5; la charge est alors finie et il se produit des bouillonnements provenant des dégagements gazeux.

5. *Décharge.* — La force électromotrice de décharge est 2 v. 1 au début et tombe rapidement à 1 v. 9. A la fin elle tombe à 1 v. 85; on doit cesser alors la décharge, sous peine d'altérer les plaques.

L'intensité du courant de décharge ne doit pas être trop forte, autrement on détériorerait les plaques; cependant elle peut être plus grande que celle de la charge.

6. *Précautions à prendre avec les accumulateurs.* — Indépendamment des précautions relatives à l'intensité des courants de charge et décharge déjà indiquées, il faut prendre des précautions dans les locaux contenant les batteries, en raison des dégagements d'hydrogène et oxygène qui forment des mélanges détonants.

Il faut éviter d'y introduire des objets enflammés et d'y placer des interrupteurs ou des appareils pouvant donner des étincelles.

7. *Rendement des accumulateurs.* — Si le courant de charge est d'intensité I , la différence de voltage aux bornes de la batterie étant V , la capacité en travail électrique de la batterie est :

$$W_1 = \int_0^{t_1} IV dt;$$

t_1 étant la durée de la charge.

De même le travail fourni à la décharge sera :

$$W_2 = \int_0^{t_2} I'V' dt.$$

Le rapport $\frac{W_2}{W_1}$ est le rendement de la batterie ; il peut atteindre 90 %.

CHAPITRE V

Aimants et champs magnétiques

§ I. — AIMANTS PERMANENTS ET TEMPORAIRES.

Chacun sait qu'un aimant est un morceau de métal ou de minéral métallique qui attire la limaille de fer ; on peut classer les différents aimants en trois catégories :

1° Les aimants permanents naturels, qui sont des morceaux de minerais de fer jouissant de cette propriété d'attraction ; il en existe parfois des masses considérables dans le sol (Espagne, Suède) capables de fausser les indications de la boussole.

2° Les aimants permanents artificiels constitués par un barreau d'acier auquel on donne la propriété d'aimantation en

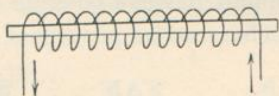


Fig. 178.

le plaçant au centre d'une série de spires où circule un courant : une telle bobine (fig. 178) constitue un *solénoïde*. Le morceau d'acier soumis à son action devient, une fois retiré du solénoïde, capable d'attirer la limaille de fer.

3° Les aimants temporaires sont constitués par un morceau de fer doux qui, placé dans certaines conditions que nous verrons plus loin, possède la faculté d'attirer la limaille ; si on le retire de ces conditions, il perd cette propriété.

§ II. — PÔLES NORD ET SUD.

Si nous suspendons au fil F, n'opposant aucune résistance à la torsion, un aimant NS, ce dernier s'oriente dans une

position bien déterminée par rapport au méridien géographique et au plan horizontal.

Une extrémité du barreau se dirige à peu près vers le nord géographique et, quelque mouvement qu'on imprime au barreau, tend toujours à revenir dans cette direction. On lui donne le nom de *pôle Nord* ; l'autre extrémité porte le nom de *pôle Sud*.

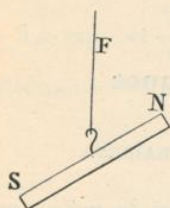


Fig. 179.

Tout barreau aimanté, d'une façon permanente ou temporaire, possède des pôles Nord et Sud.

Si, laissant notre premier barreau suspendu (fig. 179) nous en approchons un autre, on constate que les pôles de même nom se repoussent et que les pôles de nom contraire s'attirent.

Si donc de N nous approchons le pôle N du 2^e barreau, le premier s'orientera de façon que les pôles de nom contraire s'écartent. Si on approche le pôle S du 2^e barreau de N, cette extrémité N tendra à se rapprocher.

On constate que tout barreau possède deux pôles ; on ne peut pas obtenir un barreau ne possédant qu'un seul pôle.

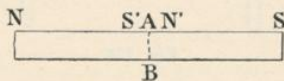


Fig. 180.

Soit en effet un barreau NS (fig. 180) ; brisons-le au milieu en AB, il se formera des deux côtés de la coupure en N' et S' deux pôles tels que les deux barreaux résultants NS', N'S possèdent chacun les deux espèces de pôles.

§ III. — LOIS DES ATTRACTIONS ET RÉPULSIONS MAGNÉTIQUES.

Ces phénomènes ont été étudiés par Coulomb ; on constate d'abord que les forces qui s'exercent entre les pôles sont

plus ou moins fortes suivant les barreaux employés et suivant la distance.

Coulomb supposait qu'il existait à chaque extrémité des barreaux une masse magnétique qui suivant sa grandeur produisait des attractions ou répulsions plus ou moins intenses.

Les lois qu'il énonça s'appliquent au cas de masses magnétiques isolées ; on a vu qu'il était impossible de les séparer, il faut donc supposer qu'on opère sur des barreaux très longs, tels que les masses situées à l'extrémité non considérée n'aient qu'une influence négligeable.

On remarque aussi que, si on modifie la distance NS, les attractions et répulsions varient comme l'inverse du carré de la distance.

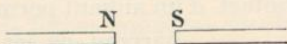


Fig. 181.

Si une masse N qu'on laissera constante provoque sur des masses S placées à une distance constante SN (fig. 181) des actions f , $2f$, $3f$..., on dira que les masses S ont des valeurs m , $2m$, $3m$...

En définitive la loi de Coulomb s'énonce ainsi :

Deux pôles magnétiques s'attirent ou se repoussent en raison inverse du carré de leur distance et en raison directe du produit de leurs masses magnétiques.

L'expression analytique de cette loi sera :

$$F = K \frac{mm'}{r^2}.$$

m , m' étant les masses magnétiques, r la distance qui les sépare, K un coefficient qui dépendra des unités choisies.

1. Il faut supposer les masses concentrées en un point, ou à distance suffisante pour que leurs dimensions deviennent négligeables par rapport à la distance. Car en fait la masse n'est pas localisée en un point mais toute l'extrémité du barreau jouit des propriétés magnétiques

On définit d'après ces actions l'Unité de masse magnétique : c'est la masse qui sur la masse égale placée à 1 centimètre produit une force de 1 dyne.

On voit que cette définition correspond au système CGS. En outre ces unités conduisent à un coefficient $K = 1$.

Par suite, la formule représentative de la loi de Coulomb, en employant les unités CGS, s'écrit :

$$F \text{ (dynes)} = \frac{m m'}{r^2},$$

$m m'$ évalués en unités de masses magnétiques, r en centimètres.

§ IV. — AIMANTATION PAR INFLUENCE. SPECTRES MAGNÉTIQUES.

Si on met au contact d'un aimant permanent NS un petit barreau de fer doux sn , celui-ci est attiré et l'on constate qu'il se forme deux pôles magnétiques, s au contact de N et n' à l'opposé (fig. 182).

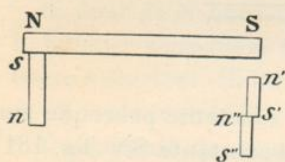


Fig. 182

L'attraction du fer doux par l'aimant n'est donc qu'un cas particulier de l'attraction des aimants ; le fer doux devient lui-même un aimant. C'est une des manières de produire l'aimantation temporaire du fer.

Si, au lieu d'être au contact, le barreau de fer est à distance, $n's'$ devant S, par exemple, le même phénomène se produit ; le pôle n' se forme au voisinage de S et le pôle s' à l'opposé. Un deuxième barreau peut s'aimanter aussi, $n'' s''$, en suivant les mêmes lois.

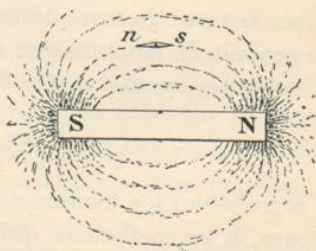


Fig. 183.

C'est grâce à ce phénomène qu'on peut produire les

Spectres magnétiques (fig. 183) : posons sur un barreau aimanté un carton mince que nous saupoudrerons de limaille de fer. Les grains de limaille se touchent et s'orientent à la suite les uns des autres pour former des lignes continues qui constituent le spectre.

Si maintenant nous plaçons une petite aiguille aimantée suspendue à un fil fin en *ns*, on constate qu'elle s'oriente tangentiellement à la ligne de limaille.

Cela n'a rien d'étonnant, puisque, par influence, les grains de limaille constituent de petits aimants : l'aiguille aimantée s'oriente comme eux.

§ V. — CHAMPS MAGNÉTIQUES.

1. *Définition.* — Tout espace où les masses magnétiques subissent l'action de forces constitue un champ magnétique. Ainsi, à la surface de la terre, les barreaux s'orientent sous l'action de ces forces ; c'est le champ dit champ magnétique terrestre. Au voisinage d'un barreau aimanté NS (fig. 183) une petite aiguille *ns* subit l'action de forces qui l'orientent, tout l'espace environnant NS constitue donc un champ magnétique.

2. *Direction du champ. Lignes de Force.* — On appelle direction d'un champ magnétique en un point, la direction que prend une petite aiguille aimantée suspendue en ce point. Ainsi dans l'exemple précédent (fig. 183) *ns* est la direction du champ en ce point.

On a vu que la ligne de limaille passant en *ns* était tangente à la direction de l'aiguille ; on généralise cette idée en définissant la *ligne de force* :

C'est une ligne (représentée réellement par la limaille ou purement géométrique) qui est en tous ses points tangente à la direction du champ.

Si donc on connaît les lignes de force d'un champ, on aura la direction du champ en un point en menant la tangente à la ligne de force qui passe par ce point.

On définit le sens d'une ligne de force ; c'est le sens qui va du pôle sud au pôle nord de la petite aiguille ns ; c'est le sens indiqué par la flèche (fig. 184) et celui que suivrait la masse magnétique nord supposée isolée et placée en ns , sous l'action de la force créée par le champ.

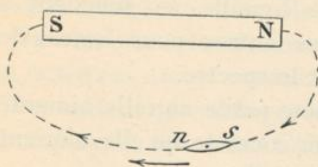


Fig. 184.

3. *Intensité du champ.* — Un champ magnétique est plus ou moins intense ; on dit qu'un champ magnétique a, en un point, une intensité égale à l'unité quand la masse magnétique unité placée en ce point subit une action égale à une dyne. Cette unité se nomme le Gauss.

La force subie par une masse m évaluée en unités de masses magnétiques, dans un champ d'intensité h évaluée en Gauss, est donc :

$$f \text{ (dynes)} = m \times h.$$

4. *Champ magnétique uniforme.* — Quand dans un certain espace toutes les lignes de force sont parallèles, l'intensité du champ étant constante, le champ est dit uniforme. Ainsi dans un espace assez considérable on peut considérer le champ magnétique terrestre comme uniforme. Si on envisageait l'ensemble de la surface du globe, il ne serait évidemment pas uniforme, mais dans un espace de plusieurs kilomètres carrés, s'il n'y a pas de masses magnétiques troublant le champ, les directions prises par l'aiguille aimantée sont parallèles et les actions égales. On peut y considérer le champ comme uniforme.

§ VI. — ACTION D'UN CHAMP MAGNÉTIQUE UNIFORME SUR UN BARREAU AIMANTÉ.

Soit un barreau NS placé dans un champ magnétique uniforme de direction D et d'intensité h ; le barreau est sus-

pendu par son centre de gravité A et on sait qu'on ne peut séparer les masses magnétiques N et S qui constituent ses pôles. On constate en outre que ces masses sont égales.

Par suite les masses N et S subissent des actions f et f' égales en intensité : mh et contraires en direction.

Le barreau se trouve ainsi soumis à l'action d'un couple f, f' qui tend à le faire tourner autour de A et non à le déplacer.

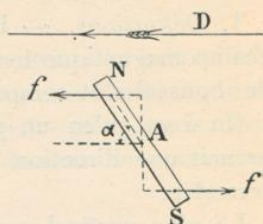


Fig. 185.

L'action d'un champ uniforme se réduit donc à un couple.

Ce couple tend à orienter le barreau dans la direction du champ ; si l est la longueur NS, ce couple, pour une direction α du barreau, a pour valeur :

$$fl \times \sin \alpha ; \text{ or } f = m h ;$$

donc le couple est :

$$hml \sin \alpha.$$

Il s'annule quand le barreau est dirigé suivant D ; ml est une constante du barreau qu'on désigne souvent par la lettre M et qu'on appelle *moment magnétique* du barreau.

§ VII. — AIMANTATION PAR INFLUENCE DANS UN CHAMP.

Si dans un champ de direction D on place un barreau de fer doux F, ce barreau s'aimante par influence, le pôle Nord se formant à l'extrémité N, le pôle Sud en S, tels que la direction SN soit celle du champ.

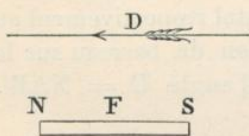


Fig. 186.

Cela explique l'aimantation par influence au voisinage ou au contact des barreaux aimantés ; d'ailleurs tous les phénomènes particuliers précédemment exposés sont explicables par la notion du champ : attractions, orientations, etc.

§ VIII. — CHAMP MAGNÉTIQUE TERRESTRE.

1. *Définitions.* — Le plus important des champs est le champ magnétique terrestre, puisqu'il produit l'orientation des boussoles et compas.

On a vu qu'en un point déterminé un barreau aimanté prenait une direction sous l'action du champ magnétique terrestre.

Le plan vertical passant par l'axe du barreau constitue le *Méridien magnétique*; il ne coïncide pas exactement avec le méridien géographique et l'angle que font ces deux plans se nomme *Déclinaison*. La Déclinaison est orientale ou occidentale suivant que le pôle Nord de l'aiguille se place à l'Est ou à l'Ouest du méridien géographique.

Mais, d'autre part, le barreau aimanté ne se place pas dans un plan horizontal; on appelle *Inclinaison* l'angle qu'il fait avec le plan horizontal.

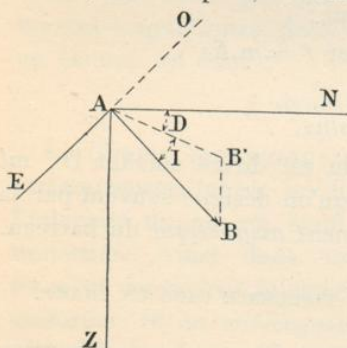


Fig. 187.

Si, par exemple, nous représentons la direction de l'aiguille aimantée AB par rapport au système de coordonnées rectangulaires : AZ dirigée vers le nadir; AN et AE dirigées dans le plan horizontal respectivement au

Nord et à l'Est; AB' étant la projection du barreau sur le plan horizontal, la déclinaison sera l'angle $D = NAB'$, orientale, et l'inclinaison $I = BAB'$.

2. *Variations de la déclinaison.* — On la connaît à Paris depuis 1580; elle était alors orientale et égale à $11^{\circ} 30'$. Elle a diminué et s'est annulée en 1666; puis elle a passé à l'ouest et a atteint le maximum $20^{\circ} 34'$ occidentale en 1814; depuis elle revient vers l'est.

Elle n'est pas la même en tous les points du globe et change même de sens ; les cartes marines et instructions portent les valeurs de la Déclinaison pour les différents points du globe.

En outre, la déclinaison subit des variations annuelles, diurnes, et des perturbations au maximum de $20'$, qui ne sont constatées qu'avec des appareils très précis. Les aurores boréales en particulier produisent des perturbations.

3. *Variations de l'Inclinaison.* — Elle varie aux différents points du globe ; dans certains points le pôle S est au-dessous de l'horizon ; à d'autres, il est au-dessus. Vers le pôle nord il existe des régions où l'aiguille est verticale, l'inclinaison atteint 90° .

A Paris en 1671 elle était de 75° . Depuis elle a diminué. Au 1^{er} janvier 1893, elle était de $65^\circ 8' 5''$; elle était alors en diminution constante de $3' 3''$ par année.

C'est le pôle S de l'aiguille qui, dans notre hémisphère, plonge au-dessous du plan horizontal.

4. *Valeur de l'Intensité du champ magnétique terrestre.*

— On peut rechercher directement la valeur h du champ terrestre, ou bien mesurer séparément H et V , ses composantes horizontales et verticales. C'est cette dernière méthode qui est généralement employée.

Au 1^{er} janvier 1893, les valeurs étaient :

$$H = 0 \text{ gauss } 196 ;$$

$$V = 0 \text{ gauss } 423 ;$$

$$h = 0 \text{ gauss } 466.$$

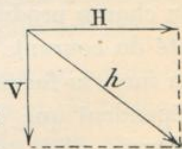


Fig. 188.

CHAPITRE VI

Électrodynamique. Action des courants et des champs.

§ I. — CHAMPS CRÉÉS PAR LES COURANTS.

Si nous suspendons une aiguille aimantée par son centre de gravité, elle va s'orienter suivant la direction du champ terrestre ; un fil de cuivre placé au voisinage n'étant pas susceptible de s'aimanter ne troublera pas l'aiguille : mais, si on fait passer un courant électrique dans ce fil, l'aiguille sera déviée, ce qui montre que le passage de ce courant a créé un champ (Expérience d'Ørsted).

En examinant les spectres qu'on peut produire au moyen de la limaille, ou d'une manière plus rigoureuse, au moyen de petites aiguilles aimantées, on constate que la direction du champ produit par le courant ne varie pas avec l'intensité du courant, si le circuit électrique reste invariable. En un mot, la forme et la disposition des lignes de force ne dépendent que de la forme géométrique du circuit électrique.

Si on fait varier l'intensité du courant, si on le renverse, on constate que l'intensité du champ varie elle aussi, que le sens des lignes de force change. En effectuant des mesures, on trouve que l'intensité du champ en un point quelconque varie proportionnellement à l'intensité du courant.

On voit donc que le courant électrique est susceptible de produire des actions mécaniques sur les aimants, tout comme les aimants.

§ II. — CHAMP D'UNE BOBINE ANNULAIRE.

1. *Forme de champ.* — Soit un fil enroulé en anneau A ; on le fait parcourir par un courant de sens indiqué par les flèches f, f' ; on peut, au moyen d'une petite aiguille aimantée, étudier la forme des lignes de force ; on voit qu'elles forment des courbes fermées telles que l'indique la figure 189.

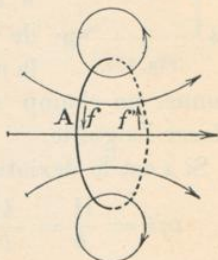


Fig. 189.

L'aiguille aimantée placée au centre de l'anneau tendra à se mettre perpendiculaire à cet anneau.

Quant au sens des lignes de force, on peut le trouver facilement par la Règle d'Ampère : un observateur couché sur le courant de façon que celui-ci le parcoure des pieds à la tête, voit les lignes de force aller de sa droite vers sa gauche ¹.

Si on change l'intensité du courant, la forme des lignes de force ne change pas, comme on l'a dit au § I ; si, au lieu d'une seule spire de fil, on en met plusieurs, on ne change pas sensiblement non plus leur forme : n spires donnent un champ d'intensité n fois plus grande ; c'est comme si on avait envoyé dans le fil unique un courant n fois plus intense.

2. *Galvanomètre.* — On base sur ce principe un appareil destiné à la mesure des courants et dit *Galvanomètre* ; au centre d'une bobine assez grande et très plate G (fig. 190), on place une petite aiguille AB aimantée.

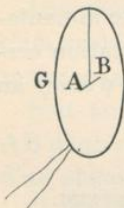


Fig. 190.

En orientant le cadre G dans le plan du méridien magnétique, l'aiguille AB se mettant dans ce plan sous l'action du champ terrestre vient dans le plan du cadre. Si on lance un courant dans l'appareil, il produit un champ qui dévie l'aiguille et tend à la mettre perpendiculaire au cadre.

1. Il ne faut pas considérer la règle d'Ampère comme autre chose qu'une règle mnémotechnique très commode.

De l'angle que fait l'aiguille avec le plan du cadre, on déduit la valeur de l'intensité du courant. On constate en effet que le champ terrestre h , représenté par le vecteur oh , et le champ de la bobine, OH , se composent suivant la règle du parallélogramme (fig. 191) pour donner un champ résultant OH' suivant lequel vient se placer l'aiguille.

Si α est la déviation de l'aiguille :

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{H}{h} = \frac{kI}{h} ; \text{ on peut calculer les déviations ou}$$

graduer l'appareil en y faisant passer des courants d'intensité connue.

3. *Champ d'un solénoïde.* — Nous avons déjà eu l'occasion de parler des solénoïdes ; dans cette bobine longue (fig. 192) il se forme un champ analogue à celui de l'anneau (fig. 189).

On voit donc la raison pour laquelle un morceau de fer doux placé dedans prend une aimantation ; c'est qu'il est situé dans un champ ; tant que le courant passera, il y aura champ, par suite aimantation. Quand le courant cessera de passer, l'aimantation cessera ; elle subsisterait si on employait un barreau d'acier au lieu de fer doux.

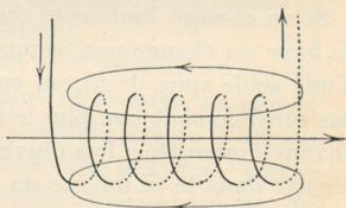


Fig. 192.

§ III. — CHAMP D'UN COURANT RECTILIGNE INDÉFINI.

On constate que les lignes de force sont des cercles de plan perpendiculaire au courant.

On trouve le sens de ces lignes par la règle déjà indiquée du bonhomme d'Ampère ; dans le cas de la figure 193 le sens

est de droite à gauche en arrière de la figure, de gauche à droite en avant.

On voit qu'une masse magnétique nord placée en M

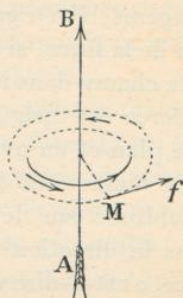


Fig. 193.

subit une force f perpendiculaire au plan MAB (en supposant évidemment la masse isolée).

§ IV. — ACTION D'UN CHAMP MAGNÉTIQUE SUR UN COURANT.

Nous avons vu jusqu'ici la production de champs, soit par les aimants, soit par les courants électriques, mais nous n'avons parlé que de leurs actions sur les masses magnétiques.

Les champs ont également de l'action sur les courants ; c'est cette action que nous allons étudier maintenant.

Soit un élément d'un courant rectiligne AB d'intensité I ; il est soumis à l'action d'un champ H .

Il résulte une force qui tend à déplacer le courant perpendiculairement au plan ABH et qui est proportionnelle à l'intensité I du courant, à l'intensité H du champ, à la longueur $l = AB$ de l'élément de courant, au sinus de l'angle α des directions du courant et du champ.

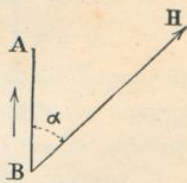


Fig. 194.

En mesurant cette force, on trouverait :

$$f \text{ (dynes)} = \frac{1}{10} I l H \sin \alpha,$$

I étant exprimé en ampères, H en gauss, l en centimètres.

Quant à la direction de la force, si on suppose le courant et le champ dans le plan de la figure 195, la force est dirigée perpendiculairement à ce plan et en avant.

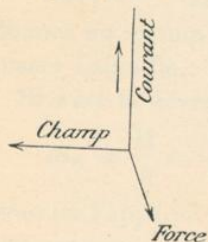


Fig. 195.

Le bonhomme d'Ampère placé comme d'habitude sur le courant et regardant dans la direction où vont les lignes de force, c'est-à-dire vers la gauche (fig. 195), voit la force aller vers sa gauche.

Cette règle permet de retrouver facilement le sens de la force.

On en déduit l'action réciproque de deux courants rectilignes :

Soient (fig. 196) deux courants AB , $A'B'$ rectilignes et de même sens ; le courant AB donne en un point M du

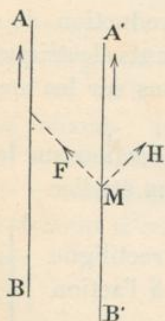


Fig. 196.

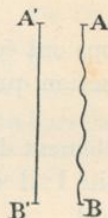


Fig. 196 bis.

courant $A'B'$ un champ H . Sous l'action de ce champ H le courant $A'B'$ subit une action dirigée perpendiculairement au plan $H-AB$, par suite action située dans le plan $AB-A'B'$.

La règle du bonhomme d'Ampère, placé suivant $B'A'$ regardant vers H et ayant F dirigé à gauche, montre que F tend à rapprocher les deux courants AB , $A'B'$.

Donc deux courants parallèles et de même sens s'attirent. On trouverait de même que deux courants parallèles et de sens contraires se repoussent.

On trouverait d'une manière analogue les lois relatives à des courants rectilignes formant un certain angle.

Enfin, on montre expérimentalement que l'action d'un courant sinueux AB est la même que celle du courant rectiligne $A'B'$ ayant mêmes extrémités.

§ V. — APPLICATION AUX AMPÈREMÈTRES ET VOLTMÈTRES.

Si entre les branches d'un aimant NS en fer à cheval on place un cadre C , suspendu entre deux points A , B , sous l'action du courant qui y circulera, le cadre subira des déplacements, des rotations autour de AB ; on pourra graduer cet appareil et faire des lectures.

En général, le cadre est tenu par un fil métallique entre A et B qui s'oppose à la rotation; c'est par la composition de cette torsion et de l'action électrodynamique que le cadre atteint une position d'équilibre.

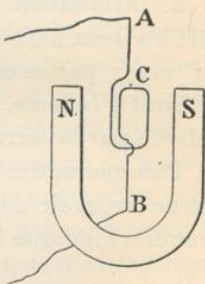


Fig. 197.

On ne se préoccupe pas en général d'orienter l'appareil dans le plan du méridien magnétique, car l'action du champ terrestre sur le courant est négligeable vis-à-vis des actions réciproques du champ créé par l'aimant et du courant.

D'autres appareils peuvent servir de voltmètres et d'ampèremètres; ils sont toujours basés sur les actions produites par des champs sur des aimants permanents ou temporaires ou sur des courants.

§ VI. — APPLICATION A LA TÉLÉGRAPHIE.

1. *Principe.* — La télégraphie est basée sur l'emploi des électro-aimants.

Un électro-aimant est constitué par une ou plusieurs, généralement deux, bobines de fer doux B et B' entourant les branches d'une armature A en forme d'U. Devant l'armature un morceau de fer C maintenu par un ressort R peut être attiré par elle quand le courant, circulant dans les bobines, produit l'aimantation.

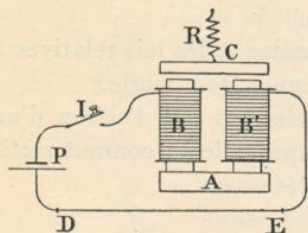


Fig. 198.

Un interrupteur I permet de lancer le courant d'une pile P dans le circuit.

2. *Installation.* — Dans le télégraphe on n'emploie qu'un fil; les deux extrémités sont mises en communication avec la terre; par exemple, dans la figure 198, les points D et E sont à la terre, la partie du fil DE est supprimée et remplacée par la terre.

Pour permettre à deux stations de s'envoyer mutuellement et de recevoir des dépêches, les appareils sont installés comme l'indique la figure 199.

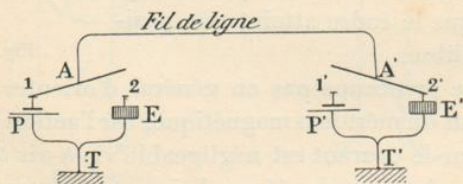


Fig. 199.

De A à A' est le fil de ligne qui peut être branché à chaque poste soit en 1 sur la pile, soit en 2 sur l'électro-aimant récepteur.

Dans le cas de la figure, le courant de la pile P passe dans le récepteur E', au moyen du circuit P, A, ligne, A',

P' , T' , terre, T , P . Donc par des interruptions produites en 1, on fait battre le fer C de l'électro E' et on transmet du poste de gauche au poste de droite.

L'appareil récepteur est constitué comme l'indique la figure 200 ; l'électro E attire le morceau de fer C et fait basculer le levier Cr maintenu par le ressort R ; dans ce mouvement une roulette r , garnie d'encre, vient appuyer sur une bande de papier qui se déroule sur une roulette r' vis-à-vis de r .

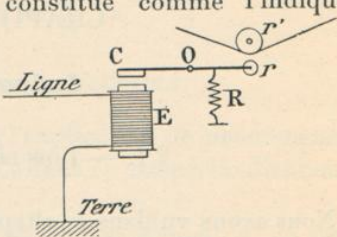


Fig. 200.

Suivant qu'on lance le courant plus ou moins longtemps, on produit des traits ou des points dont les combinaisons servent à constituer un alphabet spécial.

Ce système est le système Morse.

Sonnerie à trembleur. — L'électro-aimant E attire le fer C tenu sur une lame flexible L . Quand le courant passe, C est attiré et le marteau M frappe le timbre T ; mais le courant passe par la lame L et par un contact A qui, lorsque C est allé vers la gauche, se trouve interrompu. Plus de courant, donc plus d'attraction et C retombe après avoir frappé une fois le timbre : le courant repasse par le contact

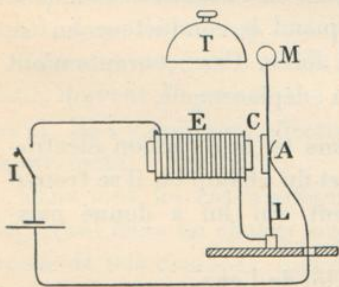


Fig. 201.

contact A rétabli à nouveau : nouvelle attraction, nouveau coup mais nouvelle interruption, etc.

Donc tant que l'interrupteur I sera fermé, on aura une sonnerie continue du timbre T , au lieu d'un seul coup qu'on aurait sans le dispositif A .

Cette sonnerie est généralement employée pour les appels de télégraphe et de téléphone, les sonneries de signaux de bord, les sonneries d'appartement, etc.

CHAPITRE VII

Induction.

§ I. — LOIS DE L'INDUCTION.

Nous avons vu dans le chapitre précédent que deux courants placés au voisinage l'un de l'autre subissaient des efforts tendant à les mettre en mouvement ; réciproquement, si dans un champ magnétique on déplace un conducteur, il s'y produit des forces électromotrices tendant à y faire circuler un courant. Ce phénomène porte le nom d'induction et les courants sont appelés courants induits. On peut énoncer relativement à ces phénomènes les lois suivantes :

1. Quand dans un champ magnétique on déplace un conducteur il s'y produit des forces électromotrices tendant à y faire circuler un courant quand le conducteur en se déplaçant coupe des lignes de force. Ces courants n'ont qu'une durée égale à celle du déplacement.

2. Le courant produit a un sens tel que l'action électromagnétique qu'il reçoit de la part du champ où il se trouve tend à s'opposer au déplacement qui lui a donné naissance.

Cette dernière loi est appelée loi de Lenz.

On constate que la force électromotrice d'induction est proportionnelle à la vitesse de déplacement.

Si, par exemple, dans un certain déplacement d'un circuit de résistance R , effectué en un temps t , on observe une intensité I , c'est que la force électromotrice E d'induction est :

$$E = \frac{I}{R}.$$

Si le déplacement est effectué dans le temps $\frac{t}{2}$ on observe $2I$, d'où :

$$E' = 2E = \frac{2I}{R}.$$

§ II. — COURANTS DE FOUCAULT.

Il en résulte immédiatement l'explication de phénomènes dus à des courants qu'on appelle dans ce cas particulier courants de Foucault.

Si entre les branches N, S d'un électro-aimant A on fait tourner autour d'un fil F une masse de cuivre C, on constate que, sitôt que le courant passe dans les bobines de l'électro, la masse de cuivre cesse de tourner.

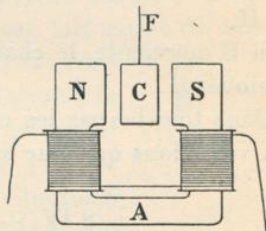


Fig. 202.

Il s'est produit dans la masse de cuivre C des courants induits, puisqu'elle subissait un mouvement dans le champ produit entre N et S.

Ces courants, qu'il est difficile d'évaluer quant à leur grandeur, doivent d'après la Loi de Lenz s'opposer au mouvement. Ils s'y opposent effectivement et suffisent à arrêter le mouvement.

Dans tous les cas analogues de masses métalliques se déplaçant dans un champ magnétique, il se produit dans la masse de tels courants, dits courants de Foucault, qui font un freinage énergétique. Dans certains cas on est obligé pour réaliser des déplacements dans un champ intense d'employer des artifices; on en voit un exemple dans la construction des dynamos.

§ III. — COURANTS INDUITS DUS AUX VARIATIONS DU CHAMP SANS DÉPLACEMENTS.

Soit un circuit ABC comprenant un ampèremètre A et placé dans un champ uniforme de grandeur et de direction H.

On peut produire des courants induits autrement que par les déplacements du circuit.

En effet, en modifiant la valeur du champ ou sa direction, on produit dans le circuit des courants induits.

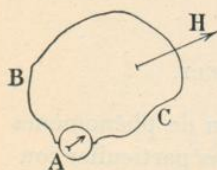


Fig. 203.

Ces courants ont un sens qu'on peut fixer par une loi analogue à la loi de Lenz; en effet ces courants induits circulant dans un circuit ABC créent un champ h , qui se compose avec le champ H .

Si H diminue, le champ h qui en résulte tend à augmenter H .

Si H augmente, le champ h est en sens inverse et tend à diminuer H .

Dans tous les cas les champs induits tendent à s'opposer aux variations qui leur ont donné naissance.

§ IV. — SELF INDUCTION.

Soit un circuit PAI contenant une pile et un interrupteur I; quand le courant y circule, il crée un champ.

Donc quand, l'interrupteur I étant ouvert, on veut le fermer on produit l'établissement de ce champ; ce champ ayant un accroissement (de 0 à sa valeur normale), produit un courant d'induction qui, d'après ce qu'on a vu, tend à s'opposer à son établissement; il est opposé au courant normal.

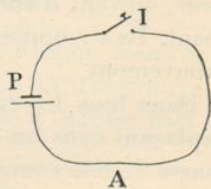


Fig. 204.

A la fermeture d'un circuit il se produit donc un courant d'induction dit de self induction de fermeture qui retarde l'établissement du courant.

Si au contraire on ouvre l'interrupteur I, la diminution du champ (de sa valeur normale à 0) produit un courant induit qui tend à rétablir le champ, donc il est de même sens que le courant normal. C'est le courant de self induction d'ouverture.

Ce dernier est le plus fort des deux et, dans le cas de circuits qui produisent un champ magnétique considérable, il peut être beaucoup plus fort que le courant normal. Cela a pour effet de donner une étincelle de rupture plus forte que l'étincelle de fermeture ; c'est ainsi que les roues des tramways par lesquelles passe le courant ont des étincelles derrière elles, à la rupture, et non devant, à la fermeture.

§ V. — APPLICATION DES PHÉNOMÈNES D'INDUCTION
AU TÉLÉPHONE.

1. *Téléphone de Bell.* — Un barreau aimanté A porte une bobine B dont l'enroulement est fait en fil de cuivre ; les deux extrémités de ce fil (1)-(2) sont reliées à un appareil identique. Devant la bobine se trouve une plaque de métal mince P.

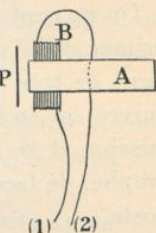


Fig. 205.

Si l'on parle devant P, les vibrations sonores produisent des vibrations de P qui modifient le champ magnétique du barreau A ; il en résulte des courants induits qui sont transmis à un appareil identique par les fils (1) et (2). Ces courants produisent dans le second appareil des variations d'aimantation du barreau A, et par suite des attractions et des répulsions de la plaque semblable à P. Ces mouvements vibratoires qui se produisent au second appareil reproduisent, en faisant vibrer l'air, les vibrations sonores émises devant P. Il y a donc transmission de la parole à distance.

2. *Microphone.* — Cet appareil donne de faibles courants d'induction et ne peut servir aux transmissions à longue distance. Tous les appareils téléphoniques actuels emploient des transmetteurs microphoniques.

Sous une planchette légère Q sont fixés deux blocs de charbon B, B' entre lesquels est tenue une série de crayons de charbon C.

Le courant d'une pile R traverse le microphone et le circuit se ferme sur un récepteur de Bell, tel qu'il a été décrit précédemment, ou sur un appareil analogue constitué par un aimant en fer à cheval.

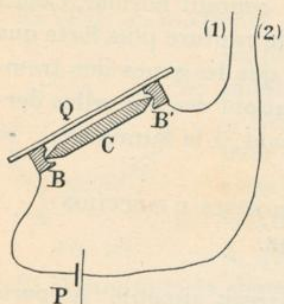


Fig. 206.

Les vibrations produites par la voix modifient les contacts sur B et B', font varier la résistance et par suite l'intensité du courant.

Il en résulte des mouvements de la plaque P qui reproduisent les sons émis devant Q.

On ne peut pas, comme dans le cas des télégraphes, supprimer un fil de ligne; il faut deux fils et encore avoir une ligne de très faible résistance; aussi ces fils sont faits en cuivre ou en bronze. On combine les appareils de transmission et de réception comme on a indiqué pour le télégraphe, de façon à pouvoir envoyer et recevoir de chaque poste.

§ VI. — BOBINE DE RUHKORFF.

Un premier circuit appelé *primaire* est composé par un

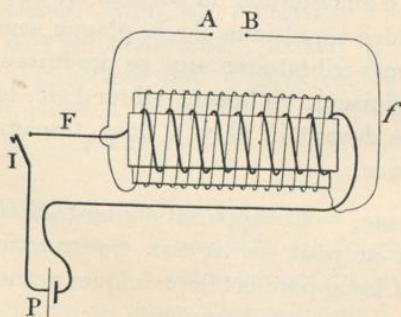


Fig. 207.

nombre peu élevé de spires F d'un fil de cuivre assez gros, où circule le courant d'une pile P.

Autour de ce primaire est enroulé un grand nombre de fois un fil fin f ; sur certaines grosses bobines, ce fil fin a plusieurs kilomètres de longueur. Le fil fin aboutit aux deux bornes A et B.

Si au moyen d'un interrupteur I on produit successivement l'établissement et la rupture d'un courant dans le primaire, ces variations du champ produisent dans le fil fin, ou *secondaire*, des courants induits. Grâce à ces dispositions : gros fil et faible nombre de tours, fil fin et grand nombre de spires, les forces électromotrices induites dans f produisent entre A et B des différences de potentiel très fortes.

Elles sont alternativement d'un sens et du sens contraire, puisqu'elles correspondent alternativement à l'augmentation et à la diminution d'un champ, qui, d'après ce qu'on a vu, induisent des courants inverses.

Pour renforcer le champ, la bobine F, f présente en son centre un noyau de fer doux constitué par un faisceau de fils de fer.

L'interrupteur I est constitué dans les petits appareils comme on l'a vu dans la sonnerie à trembleur, de manière à produire très rapidement un grand nombre d'interruptions. Dans les grosses bobines, on emploie des systèmes plus compliqués mus parfois par des électro-aimants, afin d'obtenir des ruptures fréquentes et surtout très brusques.

§ VII. — APPLICATION DES PHÉNOMÈNES D'INDUCTION

A LA PRODUCTION DE COURANTS.

DYNAMOS¹.

1. *Inducteurs ; circuit magnétique.* — On utilise les phénomènes d'induction pour produire des courants que l'on peut obtenir ainsi plus économiquement qu'avec les piles.

1. L'étude des dynamos et moteurs étant comprise dans le Cours de Machines nous ne donnerons ici que des indications très générales et peu détaillées sur le fonctionnement de ces appareils.

Il faut donc déplacer des conducteurs dans un champ. Ce champ est obtenu au moyen d'un système d'aimants ou d'électro-aimants.

Dans les petites machines (magnétos) on emploie souvent des aimants permanents ; mais, dès que les machines ont une certaine importance, on utilise des électros qui permettent d'obtenir des champs plus intenses et plus constants.

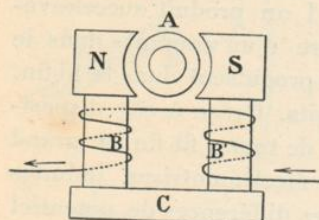


Fig. 208.

Ils sont constitués par deux noyaux en fer doux BB' reliés par une pièce C appelée culasse ;

ils se terminent par deux morceaux de fer NS appelés pièces polaires.

L'enroulement du fil destiné à constituer les bobines se fait sur les noyaux B, B' . Entre les pièces polaires se trouve un anneau de fer A (armature) qui complète l'ensemble, ainsi constitué par B, N, A, S, B', C formant le circuit magnétique.

On lui donne ce nom à cause des lignes de force qui passent dans ce circuit comme un courant dans un conducteur.

La figure 209 montre la manière dont sont disposées les lignes de force dans les inducteurs. Elles se ferment par la culasse comme on l'a indiqué schématiquement ; et passant des pièces polaires dans l'armature, elles sont concentrées dans cette armature ; elles passent toutes dans cette armature, une moitié dans la section pq , l'autre moitié dans la section rs .

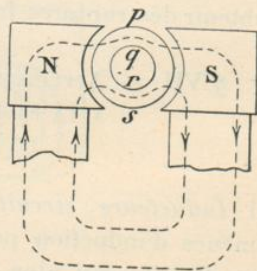


Fig. 209.

2. *Induit.* — Le champ magnétique étant ainsi constitué, il faut déplacer un circuit qui puisse recueillir le courant

induit. Pour cela un fil de cuivre sans fin est enroulé sur l'armature A (fig. 209); c'est l'enroulement Gramme, que nous décrirons seul pour expliquer sommairement le fonctionnement de ces appareils.

L'anneau, couvert par cet enroulement, tourne dans le champ; l'armature A du circuit magnétique n'est donc pas fixe, mais elle joue quand même le rôle de concentration des lignes de force, à condition qu'elle soit en fer aussi doux que possible.

On voit (fig. 210) que les lignes de force pénètrent dans l'armature entre les spires de l'enroulement sur sa face extérieure; donc, quand l'induit tournera (sens de la flèche f) il se produira des courants d'induction, puisque le fil coupe des lignes de force.

Nous connaissons le sens H du champ, celui f du déplacement; la combinaison de la loi de Lenz et de la règle du bonhomme d'Ampère nous fixe le sens f' de circulation des courants dans le côté gauche de l'enroulement induit (fig. 211).

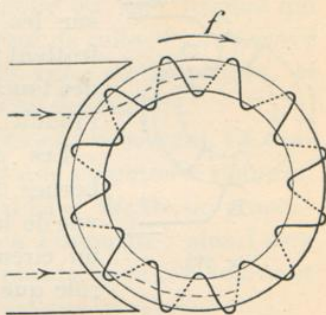


Fig. 210.

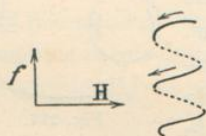


Fig. 211.

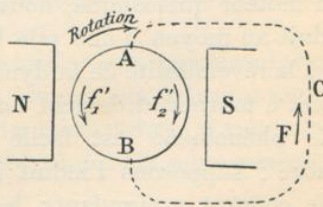


Fig. 212.

On verrait facilement que, sur le côté droit de l'enroulement, la circulation se fait en sens inverse. En figurant schématiquement l'induit (fig. 212), entre les points A et B

on a des courants circulant des deux côtés suivant les sens f'_1 et f'_2 .

Si on laisse l'appareil ainsi constitué, les deux courants opposés s'annulent; mais si on les réunit par un circuit extérieur ACB, on a dans ce circuit extérieur circulation d'un courant continu entre A et B suivant le sens F.

Les deux courants f'_1, f'_2 ne sont que les courants dus au circuit général bifurqué entre A et B.

La liaison des points A et B (fig. 213) est obtenue au moyen de deux contacts A et B frottant sur les fils de l'induit (en fait ils ne frottent pas directement; ils frottent sur des touches de cuivre en relation avec l'induit).

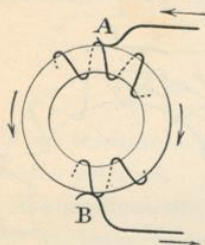


Fig. 213.

Les points A et B constituent les bornes de la dynamo qui, au point de vue de la circulation d'un courant dans un circuit extérieur, jouent le même rôle que les pôles d'une pile.

§ VIII. — RÉVERSIBILITÉ DES DYNAMOS. MOTEURS.

Si, au lieu de produire la rotation de la dynamo au moyen d'un moteur quelconque, nous produisons le courant dans l'induit au moyen d'une pile P, on observe la réversibilité de la dynamo: elle se met à tourner et devient un moteur.

Ce phénomène est facile à comprendre: supposons l'induit immobile et le courant y circulant; les fils de

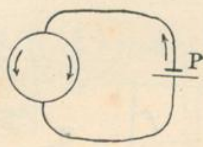


Fig. 214.

l'induit constituent des courants placés dans le champ produit par les inducteurs. Il en résulte des actions mécaniques qui tendent à faire tourner l'induit et on obtient un moteur.

Les moteurs électriques ne sont donc pas d'une construc-

tion différente des dynamos ; seulement, au lieu de recueillir le courant de celle-ci, on y envoie un courant, elle tourne et est susceptible d'effectuer un certain travail.

§ IX. — TRANSPORT DE L'ÉNERGIE A DISTANCE.

L'invention des dynamos et moteurs a permis de réaliser des transports d'énergie à distance qui permettent d'utiliser des forces naturelles difficilement utilisables autrement.

Par exemple une chute d'eau dans une montagne servira à faire tourner une roue hydraulique ou une turbine qui fera tourner une dynamo. Le courant de celle-ci sera envoyé à une certaine distance dans les villes ou des usines, et employé à alimenter des moteurs ou des lampes.

On a donc des lignes électriques portant le courant. Ce courant est caractérisé par une différence de potentiel E et un ampérage I ; la puissance transmise est $EI = W$. Or, on proportionne la section des fils de ligne à l'intensité : plus I sera grand, plus la section sera forte, plus la ligne sera lourde et coûteuse.

Donc pour transmettre la même puissance W , si on diminue I il faut augmenter E ; par suite les transmissions à grande distance se font à très haut voltage.

Il en résulte bien des inconvénients : dangers d'électrocuter les gens sur le passage de la ligne, difficulté d'utiliser le courant à haut voltage.

La première considération n'a évidemment pas tenu devant l'intérêt pécuniaire : on a élevé les poteaux pour les rendre inaccessibles et mis des écriteaux avertisseurs ; d'autres fois on a enterré les lignes constituées par des fils soigneusement isolés.

Le second inconvénient a été résolu par l'emploi de courants alternatifs et polyphasés.

§ X. — COURANTS ALTERNATIFS.

Jusqu'ici nous avons vu que dans un circuit ACB, nous avons une différence de potentiel constante V entre A et B,

et une intensité I constante donnée par la loi d'Ohm :

$$I = \frac{V}{R}, \text{ } R \text{ étant la résistance ohmique du circuit ACB.}$$

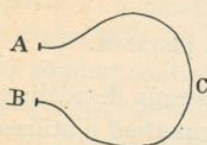


Fig. 215.

C'est le courant dit continu.

Le courant alternatif est caractérisé par une différence de potentiel entre A et B qui varie avec une très grande rapidité et une intensité variant avec la même rapidité.

Dans la plupart des installations, ces variations sont sinusoïdales et la différence de potentiel entre A et B peut se représenter par :

$$v = V \sin \omega t.$$

Dans l'intervalle d'une période, la différence v prendra les valeurs $0, +V, 0, -V, 0$. Elle change donc périodiquement de sens. Mais cette période est courte ; dans les installations électriques destinées à l'éclairage, il y a ordinairement 42 périodes à la seconde.

D'autre part, l'intensité dans la ligne se représente par : $i = I \sin (\omega t + \varphi)$. La période est la même, mais le voltage entre A et B et l'intensité ne s'annulent pas en même temps.

Sans entrer dans de plus longs détails au sujet de ces courants dont l'emploi se répand universellement à terre, on dira qu'ils sont produits par des appareils analogues aux dynamos et appelés *Alternateurs*. Le courant transporté sur la ligne à très haut voltage (plusieurs milliers de volts) est réduit à quelques centaines de volts par des *Transformateurs* et ainsi utilisé dans les lampes ou dans des moteurs spéciaux.

§ XI. — COURANTS POLYPHASÉS.

Figurons (fig. 216) une série de circuits électriques identiques $A_1 B_1, A_2 B_2, \dots A_n, B_n$; soit $i_1, i_2, \dots i_n$ les intensités dans les circuits au même instant t . Supposons que

ces intensités soient représentées par des fonctions sinusoïdales de la forme :

$$i_1 = I \sin \omega t.$$

$$i_2 = I \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{n}\right).$$

$$i_n = I \sin\left(\omega t + \frac{2\pi(n-1)}{n}\right).$$

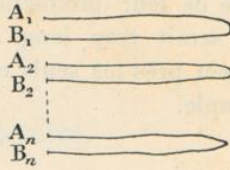


Fig. 216.

On dit que ces courants $i_1, i_2, \dots i_n$ sont *polyphasés*.

Un des plus employés est le courant triphasé dans lequel $n = 3$; on a alors 3 circuits et :

$$\begin{cases} i_1 = I \sin \omega t. \\ i_2 = I \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right). \\ i_3 = I \sin\left(\omega t + \frac{4\pi}{3}\right). \end{cases}$$

Une propriété très importante de ces courants est qu'on peut supprimer le fil de retour et par suite n'avoir qu'un système de trois fils pour l'ensemble des 3 circuits.

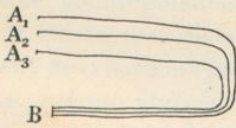


Fig. 217.

En effet supposons que les 3 fils de retour soient liés en un seul fil B; dans ce fil circulera une intensité

égale à la somme des 3 : $i_1 + i_2 + i_3 =$

$$I \left[\sin \omega t + \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) + \sin\left(\omega t + \frac{4\pi}{3}\right) \right] = 0.$$

Car on sait que la somme des sinus en progression arithmétique est nulle.

Donc le fil B n'est parcouru par aucun courant; on peut le supprimer, on réunit donc les 3 fils à leur extrémité B (fig. 218), sans que l'intensité dans les fils A_1B, A_2B, A_3B ait été changée.

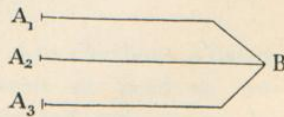


Fig. 218.

Ces courants polyphasés ont des avantages au point de vue de leur production et de leur utilisation sur lesquels il serait trop long de s'étendre; ils sont actuellement à peu près les seuls employés au lieu du courant alternatif simple.

CHAPITRE VIII

Applications de l'électricité.

§ I. — LAMPES A ARC.

1. *Arc électrique.* — L'arc électrique est obtenu en plaçant vis-à-vis l'un de l'autre deux conducteurs entre lesquels existe une différence de potentiel suffisante.

Généralement on emploie des crayons de charbon très compact taillés en pointe ; si on met les crayons au contact, le courant passe, mais les pointes, offrant une grande résistance, s'échauffent et rougissent immédiatement ; en les écartant, on voit jaillir un arc lumineux d'un blanc bleuté éblouissant.

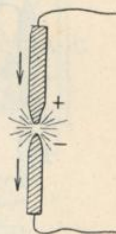


Fig. 219.

Il existe une distance convenable d'écartement des charbons pour laquelle la lumière est brillante et fixe ; cet arc absorbe une intensité considérable, de 4 à 10 ampères pour les lampes à arc d'éclairage, jusqu'à 50 à 100 ampères pour les projecteurs (sous une cinquantaine de volts).

Le charbon positif placé généralement dans les lampes à arc au-dessus du charbon négatif s'use plus que celui-ci ; les gaz chauds qui montent facilitent sa combustion ; en outre il se creuse un cratère au centre de sa pointe. Aussi lui donne-t-on une section plus grande que celle du charbon négatif.

2. *Régulateur. Lampes à arc.* — Les charbons s'usent, par suite leur écartement s'accroît et perd sa valeur optima ; il faut donc un appareil qui ramène les charbons à une distance convenable. En outre, ce régulateur doit produire l'allumage, c'est-à-dire mettre les charbons au

contact quand le courant est envoyé dans la lampe à l'allumage, et les écarter pour produire l'arc. Il faut, en effet, pour qu'une lampe soit commode que ces opérations se fassent automatiquement par simple fermeture du courant, sans qu'on soit obligé de manipuler les lampes.

A titre d'exemple, nous décrirons un des systèmes de régulateurs qui sont fort nombreux.

Le charbon négatif B est fixe; le charbon positif A est

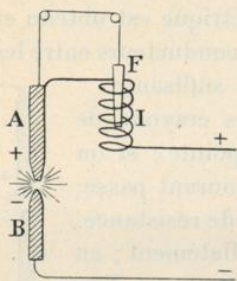


Fig. 220.

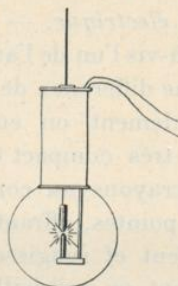


Fig. 221.

suspendu par un fil auquel est attaché un contrepoids F en fer qui peut se déplacer dans un solénoïde I; ce contrepoids est un peu plus léger que le charbon A, de sorte qu'au repos, le courant ne passant pas, A vient appuyer sur B.

Si on lance le courant, il passe par les deux crayons au contact et dans la bobine I; celle-ci produit une attraction sur F qui descend; le charbon positif A monte, s'écarte de B et par cette séparation allume l'arc. La lampe est donc allumée par le seul établissement du courant.

Supposons maintenant que le charbon A monte trop haut ou, s'usant, augmente trop l'écartement des deux charbons: l'arc plus long présente une résistance plus grande, et comme l'indique la loi d'Ohm $I = \frac{E}{R}$, l'intensité diminue, l'attraction de F par I diminue, F remonte un peu, A retombe et la distance diminue entre A et B.

Il y a donc réglage de l'arc. Toutes les conditions sont remplies.

Toute lampe à arc comprend un appareil analogue placé au-dessus de l'arc qui est mis dans un globe en verre ; l'ensemble est généralement suspendu en l'air, de façon à éclairer un espace assez considérable.

3. *Projecteurs.* — L'arc électrique est placé au foyer d'un miroir (cf. Optique), le charbon positif regardant le miroir (fig. 222) ; en effet, le charbon positif donne beaucoup plus de lumière que le négatif et les rayons sont ainsi envoyés sur le miroir et réfléchis convenablement.

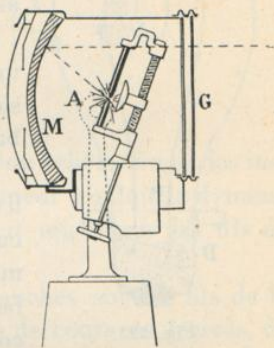


Fig. 222.

Le projecteur se compose d'une enveloppe cylindrique dont le fond est formé par le miroir, la face avant par une glace G. Cette glace est souvent faite de petites bandes de verre juxtaposées pour éviter les dilatations dues à la chaleur intense de l'arc qui pourrait faire fendre le verre. Un régulateur est placé dans l'appareil.

Le projecteur est soutenu par deux tourillons portés par une fourche reposant sur un pied ; on le commande souvent à main au moyen de poignées, parfois à distance en envoyant le courant dans des moteurs placés dans le socle.

La partie délicate des projecteurs est le miroir ; celui-ci, fait en verre le plus souvent, est assez lourd et épais ; il subit des dilatations à l'allumage et des contractions à l'extinction ; d'où des ruptures fréquentes. Aussi quand on éteint un projecteur doit-on prendre la précaution de le couvrir pour qu'il ne se refroidisse pas trop rapidement.

§ II. — LAMPES A INCANDESCENCE.

Pour l'éclairage des appartements et des parties intérieures des bâtiments, on emploie surtout les lampes à incandescence ; dans une ampoule vide d'air A (fig. 223), un filament de charbon artificiel F est parcouru par un courant. Il émet une lumière jaunâtre assez vive.

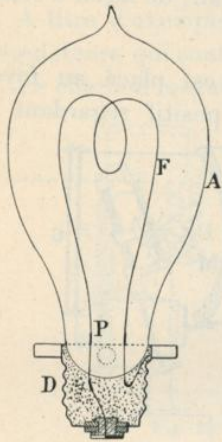


Fig. 223.

L'ampoule de verre A est sertie dans une douille D, qui sert à fixer la lampe ; souvent cet emmanchement est à baïonnette.

Le filament de charbon F vient se fixer à deux fils P qui traversent le culot de la lampe ; ces fils, anciennement en platine, sont actuellement faits en un alliage qui présente le même coefficient de dilatation que le verre.

On caractérise une lampe par le voltage qu'il faut établir entre les extrémités des fils P et l'intensité lumineuse qu'elle doit donner. Par exemple, une lampe de 110 volts et 10 bougies est une lampe qui travaillera sous une différence de potentiel de 110 volts et donnera une intensité lumineuse de 10 bougies.

Si on met la lampe sur une différence de potentiel plus grande, on brûlera le filament de charbon ; sur une différence plus faible le filament deviendra rouge, mais sans éclairer. Une lampe travaillant dans de bonnes conditions doit donner de 800 à 1.000 heures d'éclairage normal.

Au lieu d'un filament de charbon F on a imaginé récemment des fils de métaux spéciaux (Lampes au tantale, à l'osmium, etc.) ; ces lampes sont plus coûteuses, mais elles donnent un éclairage plus brillant et souvent plus économique ; elles commencent à se répandre dans les installations à terre.

§ III. — INSTALLATIONS A BORD DES BATIMENTS.

L'électricité s'est considérablement développée dans ses applications à bord des bâtiments, en raison des commodités qu'on trouve à son emploi.

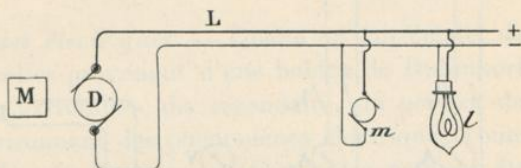


Fig. 224.

La figure 224 indique la disposition schématique des installations à bord. Un moteur M à vapeur conduit la dynamo D ; les deux bornes de celle-ci sont mises sur les fils de ligne L.

Les appareils récepteurs sont branchés sur les fils de la ligne et constituent ainsi une série de courants dérivés. Si $i_1, i_2, \dots$ sont les intensités des courants circulant dans les appareils récepteurs, l'intensité totale circulant dans la ligne au départ de la dynamo est :

$$I = i_1 + i_2 + \dots$$

Au lieu d'une seule ligne, ou un seul circuit L, on peut en avoir plusieurs ; par exemple circuit bâbord, circuit tribord ou circuit AV, circuit AR.

On met toujours deux fils pour ces lignes et on ne fait jamais, comme dans le télégraphe, un retour par la terre, qui serait ici un retour par la coque du bâtiment.

En général, la jonction des lignes à la dynamo se fait sur un *Tableau de distribution* : c'est une plaque isolante (marbre, ardoise ou bois) sur laquelle (fig. 225) sont fixées des barres en cuivre qui font les jonctions.

En D il y a liaison avec les bornes de la dynamo ; on peut couper cette liaison avec un interrupteur I.

On a figuré deux lignes (1), (2) ; chacune possède un

interrupteur I_1 et I_2 et un ampèremètre A_1 , A_2 ; on peut ainsi isoler les lignes avec I_1 et I_2 et au moyen de A_1 , A_2 constater le débit d'électricité. Un voltmètre V permet de voir le voltage aux bornes de la dynamo.

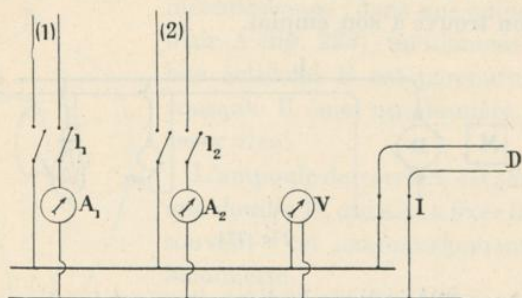


Fig. 225.

Un circuit important est celui qui alimente les feux de navigation; ceux-ci sont allumés par des commutateurs placés dans l'abri de navigation et on peut se rendre compte s'ils fonctionnent convenablement.

Pour avoir la sécurité nécessaire, on emploie souvent deux dynamos qui se servent mutuellement de rechange en cas d'accident à l'une d'elles.

Les circuits électriques alimentent aussi les sonneries et transmetteurs; les sonneries sont toujours employées, mais on préfère les transmetteurs mécaniques (Chadburns et autres), d'un emploi plus sûr, aux transmetteurs électriques.

Les transmetteurs électriques sont soit à lampes, soit à galvanomètres. Le système à lampes consiste en un certain nombre de lampes à incandescence placées derrière des numéros transparents; par leur allumage on fait apparaître des chiffres lumineux qui, par leur combinaison, permettent d'envoyer des ordres.

Les transmetteurs à galvanomètres sont des appareils analogues aux ampèremètres; mais l'aiguille au lieu de désigner des chiffres d'intensité s'arrête devant des indica-

tions inscrites sur le cadran ; suivant l'intensité du courant on fait varier les indications. Tous ces appareils, très employés en marine militaire, le sont peu au commerce.

§ IV. — TÉLÉGRAPHIE SANS FIL.

1. *Ondes électriques.* — Quand on fait éclater dans l'air des étincelles provenant d'une bobine de Ruhmkorff, entre les deux extrémités du secondaire, on produit dans l'espace environnant des phénomènes électriques connus sous le nom d'ondes hertziennes. Ces ondes peuvent être décelées par un de leurs effets, découvert par M. Branly : soit un circuit composé d'une pile P, d'une sonnette S et d'un appareil spécial TL dit cohéreur. Il consiste en un tube de verre T où est placée de la limaille métallique fine serrée entre deux plaques de métal.

La limaille de corps même très bons conducteurs tels que l'argent est à peine conductrice ; dans le circuit fermé sur la limaille, il ne passe qu'un faible courant. Si l'appareil est placé dans le champ des ondes hertziennes, la limaille devient brusquement conductrice ; si les ondes cessent de se produire et si la limaille est métallique, le courant continue à passer : pour ramener le système au premier état, il faut donner un choc léger au cohéreur.

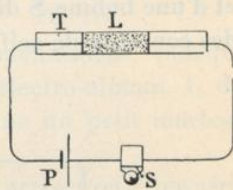


Fig. 226.

On pourra, au moyen de la sonnerie, constater la conductibilité du circuit. C'est le principe de la Télégraphie sans fil.

2. *Installation de la télégraphie sans fil.* — Au lieu d'un appareil à interruptions par trembleur, comme on l'a décrit dans le paragraphe relatif à la Bobine Ruhmkorff, on emploie souvent un alternateur qui envoie des courants périodiques dans le primaire de la bobine. Cela produit les mêmes effets

que les interruptions : le courant changeant de sens produit des variations de champ et par suite des courants induits.

Une installation de Télégraphie sans fil comporte un poste transmetteur et un poste récepteur.

a) *Poste transmetteur.* — Un alternateur S (fig. 227) envoie un courant alternatif (50 périodes à la seconde) dans le primaire B_1 d'une bobine d'induction ; le secondaire B_2 est le siège de courants induits qui produisent des étincelles en E, appareil composé de deux boules métalliques placées en regard et appelé éclateur.

En dérivation sur l'éclateur est placé un système composé d'un condensateur C (cf. chapitre suivant : Électr. statique) et d'une bobine S dite de self, car elle est destinée à donner des courants de self induction.

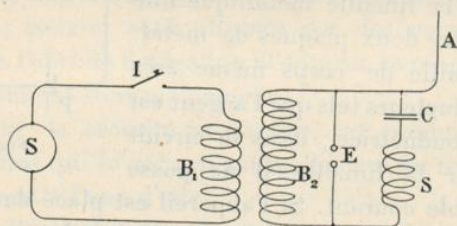


Fig. 227.

Par A l'appareil est lié à un système de fils tenus en l'air par des isolateurs et appelés antennes ; ce sont deux ou trois fils parallèles tenus, horizontalement le plus souvent, entre les mâts du bâtiment.

b) *Poste récepteur.* — L'antenne A est liée à une bobine B'_1 et en communication, par cet intermédiaire, avec la Terre (Poste à terre) ou la coque d'un bâtiment (fig. 228).

Les ondes hertziennes produisent des courants dans l'antenne et dans B'_1 ; en face de B'_1 est une autre bobine B'_2 où se produisent par induction des courants ondulatoires.

Cette bobine B'_2 est sur un circuit P'_1 , B'_2 , R , Co , comprenant en P'_1 une pile, Co le cohéreur à limaille, R un électro-aimant-relais. Un condensateur C' est en dérivation sur B'_2 .

Quand les ondes viennent frapper l'appareil, le cohéreur Co devient conducteur, le courant de la pile P'_1 passe dans le circuit. Le relais R agit alors : l'électro R ferme le circuit voisin TMP'_2 : le courant de la pile P'_2 circule dans ce deuxième circuit en actionnant un appareil télé-

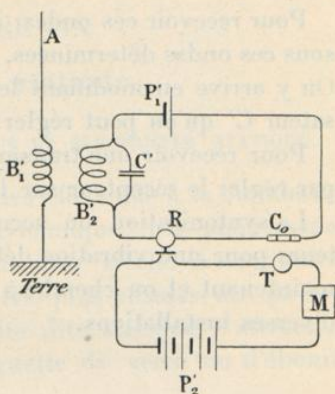


Fig. 228.

graphique M ; le courant circulerait indéfiniment, puisque le cohéreur a été actionné; mais un électro-aimant T , dit tapeur, placé sur le 2^e circuit, actionne un petit marteau qui frappe le cohéreur.

Si les ondes hertziennes continuent à arriver on a une série de coups de marteau sur Co qui ainsi, sitôt ramené à son état naturel, est réimpressionné à nouveau. Le courant circule d'une façon à peu près continue dans M .

On envoie les ondes au moyen de l'interrupteur I (fig. 227). Donc, tant que I sera fermé, le récepteur M agira et marquera un trait sur la bande de papier de l'appareil M . Si I est fermé et ouvert rapidement on enregistre un trait court ou un point. On peut donc se servir de cet appareil comme d'un télégraphe ordinaire.

3. *Syntonisation.* — Les ondes hertziennes se répandent dans toutes les directions; on a essayé d'assurer le secret par la syntonisation qui permet également de communiquer à de plus grandes distances.

On a étudié en Acoustique les phénomènes de résonance; il se produit ici un phénomène analogue; une certaine disposition des bobines B_1 , B_2 , S , du condensateur C ,

de l'antenne, correspond à des vibrations déterminées d'ondes hertziennes.

Pour recevoir ces ondes, il faut que le récepteur résonne sous ces ondes déterminées, qu'il soit « accordé » avec elles. On y arrive en modifiant les bobines B'_1 , B'_2 et le condensateur C' qu'on peut régler.

Pour recevoir une transmission, il faut donc commencer par régler le récepteur sur l'onde qu'on veut recevoir.

La syntonisation ou accord des récepteurs et transmetteurs pour une vibration déterminée est à peu près réalisée maintenant et on cherche à la rendre plus parfaite dans les diverses installations.

CHAPITRE IX

Électricité statique.

§ I. — ÉLECTRICITÉ DYNAMIQUE ET ÉLECTRICITÉ STATIQUE.

Nous avons étudié jusqu'ici les effets dus à la circulation de courants, ou électricité dynamique; ces phénomènes n'ont été connus qu'à la fin du XVIII^e siècle. Au contraire, on connaît depuis les temps les plus reculés des phénomènes produits par l'électricité dite statique : attraction des corps légers par une baguette de verre ou d'ébonite frottée par exemple.

Au point de vue historique l'électricité statique devrait être étudiée avant l'électricité dynamique; mais celle-ci est employée dans toutes les installations appelées communément installations électriques. Au contraire, l'électricité statique n'est plus, à proprement parler, étudiée que dans les laboratoires.

Nous en ferons donc seulement une étude rapide destinée surtout à relier les phénomènes d'électricité statique à ceux, plus connus maintenant, d'électricité dynamique.

§ II. — ÉLECTRISATION PAR FROTTEMENT.

Prenons une baguette de verre et frottons-la avec un morceau de drap; si on l'approche d'un corps léger A, suspendu par un fil de soie très fin (fil de cocon), la balle A est attirée par la baguette de verre B. On dit communément que la baguette B est électrisée. On constate ce phénomène avec le verre, l'ébonite, le soufre, la résine.

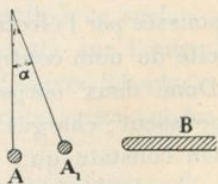


Fig. 229.

Si on tient à la main un morceau de métal, on ne peut

l'électriser ; si on le saisit par l'intermédiaire d'une poignée de verre, on peut l'électriser : on explique ce fait en disant que le métal est bon conducteur ; l'électricité développée par frottement s'en va par le métal, puis par la main de l'opérateur dans le sol.

Au contraire, dans les corps mauvais conducteurs ou isolants, tels que le verre, le soufre, la résine, on développe l'électricité aux points frottés, mais elle demeure à ces points et ne peut s'en aller puisque le corps est mauvais conducteur.

L'air est évidemment un isolant, sans quoi l'électricité développée à la surface des corps se disperserait immédiatement.

§ III. — IL EXISTE DEUX SORTES D'ÉLECTRICITÉ.

Frottons une tige de verre B avec du drap : on constate qu'elle attire la boule A (fig. 229) ; si on laisse la tige B et la boule A se toucher et qu'on les sépare, on constate qu'ensuite la boule A est repoussée par B.

Si on frotte une tige d'ébonite avec une peau de chat, elle attirera maintenant la boule A : ainsi la boule est repoussée par le verre et attirée par l'ébonite ; on explique ce fait en disant qu'il y a deux sortes d'électricité : l'électricité positive (verre frotté) et l'électricité négative (ébonite frottée avec la peau de chat).

En touchant la boule avec la tige de verre on a fait passer sur la boule de l'électricité positive ; celle-ci est donc repoussée par l'électricité de même nom et attirée par l'électricité de nom contraire.

Donc deux corps chargés de la même électricité se repoussent ; chargés d'électricités différentes, ils s'attirent.

On constate qu'il n'y a que deux sortes d'électricité ; tous les corps frottés se rangent soit dans la catégorie du verre, soit dans celle de l'ébonite.

§ IV. — LOI DE COULOMB.

1. *Quantités d'électricité.* — Si on mesure les actions produites par les corps électrisés, on constate qu'elles sont inégales; on explique ce fait en disant que les corps sont inégalement chargés; quand deux corps donnent, placés à la même distance du pendule, le même angle α , on dira qu'ils possèdent des quantités d'électricité égales. Si l'angle α est 2, 3 ... fois plus grand qu'avec le 1^{er} corps, on dira que les quantités d'électricité sont 2, 3 ... fois plus grandes.

2. *Loi des distances.* — On remarque que deux corps électrisés placés à des distances variables agissent différemment suivant la distance; les actions varient comme l'inverse du carré de la distance. On peut écrire analytiquement la loi de Coulomb :

$$f = K \frac{qq'}{r^2},$$

f étant la force qui s'exerce entre les masses d'électricité, q, q' les masses d'électricité, r leur distance, K un coefficient dépendant des unités choisies.

§ V. — LE FROTTEMENT DÉVELOPPE DES QUANTITÉS ÉGALES D'ÉLECTRICITÉS DE NOMS CONTRAIRES.

Prenons deux disques tenus par des manches isolants, l'un en verre par exemple, l'autre couvert de drap. Frottons-les l'un contre l'autre.

Par définition, le disque de verre présente à sa surface des masses d'électricité positive; on constate sur l'autre plateau la *présence d'une quantité égale d'électricité négative*; car avant de les séparer, ils n'ont aucune action sur le pendule non électrisé.

Dans toutes les expériences analogues, on découvre le même phénomène : production en quantités égales de deux électricités de noms contraires.

§ VI. — DISTRIBUTION DE L'ÉLECTRICITÉ SUR LES CONDUCTEURS. ADDITION DES QUANTITÉS D'ÉLECTRICITÉ.

1. *Distribution.* — Soit une sphère *S* métallique soutenue sur un pied isolant *P* ; une ouverture *O* à la partie supérieure permet d'y introduire un corps conducteur tenu dans un isolant, une petite sphère métallique par exemple, à l'extrémité d'une tige de verre.

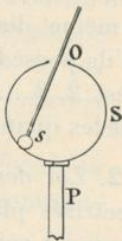


Fig. 230.

Électrisons la sphère *S* ; une fois électrisée, si nous la touchons à l'extérieur avec notre petite boule, nous enlevons une petite quantité d'électricité, ce que nous pouvons vérifier avec le pendule.

Si nous touchons l'intérieur de la sphère, nous n'enlevons aucune masse d'électricité : ce qui prouve que l'électricité n'existe que sur la surface extérieure du conducteur.

2. — Soient deux sphères identiques *M* et *M'*, l'une électrisée *M*, l'autre non électrisée.

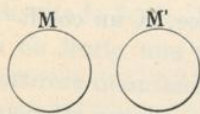


Fig. 231.

On peut par l'action de la sphère sur un pendule déterminer la quantité d'électricité *Q* qu'elle contient. Mettons en contact les deux sphères, l'électricité se répand dans les deux et on constate que chacune contient la masse $\frac{Q}{2}$ d'électricité.

Une autre expérience montre bien l'addition des masses électriques : chargeons d'une masse *q* la petite sphère isolée (fig. 230) et mettons-la à toucher la surface intérieure de *S* : l'électricité va à la surface extérieure et quitte *s* : on constate en la retirant qu'elle n'est plus électrisée. On peut opérer à nouveau le même manège et ajouter encore une masse *q* ; en le faisant *n* fois, on constate que la sphère *S* contient une masse *nq* d'électricité : les masses d'électricité s'ajoutent donc arithmétiquement.

Si on avait ajouté n' masses d'électricité de nom contraire, la charge définitive serait : $nq - n'q'$.

§ VII. — INFLUENCE.

Soit une sphère A chargée d'électricité positive, comme l'indique la figure 232; approchons une sphère B isolée et non électrisée; il se développe de l'électricité sur B; on dit qu'il y a électrisation par influence.

Il se forme de l'électricité négative vers A et positive à l'opposé; si on reliait un point quelconque de B au sol, l'électricité positive s'en irait dans le sol, il ne resterait dans B que l'électricité négative.

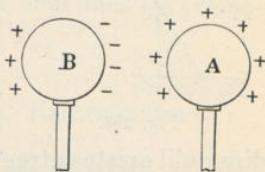


Fig. 232.

Cela explique l'attraction d'un corps non électrisé par un corps électrisé : il se forme, du côté qui est vis-à-vis du corps électrisé, de l'électricité de nom contraire qui est attirée; il y a attraction.

§ VIII. — IDENTITÉ DE L'ÉLECTRICITÉ STATIQUE ET DE L'ÉLECTRICITÉ DYNAMIQUE.

Il s'agit maintenant de relier ces phénomènes aux phénomènes déjà connus et de montrer qu'il n'y a qu'une seule série de faits.

1. *Nature du courant électrique.* — Prenons un disque isolant à la périphérie duquel nous enchâsserons de petites lames de métal; chargeons ces lames d'électricité statique.

Si on met le disque en rotation, on constate qu'une aiguille aimantée placée au voisinage subit les mêmes actions que si un courant électrique (dynamique) suivait le contour du disque; on voit que l'action est la même qu'un courant allant dans le sens de la rotation (cas de masses électriques positives) ou en sens inverse (masses électriques négatives).

Physique et chimie. — GILLE.

Il y a donc analogie entre le déplacement de masses électriques et la circulation d'un courant.

D'autre part, si nous réunissons un corps isolé et électrisé

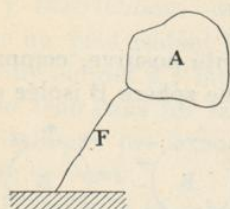


Fig. 233.

A par un fil F à la Terre, ce fil F est parcouru par un courant, de très courte durée, il est vrai, mais reconnaissable à tous ses effets chimiques, calorifiques, électro-dynamiques.

On peut donc considérer le corps électrisé comme possesseur d'une certaine force électromotrice ; on peut dire qu'il existe entre A et la terre une différence de potentiel (Cf. Définition du courant) puisqu'entre les deux il peut y avoir circulation d'un courant.

2. *Production de phénomènes d'électricité statique avec des piles.* — Inversement, en créant des différences de potentiel, on doit pouvoir charger d'électricité statique des corps.

Signalons d'abord que tout conducteur chargé statiquement a le même potentiel en tous ses points : en effet, s'il en était autrement, entre deux points ayant des potentiels inégaux, on aurait une différence de potentiel et par suite circulation de courant, ce que l'on ne constate pas.

En particulier, la Terre qui est conductrice a le même potentiel en tous ses points ; comme on prend souvent la différence de potentiel entre le corps et la terre, on admet que le potentiel de celle-ci est 0 ; si donc on trouve entre un corps conducteur et la terre une différence de potentiel V , on dira que le potentiel du corps est V .

Ceci posé, prenons une grande quantité d'éléments de pile mis en série (fig. 234)

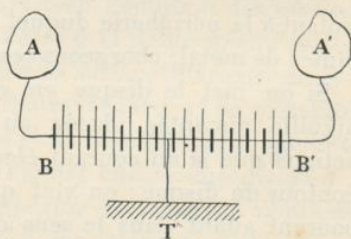


Fig. 234.

et mettons en communication le milieu de cette chaîne et

le sol en T ; la différence de potentiel entre T et B est V, par exemple, et entre T et B' : $-V$, puisqu'on a le même nombre d'éléments, mais pris en sens inverse :

Les deux corps A et A' isolés, mis en communication avec B et B' doivent équivaloir à des corps chargés d'électricité statique en quantités égales, mais l'un positivement, l'autre négativement. On constate en effet tous les phénomènes qui peuvent le prouver.

§ IX. — MESURE DES POTENTIELS. ÉLECTROMÈTRES.

On emploie en électricité statique des appareils destinés à la mesure des potentiels; à titre d'exemple nous citerons l'Électromètre à quadrants (Lord Kelvin), dont nous n'exposerons que le principe.

Soient 4 « quadrants » en métal AA', BB'; ce sont des quarts de cercle disposés de façon à ne pas se toucher et réunis deux à deux (A et A', B et B'). Au-dessus d'eux peut se déplacer, par rotation autour du centre de l'appareil, une « aiguille » indiquée en pointillé (fig. 235). Cette aiguille est suspendue à un fil métallique qui s'oppose à la rotation par sa torsion.

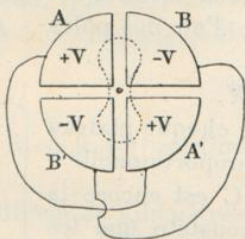


Fig. 235.

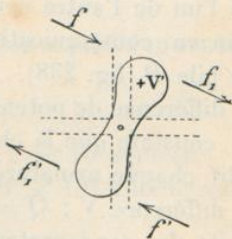


Fig. 236.

Supposons les quadrants AA' au potentiel $+V$, BB' à $-V$. Et supposons l'aiguille à $+V$.

Il en résulte des répulsions f et f' , des attractions f_1 et f'_1 (fig. 236) qui font tourner l'aiguille; ces forces cons-

tituent un couple qui s'équilibre avec le couple de torsion du fil auquel est suspendue l'aiguille : de la déviation angulaire, on déduit la valeur du potentiel V .

§ X. — CAPACITÉ D'UN CONDUCTEUR.

1. *Corps isolé et éloigné de tout autre.* — Soit un corps A électrisé ; on le suspend éloigné de tout autre corps pour éviter les phénomènes d'influence ; on constate que sa charge est une quantité d'électricité Q , et son potentiel V .

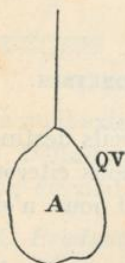


Fig. 237.

En faisant varier Q on voit que V varie proportionnellement ; donc le potentiel du corps isolé est proportionnel à sa charge :

$$Q = CV.$$

Cette constante C s'appelle *Capacité* du corps A .

On démontre et on peut vérifier que la capacité d'une sphère métallique est proportionnelle à son rayon :

$$C = KR.$$

2. *Condensateurs.* — Mettons en regard et à petite distance l'un de l'autre deux plateaux métalliques ; mettons chacun en communication avec l'un des pôles d'une pile P (fig. 238).

La différence de potentiel est V .

On constate que la charge de chaque plateau (on dit chaque armature) est proportionnelle à cette différence V : $Q = CV$; C est encore la capacité du condensateur ; on constate que les charges des deux plateaux sont égales (plateaux identiques), de signes contraires et beaucoup plus considérables que si les plateaux étaient seuls ; les deux électricités contraires situées en face sur les plateaux s'attirent mutuellement et augmentent la capacité.

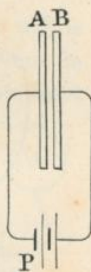


Fig. 238.

Celle-ci devient plus grande encore si on interpose, au lieu d'air, une lame de mica, de verre ou de paraffine entre les armatures.

Bouteille de Leyde. — C'est le premier condensateur connu : une bouteille B (fig. 239) contient des feuilles de clinquant ou d'étain ; à l'extérieur une feuille mince d'étain f est collée sur la bouteille. On a donc, à l'intérieur et à l'extérieur, des armatures métalliques séparées par le verre de la bouteille B.

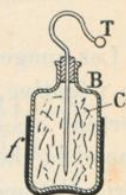


Fig. 239.

Une tige T aboutissant à l'extérieur établit la communication avec les feuilles situées à l'intérieur.

3. *Unité de capacité.* — L'unité de capacité est la capacité du corps ou du condensateur qui sous un potentiel de 1 volt contient une charge égale à 1 coulomb. C'est le Farad.

$$Q \text{ (coul.)} = C \times V.$$

Si donc dans cette formule V est exprimé en volts, C en farads, Q sera exprimé en coulombs.

Cette unité est très grande ; supposons en effet que ce soit la capacité d'une sphère isolée et éloignée de tout conducteur ; quel sera son rayon ?

On démontre que, si R est le rayon exprimé en centimètres,

$$C = \frac{R}{9 \cdot 10^{11}} ;$$

$$R = 9 \cdot 10^{11} \text{ centimètres} = 9 \times 10^9 \text{ mètres.}$$

$$= 9 \times 10^6 \text{ kilomètres.}$$

9 millions de kilomètres.

C'est une capacité énorme ; on emploie le microfarad qui est la millième partie du farad. On ne peut réaliser ces capacités qu'au moyen de condensateurs qui, sous un faible volume, ont des capacités très grandes.

On voit donc quelles capacités il faut avoir pour obtenir des masses très faibles d'électricité ; en fait les machines

électrostatiques permettant de charger statiquement les corps produisent des différences de potentiel énormes, de plusieurs milliers de volts.

§ XI. — ÉLECTRICITÉ ATMOSPHÉRIQUE.

Les nuages orageux contiennent de l'électricité positive ou négative, mais le plus souvent négative ; ils se comportent vis-à-vis de la terre comme des condensateurs ; quand la charge est trop forte, il passe une étincelle ou une série d'étincelles entre les particules chargées par influence qui se trouvent en l'air et on a l'Eclair.

Si deux nuages chargés, l'un positivement, l'autre négativement, sont voisins, l'éclair éclate entre ces deux nuages.

Pour éviter les accidents dus à la foudre, on emploie le paratonnerre ; il est basé sur le pouvoir qu'ont les pointes d'écouler l'électricité.

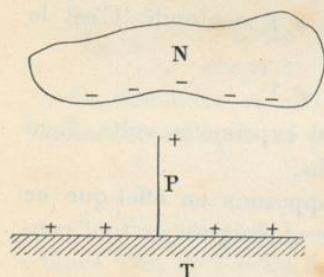


Fig. 240.

Soit (fig. 240) un nuage N chargé négativement : la terre T s'électrise positivement par influence et, si on dresse une pointe P, cette pointe chargée positivement laisse écouler de l'électricité positive qui va neutraliser l'électricité négative du nuage.

Lorsque la tension devient trop grande et qu'il passe un éclair, on peut espérer son écoulement par P ; on voit que le paratonnerre doit être en contact intime avec le sol ; on le met en communication par un endroit humide au moyen de larges plaques. On doit le relier également aux corps métalliques voisins qui, s'électrisant par influence, pourraient provoquer entre eux des étincelles.