



W. H. & J. H. W. W.

PHYSIOLOGY

QC21

F47

1889



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

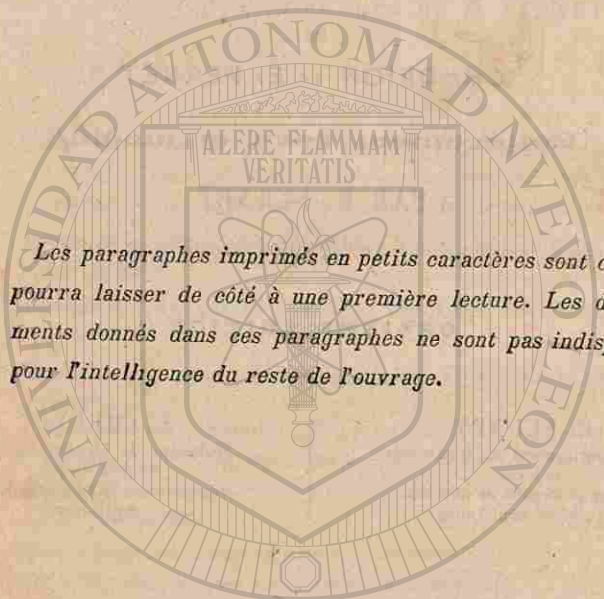
*Rogero N. Villaseca*  
MONTEREY.

TRAITÉ

DE

PHYSIQUE ÉLÉMENTAIRE

*Rogero N. Villaseca*  
MONTEREY.



Les paragraphes imprimés en petits caractères sont ceux qu'on pourra laisser de côté à une première lecture. Les développements donnés dans ces paragraphes ne sont pas indispensables pour l'intelligence du reste de l'ouvrage.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MÉXICO  
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

*L. Villar*  
TRAITÉ



DE  
BIBLIOTECA  
PHYSIQUE ÉLÉMENTAIRE

NOTIONS PRÉLIMINAIRES

I. — NOTIONS DE MÉCANIQUE.

MOUVEMENTS. — FORCES.

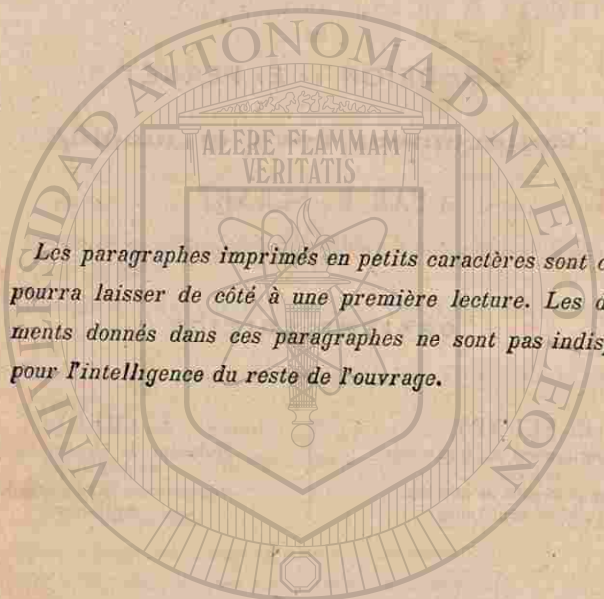
1. **Mouvement en général.** — On appelle *trajectoire* d'un point en mouvement, la ligne formée par les positions successives de ce point. — Le mouvement est dit *rectiligne* ou *curviligne*, selon que la trajectoire est une ligne droite ou une ligne courbe.

Pour que le mouvement d'un point soit complètement défini, il ne suffit pas de connaître la trajectoire, il faut connaître encore la loi suivant laquelle il la parcourt. Dans chacun des mouvements simples que nous allons étudier, il est facile d'obtenir une relation entre les valeurs du *temps*  $t$ , compté à partir d'un instant déterminé, et les valeurs correspondantes de l'*espace*  $e$  qui sépare le point mobile d'un point fixe pris sur la trajectoire, cet espace étant compté sur la trajectoire elle-même. — Une pareille relation prendra le nom d'*équation du mouvement sur la trajectoire*.

Dans ce qui va suivre, nous supposerons les temps évalués en *secondes*, et les espaces évalués en *mètres*.

2. **Mouvement uniforme.** — Un mouvement est dit *uniforme* lorsque les espaces parcourus dans des intervalles de temps égaux sont égaux, quels que soient ces temps. On appelle *vitesse* d'un mouvement uniforme, l'espace parcouru dans un intervalle de temps égal à l'unité.

000162



Les paragraphes imprimés en petits caractères sont ceux qu'on pourra laisser de côté à une première lecture. Les développements donnés dans ces paragraphes ne sont pas indispensables pour l'intelligence du reste de l'ouvrage.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MÉXICO  
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

L. Villar

TRAITÉ

DE

PHYSIQUE ÉLÉMENTAIRE



BIBLIOTECA

NOTIONS PRÉLIMINAIRES

I. — NOTIONS DE MÉCANIQUE.

MOUVEMENTS. — FORCES.

1. **Mouvement en général.** — On appelle *trajectoire* d'un point en mouvement, la ligne formée par les positions successives de ce point. — Le mouvement est dit *rectiligne* ou *curviligne*, selon que la trajectoire est une ligne droite ou une ligne courbe.

Pour que le mouvement d'un point soit complètement défini, il ne suffit pas de connaître la trajectoire, il faut connaître encore la loi suivant laquelle il la parcourt. Dans chacun des mouvements simples que nous allons étudier, il est facile d'obtenir une relation entre les valeurs du *temps t*, compté à partir d'un instant déterminé, et les valeurs correspondantes de l'*espace e* qui sépare le point mobile d'un point fixe pris sur la trajectoire, cet espace étant compté sur la trajectoire elle-même. — Une pareille relation prendra le nom d'*équation du mouvement sur la trajectoire*.

Dans ce qui va suivre, nous supposerons les temps évalués en *secondes*, et les espaces évalués en *mètres*.

2. **Mouvement uniforme.** — Un mouvement est dit *uniforme* lorsque les espaces parcourus dans des intervalles de temps égaux sont égaux, quels que soient ces temps. On appelle *vitesse* d'un mouvement uniforme, l'espace parcouru dans un intervalle de temps égal à l'unité.

000162

La définition même du mouvement uniforme donne immédiatement la forme de l'équation de ce mouvement. Soit  $v$  le nombre constant qui exprime la vitesse, et convenons, pour plus de simplicité, de compter les espaces à partir du point où se trouve le mobile à l'instant pris pour origine du temps; au bout d'un nombre  $t$  de secondes, la distance  $e$  qui sépare le mobile de l'origine des espaces sera

$$e = vt.$$

Étant donné un point animé d'un pareil mouvement, il suffira, pour déterminer la vitesse  $v$ , de mesurer l'espace parcouru en un certain nombre de secondes, et de diviser cet espace par ce nombre de secondes.

5. **Mouvement varié. — Vitesse moyenne entre deux instants déterminés. — Vitesse à un instant déterminé.** — Un mouvement est dit *varié*, lorsque les espaces parcourus dans des intervalles de temps égaux ne sont pas égaux.

Soit AB (fig. 1) la trajectoire d'un mobile animé d'un mouvement varié. Soit A le point où se trouve le mobile à l'instant pris pour origine



Fig. 1.

du temps, et convenons de compter les espaces à partir de ce point. Soit M la position du mobile à l'instant  $t$ ; désignons la longueur AM par  $e$ , cette quantité étant comptée positivement dans le sens AB. Soit Am l'espace parcouru à l'instant  $t + \theta$ ; désignons-le par  $e + \varepsilon$ . La longueur Mm ou  $\varepsilon$  est celle que le mobile a parcourue pendant l'intervalle de temps  $\theta$ . Or on peut concevoir un second mobile parcourant cette même longueur, non plus d'un mouvement varié, mais d'un mouvement uniforme, dans le même intervalle de temps: d'après ce qu'on

vient de voir, la vitesse de ce mobile serait  $\frac{\varepsilon}{\theta}$ . Cette vitesse est ce qu'on nomme la *vitesse moyenne* du premier mobile, entre les deux instants  $t$  et  $t + \theta$ : elle s'obtient, comme on voit, en divisant l'accroissement  $\varepsilon$  de l'espace parcouru par l'accroissement  $\theta$  du temps.

Considérons maintenant, au lieu de l'accroissement  $\theta$  donné au temps  $t$ , un accroissement plus petit  $\theta'$ ; l'espace parcouru AM sera accru seulement de Mm' ou  $\varepsilon'$ , et la vitesse moyenne, entre le temps  $t$  et le temps  $t + \theta'$ , sera  $\frac{\varepsilon'}{\theta'}$ . De même, pour un accroissement de temps encore plus petit  $\theta''$ , l'accroissement d'espace étant Mm'' ou  $\varepsilon''$ , la vitesse moyenne entre le temps  $t$  et le temps  $t + \theta''$  sera  $\frac{\varepsilon''}{\theta''}$ , et ainsi de suite. Or, si l'on fait décroître indéfiniment les intervalles  $\theta, \theta', \theta'', \dots$ , les quo-

QC 21  
E 47 3  
1889

tients  $\frac{\varepsilon}{\theta}, \frac{\varepsilon'}{\theta'}, \frac{\varepsilon''}{\theta''}, \dots$  tendent en général vers une limite déterminée;

cette limite est ce qu'on nomme la *vitesse à l'instant t*. — On appelle donc *vitesse à un instant déterminé*, la limite vers laquelle tend le rapport de l'accroissement  $\varepsilon$  de l'espace à l'accroissement  $\theta$  du temps, lorsque  $\theta$  converge vers zéro.

On voit que la vitesse doit être considérée comme positive ou négative, selon que  $\varepsilon$  est lui-même positif ou négatif.

4. **Mouvement uniformément varié.** — Un mouvement est dit *uniformément varié*, lorsque la vitesse varie de quantités égales en des temps égaux, quels que soient ces temps. — On appelle *accélération*, dans un pareil mouvement, la variation de la vitesse dans l'unité de temps. — Le mouvement est *uniformément accéléré* ou *uniformément retardé*, selon que l'accélération et la vitesse sont de même signe ou de signes contraires.

Considérons, par exemple, un mobile animé d'un mouvement *uniformément accéléré*. Soit  $v_0$  sa vitesse initiale, c'est-à-dire sa vitesse à l'instant pris pour origine du temps; soit  $\gamma$  l'accélération; nous supposons  $v_0$  et  $\gamma$  positifs. Si l'on désigne par  $v$  la vitesse au bout du temps  $t$ , on a, d'après la définition même de l'accélération,

$$(1) \quad v = v_0 + \gamma t.$$

Cette équation peut se transformer en une autre qui donne l'espace parcouru  $e$ , compté à partir du point où se trouvait le mobile à l'origine du temps. — On démontre en effet, par un raisonnement pour lequel nous renverrons aux Traités de Mécanique, que la relation (1) conduit à la relation équivalente

$$(2) \quad e = v_0 t + \frac{\gamma t^2}{2}.$$

Remarque. — Si l'on considère le cas particulier où la vitesse initiale est nulle, on a  $v_0 = 0$ ; alors la formule (1) devient

$$v = \gamma t,$$

c'est-à-dire que, dans ce cas particulier, les vitesses sont proportionnelles aux temps.

La formule (2) devient, dans la même hypothèse,

$$e = \frac{\gamma t^2}{2},$$

c'est-à-dire que les espaces sont proportionnels aux carrés des temps.

Enfin, si l'on élimine le temps  $t$  entre les deux équations que l'on vient d'obtenir, on a

$$v = \sqrt{2\gamma e},$$

c'est-à-dire que les vitesses sont proportionnelles aux racines carrées des espaces parcourus.

L'une quelconque de ces trois lois, qui se déduisent les unes des autres, suffit pour caractériser le mouvement. — Ces divers résultats trouveront leur application dans l'étude des mouvements des corps sous l'action de la pesanteur.

5. **Principe de l'inertie.** — *Un corps ne peut modifier de lui-même ni son état de repos, ni son état de mouvement.* — Par cet énoncé général, on doit entendre :

1° Qu'un point en repos, si aucune cause n'agit sur lui, demeure en repos : c'est ce qu'on peut appeler l'inertie dans le repos ;

2° Qu'un point en mouvement, si aucune cause n'agit sur lui, conserve indéfiniment un mouvement rectiligne et uniforme : c'est ce qu'on peut appeler l'inertie dans le mouvement.

Le principe de l'inertie dans le mouvement a été énoncé pour la première fois par Képler : il paraît, au premier abord, contredit par un certain nombre de faits d'observation ; un examen attentif montre qu'il n'y a là qu'une contradiction apparente (\*).

6. **Forces.** — **Effets dynamiques et effets statiques.** — On appelle *force*, toute cause capable de produire le mouvement, ou d'en modifier la nature.

L'existence des forces peut nous être révélée par des phénomènes très divers. Si un point matériel, primitivement en repos, se met en mouvement, c'est qu'une force agit sur lui. Si un point matériel est animé d'un mouvement rectiligne et accéléré, c'est qu'il est soumis à l'action d'une force, dans la direction du mouvement, et dans le même sens, etc. — Ces effets des forces, se manifestant par la production ou par une modification du mouvement, peuvent être désignés sous le nom d'*effets dynamiques*.

Lorsque les points soumis à l'action des forces sont assujettis de façon à rester immobiles, l'existence des forces se manifeste par d'autres effets, auxquels on donne le nom d'*effets statiques*. — Ainsi, un corps pesant, placé en repos sur un plan horizontal, produit une *pression* qui arriverait à rompre le plan si le poids du corps dépassait une certaine limite. Le même corps, suspendu à un fil, produit sur ce fil une *tension*. Enfin, un corps pesant, suspendu à un ressort comme celui de la figure 5, produit sur lui une *flexion* (\*\*).

(\*) Si, par exemple, une bille lancée sur un plan horizontal ne continue pas à se mouvoir indéfiniment, c'est que le frottement de la bille sur le plan a pour effet de diminuer progressivement sa vitesse, jusqu'à la rendre nulle.

(\*\*) Dans chacun de ces cas, la résistance offerte par le plan, par le fil, ou par le ressort, doit être considérée comme développant une *réaction*, égale et contraire à l'action que la pesanteur exerce sur le corps. Il est clair en effet que, si l'on supprimait le plan, le fil ou le ressort, on devrait, pour maintenir le corps en repos, lui

Ces divers effets peuvent servir, non seulement à constater l'existence des forces, mais aussi à les mesurer, comme nous allons le voir.

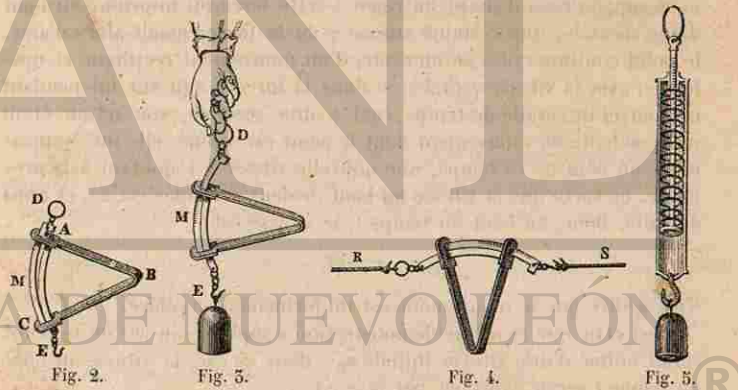
7. **Mesure des forces.** — On dit, en général, que deux forces sont *égales* lorsque, agissant sur un même corps, dans les mêmes conditions, elles produisent un même effet.

Pour comparer entre elles des forces inégales, il faut admettre le principe suivant, qui est confirmé par la vérification de ses conséquences : *Lorsque plusieurs forces agissent simultanément sur un point, l'action de chacune d'elles est la même que si elle agissait seule.*

Ce principe étant admis, on dit qu'une force  $F$  est égale à  $n$  fois une autre force  $f$ , lorsqu'elle produit, dans les mêmes conditions, le même effet que  $n$  forces égales à  $f$ , agissant simultanément.

8. **Dynamomètres.** — On désigne sous le nom de *dynamomètres* des instruments qui sont destinés à mesurer les forces par les effets de flexion qu'elles font éprouver à un ressort.

La figure 2 représente un dynamomètre formé d'une lame d'acier flexible ABC, recourbée en forme de V ; à chacune de ses extrémités, A, C, est fixé un arc métallique qui traverse une ouverture pratiquée près de l'autre extrémité. L'un de ces arcs se termine par un anneau D, qui sert à soutenir l'instrument (fig. 5) ; l'autre, par un crochet E. Pour gra-



duer l'instrument, on suspend successivement, au crochet E, des poids de 1, 2, 3, 4 kilogrammes, etc. ; le ressort s'infléchit de plus en plus, et l'on marque, à chaque fois, le point de l'arc extérieur MD qui correspond à l'ouverture de la branche A qu'il traverse. — Si maintenant on attache l'anneau à un point fixe, à l'aide d'une corde R, par exemple

appliquer une force égale et contraire à son poids. — Newton a montré que c'est là un principe général. Une force quelconque, appliquée à un corps en repos ou en mouvement, détermine toujours une *réaction*, représentée par une force égale et contraire.

(fig. 4), et si l'on applique au crochet une force quelconque par l'intermédiaire d'une autre corde S, il se produit, comme précédemment, une flexion du ressort; selon que cette flexion est égale à celle que déterminait un poids de 2, 4, 10 kilogrammes, on dit que l'intensité de la force est de 2, 4, 10 kilogrammes.

On emploie quelquefois aussi des dynamomètres (fig. 5) formés par un ressort à boudin dont l'une des extrémités s'appuie contre la base supérieure A d'un cylindre métallique AB, auquel est fixé le crochet E; l'autre extrémité s'appuie sur un disque P, fixé à une tige terminée par un anneau D. Cette tige, qui traverse librement la base supérieure du cylindre, sort d'une quantité plus ou moins grande, selon que la force appliquée au crochet est plus ou moins grande.

**9. Une force constante, agissant seule sur un point matériel entièrement libre, lui imprime un mouvement uniformément accéléré.** — La démonstration de ce théorème repose sur le principe suivant, qu'on doit encore considérer comme confirmé par la vérification de ses conséquences: *L'action d'une force sur un point est indépendante du mouvement dont ce point est primitivement animé: elle est la même que si le point était au repos.*

Ce principe étant admis, soit une force F agissant sur un point que nous supposons d'abord au repos: cette force lui imprime, au bout d'une seconde, une certaine vitesse  $\gamma$ . Si la force cessait alors d'agir, le point continuerait à se mouvoir, d'un mouvement rectiligne et uniforme, avec la vitesse  $\gamma$  (5, 2°); si donc la force F agit sur lui pendant un nouvel intervalle de temps égal à une seconde, son action étant indépendante du mouvement dont le point est animé, elle lui communique au bout de ce temps, une nouvelle vitesse  $\gamma$  s'ajoutant à la première, en sorte que la vitesse au bout de deux secondes est  $2\gamma$ , et ainsi de suite. Donc, au bout du temps  $t$ , la vitesse est

$$v = \gamma t,$$

c'est-à-dire que le mouvement est uniformément accéléré.

Il est clair que la même démonstration s'applique au cas où le point serait animé d'une vitesse initiale  $v_0$ : dans ce cas, la vitesse au bout du temps  $t$  serait exprimée par  $v_0 + \gamma t$ .

**10. Deux forces constantes sont entre elles comme les accélérations qu'elles impriment à un même mobile.** — Soient deux forces F, F'; supposons qu'elles aient une commune mesure  $f$ , et qu'on ait

$$F = nf, \quad F' = n'f, \quad \text{et par suite} \quad \frac{F}{F'} = \frac{n}{n'}.$$

Si la force  $f$  agissait seule sur le mobile considéré, elle lui imprimerait un mouvement uniformément accéléré, dont nous pouvons repré-

senter l'accélération par  $\alpha$ . Donc, si  $n$  forces égales à  $f$  agissent simultanément sur ce même mobile, puisque l'action de chacune d'elles est indépendante de celles des autres (7), elles lui imprimeront une accélération  $n$  fois plus grande, c'est-à-dire  $n\alpha$ . De même, si  $n'$  forces égales à  $f$  agissent simultanément sur le même mobile, l'accélération produite sera  $n'\alpha$ . On a donc, en désignant par  $\gamma$  et  $\gamma'$  les accélérations imprimées par F et par F',  $\gamma = n\alpha$ ,  $\gamma' = n'\alpha$ , et par suite,  $\frac{\gamma}{\gamma'} = \frac{n}{n'}$ ; on en déduit :

$$\frac{\gamma}{\gamma'} = \frac{F}{F'}.$$

Ce principe étant démontré pour le cas où les forces ont une commune mesure, quelque petite qu'elle soit, nous le considérerons par cela même comme général.

**11. Masse.** — L'équation que nous venons d'obtenir peut s'écrire :

$$\frac{F}{\gamma} = \frac{F'}{\gamma'}.$$

Or, si l'on faisait agir sur le même corps une autre force F'', le rapport de cette force à l'accélération  $\gamma''$  qu'elle produirait serait encore le même; on a donc, pour toutes les forces appliquées à un autre corps :

$$\frac{F}{\gamma} = \frac{F'}{\gamma'} = \frac{F''}{\gamma''} = \dots = m.$$

Ce rapport constant  $m$  est ce qu'on nomme la *masse* du corps. — On appelle donc, d'une manière générale, *masse d'un corps le nombre constant qui exprime le rapport d'une force quelconque à l'accélération qu'elle imprime à ce corps.*

Si maintenant on considère, en particulier, parmi les forces qui peuvent agir sur un corps, celle qui résulte de l'action de la pesanteur sur lui, c'est-à-dire son poids P, et si l'on désigne par  $g$  l'accélération qu'il prend sous cette action (accélération que nous verrons être la même pour tous les corps, en un même lieu), on aura

$$\frac{P}{g} = m.$$

On peut donc appeler, en particulier, *masse d'un corps, le rapport de son poids à l'accélération qu'il prend sous l'action de la pesanteur.*

Cette expression  $\frac{P}{g}$  comprend, d'une part, la quantité P, qui dépend de l'unité de force; d'autre part, la quantité  $g$ , qui dépend de l'unité de longueur et de l'unité de temps, puisque l'accélération est la variation



évaluée par la vitesse dans l'unité de temps. Si, comme on le fait en Mécanique, on prend comme unité de force le *kilogramme*, comme unité de longueur le *mètre* et comme unité de temps la *seconde*, pour le corps dont la masse est l'unité, on doit avoir  $P=g$ . La valeur de l'accélération à Paris étant  $9^m,81$ , l'unité de masse est alors la masse d'un corps dont le poids réel (dans le vide) à Paris est  $9^{ku},81$ .

**12. Mesure des forces constantes, par les accélérations qu'elles produisent.** — Outre l'emploi des *dynamomètres*, qui permettent de mesurer les forces par les flexions qu'elles produisent sur un ressort (8), nous avons maintenant un autre moyen de mesure, fondé sur l'observation des effets de mouvements.

Soit un corps dont on connaît préalablement le poids  $P$  : en divisant le nombre  $P$  par le nombre  $g$ , on connaît la masse de ce corps,  $m = \frac{P}{g}$ . Dès lors, si l'on peut observer l'accélération  $\gamma$  qu'imprime à ce même corps la force qu'on se propose de mesurer, on aura, entre la valeur inconnue  $F$  de la force et l'accélération connue  $\gamma$ , la relation

$$\frac{F}{\gamma} = m,$$

d'où l'on déduira la valeur de la force

$$F = m\gamma.$$

#### COMPOSITION DES FORCES.

**13. Représentation géométrique des forces.** — Une force est complètement définie lorsqu'on donne : 1° son *point d'application*, c'est-à-dire le point sur lequel s'exerce son action; 2° sa *direction*, c'est-à-dire la direction du mouvement qu'elle tend à imprimer à ce point; 3° son *intensité*, c'est-à-dire sa valeur numérique, évaluée à l'aide de l'unité de force. — On représente géométriquement une force par une droite partant du point d'application, dirigée dans le sens même de la force et égale à autant de fois l'unité de longueur que la force contient de fois l'unité de force.

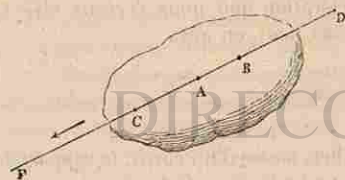


Fig. 6.

Lorsqu'une force  $F$ , appliquée en un point  $A$  d'un corps solide (fig. 6), le sollicite dans une direction  $AF$ , il est aisé de voir que l'on peut toujours supposer le point d'application de cette force transporté

en tout autre point  $C$  ou  $B$  du corps, situé sur la même direction, et même en un point  $D$  extérieur au corps, pourvu que l'on suppose, en même temps, ce point *lié invariablement au premier*.

**14. Composition des forces appliquées en un même point.** —

On démontre que, si plusieurs forces sont appliquées en un même point, elles peuvent toujours être remplacées par une force unique, ou *résultante*, produisant à elle seule le même effet que toutes les autres. — Nous nous contenterons d'énoncer, sans démonstration, les règles qui permettent d'obtenir cette résultante, dans les divers cas :

1° Deux forces appliquées en un même point et dirigées dans le même sens, ont une résultante égale à leur somme, et dirigée dans le même sens que les forces proposées;

2° Deux forces appliquées en un même point, dans la même direction mais en sens contraire, ont une résultante égale à leur différence, et dirigée dans le sens de la plus grande des deux forces proposées;

3° Deux forces  $P, Q$  (fig. 7), appliquées en un même point  $A$ , dans des directions différentes, ont une résultante représentée, pour sa grandeur, sa direction et son sens, par la diagonale  $AR$  du parallélogramme qui a pour côtés adjacents les deux forces proposées.

Pour obtenir la résultante d'un nombre quelconque de forces appliquées en un même point, on composera d'abord deux de ces forces en une seule; puis, la résultante partielle ainsi obtenue, avec une troisième force; et ainsi de suite, jusqu'à ce qu'on ait réduit toutes les forces à une seule, qui sera la résultante du système tout entier.

**15. Composition des forces parallèles.** — 1° Deux forces parallèles et de même sens  $P, Q$  (fig. 8), appliquées en deux points  $A, B$  d'un

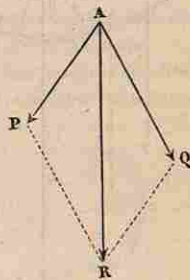


Fig. 7.



Fig. 8.

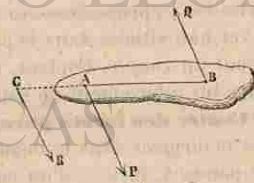


Fig. 9.

corps solide, ont une résultante  $R$  qui leur est parallèle, dirigée dans le même sens qu'elles, égale en grandeur à leur somme, et placée de manière

que sa direction partage la droite AB en deux parties AC, BC, inversement proportionnelles aux intensités de ces forces P et Q.



Fig. 10.

2° Deux forces parallèles, de sens contraires et inégales, P, Q (fig. 9), appliquées en deux points A, B d'un corps solide, ont une résultante R, qui leur est parallèle, égale en grandeur à leur différence, dirigée dans le sens de la plus grande, et placée de manière que sa direction rencontre le prolongement de la droite AB en un point C, tel que les distances AC, BC soient inversement proportionnelles aux intensités des forces P et Q.

Pour composer ensemble un nombre quelconque de forces parallèles et dirigées dans le même sens, p, p', p'',... (fig. 10), appliquées en divers points A, B, C... d'un corps solide, il suffira de composer deux de ces forces, p, p', en une seule r; puis cette résultante partielle avec une troisième force p''; et ainsi de suite,

jusqu'à ce qu'on ait réduit toutes les forces à une seule R, qui sera la résultante du système.

Si l'on a des forces parallèles, dirigées, les unes dans un sens, les autres en sens contraire, on composera d'abord les premières en une résultante R, qui sera dirigée dans le même sens qu'elles; puis, les secondes, en une résultante R', qui sera dirigée en sens contraire de R. — Si ces deux forces R et R' sont inégales, elles auront une résultante égale à leur différence: ce sera la résultante du système proposé. — Si les forces R et R' sont égales et situées dans le prolongement l'une de l'autre, elles se feront équilibre, c'est-à-dire que la résultante de toutes les forces proposées sera nulle. — Enfin, si les forces R et R' sont égales, et non situées dans le prolongement l'une de l'autre, elles constitueront un couple, tendant, comme on l'indiquera plus loin (17), à produire un mouvement de rotation.

16. **Centre des forces parallèles.** — Soit un système de forces parallèles et dirigées dans le même sens, p, p', p'',... (fig. 10), appliquées en des points A, B, C... d'un corps solide. Supposons qu'on change la direction commune de ces forces (comme l'indiquent les lignes marquées en traits discontinus), sans changer, ni leurs points d'application, ni leur parallélisme, ni leurs rapports d'intensité. On voit que le point D de la droite AB, par lequel passe la première résultante r, ne

sera pas changé, puisque la position de ce point est déterminée par la relation  $\frac{AD}{BD} = \frac{p'}{p}$ ; et ainsi de suite pour tous les points semblables, jusqu'au point O, par lequel passe toujours la résultante totale. Ce point prend alors le nom de *centre des forces parallèles*.

On appelle donc *centre des forces parallèles*, pour un système déterminé de forces parallèles et de même sens, appliquées en des points déterminés d'un corps solide, le point par lequel passe constamment la résultante de ce système, lorsqu'on change la direction commune des forces, sans changer leur parallélisme ni leurs rapports d'intensité.

17. **Couples.** — On donne le nom de *couple*, à un système de deux forces parallèles, P, P' (fig. 11), de sens contraires et égales entre elles, appliquées en deux points différents A, B d'un corps solide, et ayant une direction différente de celle de la droite AB qui joint leurs points d'application. Un pareil système ne peut être remplacé par une résultante; il tend à imprimer au corps un mouvement de rotation.

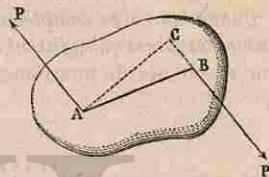


Fig. 11.

On appelle *bras de levier* d'un couple, la longueur AC de la perpendiculaire commune aux deux forces. — On appelle *moment* du couple, le produit du nombre qui exprime la mesure de l'une des forces P, par le nombre qui exprime la mesure du bras de levier AC.

On démontre qu'un couple doit être considéré comme ayant pour mesure son *moment*. — Il faut entendre par là que, si l'on prend pour unité le couple qui a pour force l'unité de force et pour bras de levier l'unité de longueur, le nombre qui exprime la mesure d'un couple quelconque est égal au produit du nombre qui exprime la mesure de la force, par le nombre qui exprime la mesure du bras de levier.

18. **Composition des forces de directions quelconques.** appliquées en des points différents d'un corps. — On démontre que des forces en nombre quelconque, appliquées en divers points d'un corps, suivant des directions quelconques, peuvent toujours se réduire à un couple et à une force non située dans le plan du couple.

C'est donc seulement dans certains cas particuliers, qu'un système de forces appliquées à un même corps peut se réduire, soit simplement à un couple, soit simplement à une force. — On a vu, par exemple, que des forces appliquées en un même point peuvent toujours être remplacées par une force unique (14). Il en est de même quand les forces, appliquées en des points différents d'un corps, ont des directions *concourantes*, c'est-à-dire quand leurs directions passent par un même point; en effet, on peut alors les considérer comme appliquées toutes

à ce point de concours (13); par suite, on peut toujours les composer en une force unique, passant par ce point.

19. **Équilibre.** — Lorsque des forces, agissant simultanément sur un corps complètement libre, se neutralisent de manière à ne pouvoir pas produire de mouvement, on dit qu'elles se font équilibre.

Ainsi, deux forces égales et de sens contraires, appliquées en un même point, se font évidemment équilibre. — Il en est de même quand deux forces égales sont appliquées en deux points différents d'un corps solide, et agissent en sens contraire, dans la direction même de la droite qui joint ces deux points.

On démontre que, toutes les fois que des forces se font équilibre sur un corps complètement libre, chacune d'elles peut être considérée comme égale et directement opposée à la résultante de toutes les autres.

Quand un corps complètement libre est animé d'un mouvement uniforme, les forces qui agissent sur lui se font équilibre; car, si elles avaient une résultante, le mouvement serait varié.

TRAVAIL. — FORCE VIVE.

20. **Travail d'une force, pour un déplacement déterminé de son point d'application.** — Lorsqu'un corps, soumis à l'action d'une force, éprouve un déplacement, on dit, en général, qu'il y a un travail effectué. — Pour évaluer la grandeur de cet effet, on doit tenir compte, non seulement de la grandeur de la force, mais aussi de la grandeur du déplacement de son point d'application. C'est ce que nous allons montrer par un exemple.

Considérons un corps ayant pour poids 1 kilogramme, et soulevons-le verticalement, d'un mouvement uniforme, à 1 mètre de hauteur; d'après ce qu'on vient de voir (19), la force musculaire nécessaire et suffisante est de 1 kilogramme (\*); le travail effectué par cette force est l'unité de travail adoptée en Mécanique; on l'appelle kilogram-

(\*) En réalité, pour mettre ce corps en mouvement, il faudra, pendant un intervalle de temps très court  $\theta$ , lui appliquer une force un peu plus grande  $1 + \epsilon$ . L'excès  $\epsilon$  de la force musculaire sur le poids, agissant de bas en haut pendant le temps  $\theta$ , augmentera la vitesse de zéro à  $v$ . — Au bout du temps  $t$ , la force musculaire n'étant plus que 1 kilogramme, le mouvement deviendra uniforme et le corps conservera la vitesse  $v$ . — Un peu avant que le corps ait parcouru 1 mètre, pour le ramener au repos, on ne lui appliquera plus, pendant le même intervalle de temps  $\theta$ , qu'une force musculaire un peu moindre  $1 - \epsilon$ ; l'excès  $\epsilon$  du poids sur la force musculaire, agissant maintenant de haut en bas, diminuera la vitesse, au bout du temps  $\theta$ , de  $v$  à zéro. — Quand on considère le corps comme constamment soumis à une force musculaire de 1 kilogramme, on néglige les petites variations que doit éprouver cette force, au début et à la fin du mouvement, variations qui sont nécessaires pour amener le corps de l'état de repos à l'état de mouvement uniforme, ou de l'état de mouvement à l'état de repos.

mètre. Or, si l'on veut soulever verticalement, d'un mouvement uniforme, à 1 mètre de hauteur, un corps dont le poids est P kilogrammes, la force musculaire développée doit être P fois plus grande; le travail effectué sera P kilogrammètres. — Enfin, si le même corps, pesant P kilogrammes, est soulevé à une hauteur de  $h$  mètres, le travail effectué sera encore  $h$  fois plus grand, c'est-à-dire qu'il aura pour mesure, en kilogrammètres, le produit des deux nombres P et  $h$ ; on aura, en représentant ce travail par W,

$$W = Ph.$$

21. **Travail moteur. Travail résistant.** — Dans l'exemple que nous venons de choisir, la force musculaire, qui est dirigée dans le sens du déplacement, est dite *motrice*, et son travail est dit *moteur*. D'autre part, le poids du corps, qui est une force dirigée en sens contraire du déplacement, est la force *résistante*; son travail est appelé *travail résistant*.

Tant que le mouvement est uniforme, la force motrice et la force résistante sont égales; le déplacement des points d'application étant le même, le travail moteur est égal au travail résistant.

22. **Travail d'une force, pour un déplacement dans une direction autre que celle de la force.** — Si le mobile A, soumis à

l'action de la force F (fig. 12), se déplace suivant AB, on peut remplacer la force F par deux composantes, dont l'une, F'', serait dirigée perpendiculairement au déplacement, et l'autre, F', dans la direction du déplacement lui-même. La première n'a évidemment aucun effet sur le mouvement effectué; la force F' est la seule dont on doive considérer l'action. On prend alors, comme travail de la force considérée, le travail de la *composante efficace*. Si  $e$  désigne l'espace parcouru AB, l'expression du travail sera F'e.

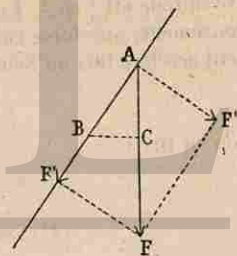


Fig. 12.

Désignons par  $\alpha$  l'angle BAF et par  $z$  la projection AC du déplacement AB sur la direction de la force; on a les égalités :

$$F' = F \cos \alpha \quad e = \frac{z}{\cos \alpha};$$

l'expression du travail est donc :

$$W = F'e = Fz.$$

Le travail a donc encore pour mesure le produit de la force (supposée constante en grandeur et en direction) par la projection du déplacement sur la direction de la force.

Ce résultat subsiste encore si le mobile se déplace suivant une ligne brisée ABCD (fig. 15). Les travaux de la force F pendant ces déplacements successifs sont :

$$F \times AB', \quad F \times B'C', \quad F \times C'D';$$

Par suite, le travail total  $F \times AD'$  est indépendant de la trajectoire suivie, entre le point A et un point quelconque de la droite DD'.

Dans le cas actuel, le mobile se déplaçant du point A au point D, le travail de la force F est moteur; on le compte positivement. — Si le mobile se déplaçait en sens inverse, suivant DCBA, le travail de la force F serait résistant; on le compterait négativement.

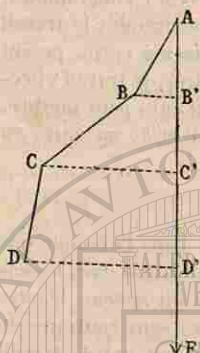


Fig. 15.

**25. Force vive. — Principe des forces vives.** — On désigne sous le nom de *point matériel* un corps, de masse  $m$ , dont les dimensions sont tellement petites qu'on peut l'assimiler à un point géométrique. On appelle *force vive* d'un point matériel, le demi-produit de sa masse par le carré de sa vitesse  $\frac{1}{2}mv^2$ . Cette expression est constamment positive.

Soit un point de masse  $m$ , animé d'une vitesse initiale  $v_0$ ; sa force vive initiale est  $\frac{1}{2}mv_0^2$ . Faisons agir sur ce point, dans le sens de son mouvement, une force constante F; le mouvement devient uniformément accéléré (9); au bout du temps  $t$ , la vitesse est devenue :

$$v = v_0 + \gamma t;$$

d'où on tire :

$$v - v_0 = \gamma t, \quad v + v_0 = 2v_0 + \gamma t,$$

$$v^2 - v_0^2 = 2\gamma \left[ v_0 t + \frac{\gamma t^2}{2} \right] = 2\gamma e.$$

L'accroissement de la force vive  $\frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}mv_0^2$  est donc égal à  $m\gamma e$ , c'est-à-dire au produit  $Fe$ , qui mesure le travail moteur de la force pendant l'intervalle de temps considéré.

Si la force F était résistante, c'est-à-dire dirigée en sens inverse du mouvement du mobile, le mouvement serait uniformément retardé, la vitesse  $v$  serait plus petite que la vitesse initiale, et la diminution de la force vive serait égale au travail résistant de la force pendant l'intervalle de temps considéré.

On démontre, en Mécanique, le théorème général suivant : Quand un système solide, formé d'un nombre quelconque de points matériels, est animé d'un mouvement quelconque, pendant un intervalle de temps déterminé, la somme algébrique des travaux de toutes les forces appli-

quées aux différents points du système est égale, en grandeur et en signe, à la variation de la somme des forces vives de tous les points pendant ce même temps. — C'est l'énoncé connu sous le nom de *principe des forces vives*, principe dont nous admettrons la généralité.

**24. Transmission du travail dans les machines.** — Une machine simple (levier, treuil) est un corps solide, assujéti à une liaison déterminée, et auquel sont appliquées deux forces non directement opposées, la *puissance* et la *résistance*.

Dans la plupart des cas, la machine sert à utiliser le travail qui correspond à un déplacement du point d'application de la puissance, pour produire un déplacement du point d'application de la résistance. Les travaux correspondants à ces deux déplacements sont toujours égaux en valeur absolue : c'est ce que nous allons montrer, en prenant comme exemple le levier.

Le levier est une barre rigide AB, mobile autour d'un point O (fig. 14); la fixité du point O constitue la liaison. — La résistance appliquée au point B est, par exemple, le poids d'un corps pesant, que l'on veut soulever au moyen d'une force musculaire, la puissance, appliquée au point A. Supposons le levier au repos : la résultante des deux forces P et R doit passer par le point d'appui; elle a pour effet d'appuyer le levier sur son point fixe, et développe une force égale et directement opposée, la *réaction* du point d'appui; c'est la force de liaison. On doit donc avoir (15) :

$$\frac{P}{R} = \frac{OB}{OA}.$$

L'équilibre subsiste encore quand la machine est animée d'un mouvement uniforme (19). Au bout d'un intervalle de temps déterminé, le levier occupera la position A'B'; la similitude des triangles AOA', BOB', donne la relation :

$$\frac{OB}{OA} = \frac{BB'}{AA'}$$

qui, combinée avec l'égalité précédente, donne :

$$P \times AA' = R \times BB'.$$

Le travail moteur de la puissance  $P \times AA'$  est donc égal au travail résistant  $R \times BB'$ . — Il en est ainsi dans toute machine en mouvement uniforme; nous en rencontrerons d'autres exemples.

L'égalité du travail moteur et du travail résistant, dans une machine en mouvement uniforme, est une conséquence du principe des forces vives. En effet, les différents points qui constituent la machine ont une force vive constante; donc la somme algébrique des travaux des forces est nulle. D'autre part, le travail de la force de liaison est nul, puisque son point d'application

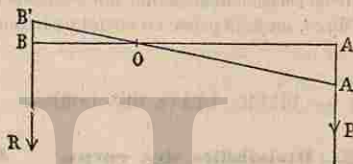


Fig. 14.

est fixe; donc le travail positif de la puissance est égal, en valeur absolue, au travail négatif de la résistance.

Une *machine composée* est un système dont les divers organes sont des machines simples; telle est la machine à vapeur. — Généralement, le mouvement est périodique; c'est-à-dire que, au bout d'un intervalle de temps appelé période, les différents points de la machine reprennent les mêmes positions relatives et sont animés de la même vitesse. Au commencement et à la fin de la période, la force vive totale reprend la même valeur; la somme algébrique des travaux des forces est nulle, c'est-à-dire que le travail moteur positif et le travail résistant négatif sont égaux en valeur absolue pendant la durée de la période. Dans la première partie de la période, le travail moteur est plus grand que le travail résistant, la force vive de la machine augmente; à la fin de la période, la force vive diminue, le travail résistant est supérieur au travail moteur.

Une machine, simple ou composée, ne crée donc pas de travail; l'avantage d'une machine est essentiellement de permettre de vaincre, avec une force motrice relativement petite, une résistance considérable; mais ce qu'on gagne en force, on le dépense en chemin parcouru.

## II. — DIVERS ÉTATS DES CORPS. — DIVERS ÉTATS DE L'ÉNERGIE

25. **Divisibilité des corps. — Atomes. — Molécules.** — Les corps, en général, peuvent être divisés en parties de plus en plus petites, sans perdre les propriétés qui les caractérisent. — Cependant, bien que l'on puisse diviser la matière en parties d'une petitesse extrême, l'étude des propriétés des corps a conduit à admettre que chacun d'eux est formé d'*atomes* (à négatif, *τεμνω* couper) c'est-à-dire de particules insécables, disposées par groupes, chaque groupe constituant une *molécule* (diminutif de *moles*, masse).

On doit se représenter ces molécules comme ayant des dimensions tellement petites, qu'elles échapperont toujours à nos regards, même avec le secours des microscopes les plus puissants. Le physicien anglais Williams Thomson a été conduit par le calcul à cette conclusion, que si on pouvait voir une goutte d'eau avec un grossissement tel, qu'elle apparût avec la grosseur de la Terre, ses molécules n'acquerraient encore que des dimensions comparables à celles de grains de sable.

On admet que les molécules ne sont pas en contact les unes avec les autres, mais qu'elles sont séparées par des intervalles appelés *pores*, dont les dimensions sont comparables à celles des molécules elles-mêmes. — Cette hypothèse permet, par exemple, de se rendre compte des propriétés suivantes : 1° tous les corps éprouvent une *diminution de volume* quand on exerce sur eux une *pression* suffisante; 2° tous les corps éprouvent une *variation de volume* quand on fait varier leur *température*. Ces variations de volumes s'expliquent par les variations de grandeur des intervalles qui existent entre leurs molécules.

26. **Corps simples. — Corps composés.** — Pour certaines substances, nous savons effectuer la division de deux façons bien distinctes. — Une goutte d'eau, réduite en gouttelettes de plus en plus fines, fournit toujours des parties ayant les propriétés de l'eau. — Au contraire, en soumettant l'eau à l'action d'un courant électrique, on la décompose en deux gaz (l'oxygène et l'hydrogène), dont les propriétés n'ont plus rien de commun avec celles de l'eau. — Ce dernier mode de division est donc essentiellement distinct de la division mécanique. Il est naturel d'admettre que chaque molécule d'eau est formée d'atomes d'hydrogène et d'atomes d'oxygène, qui se séparent sous l'influence de l'électricité.

Parmi les corps connus, il en est qu'on n'a jamais pu décomposer en éléments différents; tels sont l'hydrogène, l'oxygène, le fer, etc...; on les nomme *corps simples*; leurs molécules sont formées d'atomes tous identiques. — L'eau est, au contraire, un *corps composé*.

27. **But de la Physique.** — Que des corps simples s'unissent pour former un corps composé, ou que les éléments d'un corps composé se séparent, la quantité de matière n'est pas modifiée; il n'y a de changé que le mode de groupement des atomes. — La loi de l'*indestructibilité de la matière* a été posée par Lavoisier.

Le but essentiel de la *Chimie* est l'étude des conditions particulières dans lesquelles les atomes de diverses natures s'unissent entre eux ou se séparent les uns des autres.

La *Physique*, au contraire, étudie les phénomènes qui se produisent sans que la constitution intime des corps soit modifiée.

28. **États physiques des corps.** — Les divers états physiques sous lesquels les corps se présentent à nous peuvent se rapporter à trois types : l'*état solide*, l'*état liquide* et l'*état gazeux*.

1° *État solide.* — Nous appellerons *état solide*, celui d'un corps dont le volume et la forme demeurent constants, quelque grandes que fussent les forces qui lui seraient appliquées.

Les corps qu'on appelle vulgairement *corps solides*, et sur lesquels peuvent porter nos expériences, ne sont jamais rigoureusement conformes à cette définition; quand on soumet un corps solide à des actions mécaniques, comme des pressions ou des tractions énergiques, il éprouve en général une déformation plus ou moins sensible. Mais, dès que ces actions cessent de s'exercer, il revient à sa forme primitive, pourvu que la déformation n'ait pas été trop grande. — On appelle *élasticité*, la propriété en vertu de laquelle les corps, momentanément déformés par des actions extérieures, tendent à reprendre leur forme primitive dès que ces actions sont supprimées (\*).

(\* L'acier trempé possède une grande élasticité : nous voyons chaque jour des ressorts d'acier se courber sous l'action des pressions qu'ils éprouvent, et reprendre leur forme quand ces pressions cessent. — Le plomb, au contraire, est à peu près dénué

est fixe; donc le travail positif de la puissance est égal, en valeur absolue, au travail négatif de la résistance.

Une *machine composée* est un système dont les divers organes sont des machines simples; telle est la machine à vapeur. — Généralement, le mouvement est périodique; c'est-à-dire que, au bout d'un intervalle de temps appelé période, les différents points de la machine reprennent les mêmes positions relatives et sont animés de la même vitesse. Au commencement et à la fin de la période, la force vive totale reprend la même valeur; la somme algébrique des travaux des forces est nulle, c'est-à-dire que le travail moteur positif et le travail résistant négatif sont égaux en valeur absolue pendant la durée de la période. Dans la première partie de la période, le travail moteur est plus grand que le travail résistant, la force vive de la machine augmente; à la fin de la période, la force vive diminue, le travail résistant est supérieur au travail moteur.

Une machine, simple ou composée, ne crée donc pas de travail; l'avantage d'une machine est essentiellement de permettre de vaincre, avec une force motrice relativement petite, une résistance considérable; mais ce qu'on gagne en force, on le dépense en chemin parcouru.

## II. — DIVERS ÉTATS DES CORPS. — DIVERS ÉTATS DE L'ÉNERGIE

25. **Divisibilité des corps.** — **Atomes.** — **Molécules.** — Les corps, en général, peuvent être divisés en parties de plus en plus petites, sans perdre les propriétés qui les caractérisent. — Cependant, bien que l'on puisse diviser la matière en parties d'une petitesse extrême, l'étude des propriétés des corps a conduit à admettre que chacun d'eux est formé d'*atomes* (à négatif, *τεμνω* couper) c'est-à-dire de particules insécables, disposées par groupes, chaque groupe constituant une *molécule* (diminutif de *moles*, masse).

On doit se représenter ces molécules comme ayant des dimensions tellement petites, qu'elles échapperont toujours à nos regards, même avec le secours des microscopes les plus puissants. Le physicien anglais Williams Thomson a été conduit par le calcul à cette conclusion, que si on pouvait voir une goutte d'eau avec un grossissement tel, qu'elle apparût avec la grosseur de la Terre, ses molécules n'acquerraient encore que des dimensions comparables à celles de grains de sable.

On admet que les molécules ne sont pas en contact les unes avec les autres, mais qu'elles sont séparées par des intervalles appelés *pores*, dont les dimensions sont comparables à celles des molécules elles-mêmes. — Cette hypothèse permet, par exemple, de se rendre compte des propriétés suivantes : 1° tous les corps éprouvent une *diminution de volume* quand on exerce sur eux une *pression* suffisante; 2° tous les corps éprouvent une *variation de volume* quand on fait varier leur *température*. Ces variations de volumes s'expliquent par les variations de grandeur des intervalles qui existent entre leurs molécules.

26. **Corps simples.** — **Corps composés.** — Pour certaines substances, nous savons effectuer la division de deux façons bien distinctes. — Une goutte d'eau, réduite en gouttelettes de plus en plus fines, fournit toujours des parties ayant les propriétés de l'eau. — Au contraire, en soumettant l'eau à l'action d'un courant électrique, on la décompose en deux gaz (l'oxygène et l'hydrogène), dont les propriétés n'ont plus rien de commun avec celles de l'eau. — Ce dernier mode de division est donc essentiellement distinct de la division mécanique. Il est naturel d'admettre que chaque molécule d'eau est formée d'atomes d'hydrogène et d'atomes d'oxygène, qui se séparent sous l'influence de l'électricité.

Parmi les corps connus, il en est qu'on n'a jamais pu décomposer en éléments différents; tels sont l'hydrogène, l'oxygène, le fer, etc...; on les nomme *corps simples*; leurs molécules sont formées d'atomes tous identiques. — L'eau est, au contraire, un *corps composé*.

27. **But de la Physique.** — Que des corps simples s'unissent pour former un corps composé, ou que les éléments d'un corps composé se séparent, la quantité de matière n'est pas modifiée; il n'y a de changé que le mode de groupement des atomes. — La loi de l'*indestructibilité de la matière* a été posée par Lavoisier.

Le but essentiel de la *Chimie* est l'étude des conditions particulières dans lesquelles les atomes de diverses natures s'unissent entre eux ou se séparent les uns des autres.

La *Physique*, au contraire, étudie les phénomènes qui se produisent sans que la constitution intime des corps soit modifiée.

28. **États physiques des corps.** — Les divers états physiques sous lesquels les corps se présentent à nous peuvent se rapporter à trois types : l'*état solide*, l'*état liquide* et l'*état gazeux*.

1° *État solide.* — Nous appellerons *état solide*, celui d'un corps dont le *volume* et la *forme* demeurent constants, quelque grandes que fussent les forces qui lui seraient appliquées.

Les corps qu'on appelle vulgairement *corps solides*, et sur lesquels peuvent porter nos expériences, ne sont jamais rigoureusement conformes à cette définition; quand on soumet un corps solide à des actions mécaniques, comme des pressions ou des tractions énergiques, il éprouve en général une déformation plus ou moins sensible. Mais, dès que ces actions cessent de s'exercer, il revient à sa forme primitive, pourvu que la déformation n'ait pas été trop grande. — On appelle *élasticité*, la propriété en vertu de laquelle les corps, momentanément déformés par des actions extérieures, tendent à reprendre leur forme primitive dès que ces actions sont supprimées (\*).

(\* L'acier trempé possède une grande élasticité : nous voyons chaque jour des ressorts d'acier se courber sous l'action des pressions qu'ils éprouvent, et reprendre leur forme quand ces pressions cessent. — Le plomb, au contraire, est à peu près dénué

2° *État liquide.* — Nous appellerons *état liquide*, celui d'un corps dont le volume demeurerait constant, quelles que fussent les forces qui lui seraient appliquées, mais dont la forme dépendrait essentiellement de celle des parois solides avec lesquelles il serait en contact.

Des expériences précises prouvent que les liquides sur lesquels nous pouvons opérer éprouvent des variations de volume, très petites d'ailleurs et toujours temporaires, quand on les soumet à des pressions considérables. Sous le rapport de l'invariabilité du volume, ils ne satisfont donc pas rigoureusement à la définition précédente. — Mais ils ont une forme essentiellement variable, comme l'indique la définition. Leurs parties présentent, les unes par rapport aux autres, une mobilité telle, qu'il suffit de faire passer une masse d'eau ou de mercure d'un vase dans un autre, pour la voir prendre la forme du second vase, sous la seule action de son poids (\*).

3° *État gazeux.* — On appelle *corps gazeux*, des corps qui ont, comme les liquides, la propriété d'avoir une forme essentiellement variable, mais qui se distinguent des liquides en ce qu'ils tendent toujours à occuper le plus grand volume possible. — En d'autres termes, quand une masse de gaz est introduite dans une enveloppe quelconque, elle se répand dans tout l'espace qui lui est offert, et continue encore à exercer sur les parois une pression tendant à les écarter. Cette pression est ce qu'on nomme la *force élastique* ou la *tension* du gaz.

Pour mettre en évidence la force élastique des gaz, prenons une vessie presque dégonflée, c'est-à-dire contenant très peu d'air, et ficelons-en solidement l'ouverture. Il semble que l'air enfermé dans la vessie n'exerce aucune pression sur ses parois; mais si l'on place la vessie sous une cloche reposant sur le plateau de la machine pneumatique (fig. 15), et qu'on enlève progressivement l'air de la cloche,

d'élasticité : pour peu qu'un morceau de plomb ait été déformé par une pression ou une traction exercée en certaines de ses parties, la déformation persiste après que les actions extérieures cessent de s'exercer.

(\*) La mobilité des molécules, qui caractérise l'état liquide, n'appartient cependant pas non plus, au même degré, aux divers liquides que nous pouvons soumettre à l'expérience. — Si l'on prend des fiocons partiellement remplis d'eau ou d'éther, qu'on les agite et qu'on les abandonne ensuite au repos, on voit disparaître presque instantanément l'écume qui avait été produite par l'interposition de bulles d'air dans la masse : l'écume persiste plus longtemps avec l'huile, l'eau de savon, à cause de la résistance qu'éprouvent les molécules pour reprendre les positions que tend à leur donner la pesanteur. Cette résistance au mouvement, qu'on désigne sous le nom de *viscosité*, se manifeste dans tous les liquides, à un degré plus ou moins marqué.

Nous voyons aussi se manifester une sorte de transition, entre les corps qui se rapprochent de l'état liquide idéal et ceux qui sont voisins de l'état solide parfait : les corps *mous*, comme le potassium, le sodium, le phosphore, ne peuvent être classés ni parmi les solides, ni parmi les liquides; les forces qui tendent à les déformer produisent sur eux des effets comparables à ceux qu'elles produiraient sur des corps solides ou sur des corps liquides, selon que ces forces ont une intensité plus ou moins grande.

on voit la vessie se distendre, jusqu'à remplir presque entièrement la cloche (fig. 16). Donc, si elle ne se distendait pas d'abord, c'est que la

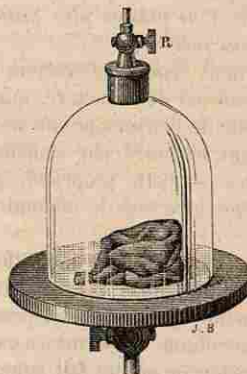


Fig. 15.

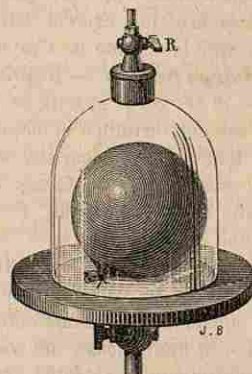


Fig. 16.

*force élastique* de l'air qu'elle contient était équilibrée par la pression de l'air environnant. — D'ailleurs, si l'on ouvre le robinet R de la cloche, de manière à laisser rentrer l'air autour de la vessie, on la voit s'affaisser de nouveau.

Cette expérience montre donc, non seulement que l'air possède une *force élastique*, mais aussi qu'il est *compressible*, c'est-à-dire que son volume diminue, quand la pression qui s'exerce sur lui vient à augmenter. — C'est ce que nous allons constater également dans l'expérience suivante.

29. *Expérience du briquet à air.* — La *force élastique d'un gaz augmente quand on diminue son volume.* — Le *briquet à air* se compose d'un tube de verre épais (fig. 17), fermé à l'une de ses extrémités, et dans lequel on introduit un piston garni de cuir et bien graissé. On enferme ainsi, dans le tube, une certaine quantité d'air. — En appuyant, avec la main, sur la tige du piston, on arrive à le faire pénétrer dans le tube jusqu'à une certaine profondeur, ce qui prouve que l'air est *compressible*. — Mais, en enfonçant ainsi progressivement le piston, on éprouve une résistance de plus en



Fig. 17. — Briquet à air.

plus grande; cette résistance finit même par devenir assez considérable pour qu'il soit difficile de pousser le piston plus loin. Donc, la *force élastique* de l'air qui, pour chaque position du piston, fait équilibre à la pression exercée sur lui, devient de *plus en plus grande*, à mesure que le volume de l'air devient *plus petit* (\*).

50. **Corps fluides.** — D'après ce que nous venons de voir, les corps liquides et les corps gazeux se ressemblent par ce caractère, que leur forme est indéterminée et dépend de celle de l'enveloppe qui les contient, leurs diverses parties se déplaçant les unes par rapport aux autres sous l'action de forces très petites. — Cette propriété, qui les distingue des corps solides, les fait comprendre sous la dénomination commune de *corps fluides*.

Mais, d'autre part, il y a, entre les liquides et les gaz, une différence fondamentale. Un corps liquide, défini comme nous l'avons fait plus haut, conserve un volume constant, quelles que soient les pressions qui lui sont appliquées; au contraire, le volume d'une masse gazeuse est essentiellement variable avec la pression qu'on lui fait supporter. — Aussi désigne-t-on souvent les liquides sous le nom de *fluides incompressibles*, et les gaz sous le nom de *fluides élastiques* (\*\*).

51. **De l'énergie.** — On appelle *énergie* d'un corps, la faculté que possède ce corps de produire du travail. — Un corps peut posséder de l'énergie de deux manières différentes :

Soit un boulet de canon de masse  $m$ , lancé horizontalement avec une vitesse  $v$  : sa force vive est  $\frac{1}{2}mv^2$ . Quand le boulet rencontre un obstacle, il y a, à la fois, anéantissement de la force vive, et production d'un effet mécanique : d'après le principe des forces vives (25), la quantité  $\frac{1}{2}mv^2$  est la mesure du travail effectué. C'est donc la mesure d'une certaine quantité d'énergie, que possédait le boulet par le fait même de son mouvement. Pour cette raison, on l'appelle *énergie de mouvement* ou *énergie actuelle*.

Un corps de poids  $P$ , suspendu par un fil à une hauteur  $h$ , pourrait, si l'on venait à couper le fil, produire en tombant un travail égal à  $Ph$  kilogrammètres. Sa puissance de travail, autrement dit son énergie, dépend donc de la position qu'il occupe par rapport au niveau du sol; c'est pourquoi on l'appelle *énergie de position*; on la nomme encore *énergie potentielle*. — De même, un ressort tendu possède plus d'éner-

(\*) Cet appareil a reçu le nom de *briquet à air*, à cause de la chaleur que dégage la compression de l'air. Lorsqu'on enfonce brusquement la tige, l'élévation de température peut devenir assez grande pour allumer un morceau d'amadou fixé à la partie inférieure du piston.

(\*\*) Ainsi qu'on l'a fait remarquer plus haut, les liquides sur lesquels portent nos expériences éprouvent de petites diminutions de volume quand on exerce sur eux des pressions considérables. Ce ne sont donc pas des fluides rigoureusement incompressibles, mais leurs variations de volume sont toujours très petites.

gie que s'il était détendu, puisqu'il peut, en se détendant, produire du travail; cette énergie dépend de la position relative des molécules du ressort; c'est encore de l'*énergie potentielle* (\*).

On appelle *énergie totale* d'un corps, la somme de son énergie actuelle et de son énergie potentielle.

52. **Conservation de l'énergie.** — Quand un corps ou un système de corps est soustrait à toute action extérieure (chaleur, électricité, lumière...), *son énergie totale demeure constante*; l'énergie actuelle et l'énergie potentielle varient toujours, en sens inverse, d'une même quantité.

Ce principe est général; nous le démontrerons pour un cas particulier. — Un corps, de masse  $m$ , de poids  $P=mg$ , tombe d'une hauteur  $h$  avec une vitesse initiale nulle. Au départ, son énergie de position relativement au sol (énergie potentielle) est  $mgh$ ; sa force vive de translation est nulle. Au bout d'un certain temps, il a parcouru un espace  $e$ , et, d'après ce qu'on a vu (4), sa vitesse est devenue  $v=\sqrt{2ge}$ ; l'énergie potentielle a diminué de  $mge$ , mais l'énergie actuelle s'est accrue de  $\frac{1}{2}mv^2=mge$ ; l'énergie totale est donc demeurée constante.

Il est cependant des cas où ce principe semble en défaut. Quand une masse de plomb tombe sur le sol, d'une certaine hauteur, sa force vive s'anéantit sans qu'il y ait accroissement d'énergie potentielle; mais, dans ce cas, le plomb s'échauffe, c'est-à-dire qu'il *apparaît de la chaleur*. Nous verrons par la suite que, pour une même quantité déterminée d'énergie qui semble disparaître, il apparaît toujours une même quantité de chaleur. Une analyse attentive des phénomènes conduit d'ailleurs à considérer la chaleur, l'électricité, la lumière, comme n'étant que des modes divers de l'énergie; un corps chaud, électrisé ou lumineux, possède plus d'énergie que le même corps froid, non électrisé ou non lumineux.

L'énergie ne disparaît donc jamais : elle se transforme, mais elle est indestructible comme la matière.

Tandis que le but de la chimie est l'étude des modifications de la matière, on peut dire que le but de la physique est l'étude de l'énergie et des phénomènes qui accompagnent ses diverses transformations.

(\*) Considérons encore deux flacons de même capacité, conservés dans l'obscurité, et contenant, l'un de l'acide chlorhydrique gazeux, l'autre un mélange à volumes égaux de chlore et d'hydrogène. Les quantités de matières sont les mêmes, mais la position des atomes est différente; dans le premier flacon, chaque molécule comprend des atomes d'hydrogène et des atomes de chlore; dans le second flacon, certaines molécules ne contiennent que des atomes d'hydrogène, d'autres molécules ne sont formées que d'atomes de chlore. Aussi l'énergie n'est-elle pas la même; si un rayon solaire tombait sur le second flacon, il se produirait une violente explosion, accompagnée d'effets mécaniques intenses. Cette énergie supplémentaire du second flacon est encore de l'*énergie potentielle*.



## III. — UNITÉS C. G. S.

53. **Du choix des unités.** — Conformément aux conventions usitées en Mécanique, nous avons, dans ce qui précède, choisi d'abord trois unités, qui correspondent à trois espèces de grandeurs n'ayant entre elles aucun lien, ce qui nous a permis de fixer arbitrairement chacune de ces trois unités : 1° l'unité de longueur (mètre); 2° l'unité de temps (seconde); 3° l'unité de force (kilogramme). — Ces trois unités fondamentales une fois choisies, toutes les autres unités (unités dérivées) s'en déduisent, par des formules de définition. Par exemple, l'unité de masse et l'unité de travail sont définies par les formules précédemment établies (11 et 25) :

$$m = \frac{F}{\gamma} \frac{P}{g}, \quad W = Fe,$$

ce qui revient à dire, que l'unité de masse est la masse d'un corps qui, à Paris, pèse  $9^{\text{m}},81$ ; que l'unité de travail est le travail qu'il faut effectuer pour soulever un poids de 1 kilogramme à 1 mètre de hauteur. Cette unité de travail a reçu le nom de *kilogrammètre*; c'est aussi l'unité d'énergie; car, si on soulève une masse pesant 1 kilogramme à 1 mètre de hauteur, on augmente son énergie potentielle d'une unité; d'autre part, si l'on dépense un travail égal à un kilogrammètre pour mettre un corps en mouvement, d'après le principe des forces vives, l'énergie actuelle du corps augmente de 1 kilogrammètre.

Mais ce système d'unités, adopté par les physiciens jusqu'à ces dernières années, présente l'inconvénient de faire dépendre l'unité de masse, et un certain nombre d'autres unités dérivées, de la valeur de l'accélération de la chute des corps. Cet inconvénient est manifeste, comme l'a fait remarquer Gauss, quand il s'agit d'évaluer des actions magnétiques ou électriques, qui n'ont aucune relation directe avec la pesanteur elle-même.

Ces considérations ont conduit à substituer, au système d'unités qui précède, un système différent, dont les bases, posées par Gauss, ont été adoptées par l'ensemble des physiciens réunis en Congrès, en 1881.

54. **Unités C. G. S.** — Dans ce nouveau système, les trois unités fondamentales ne sont plus les unités de longueur, de force et de temps, mais les unités de longueur, de masse et de temps (l'unité de force devient une unité dérivée).

L'unité de longueur est le centimètre.

L'unité de masse est la masse du gramme, c'est-à-dire la masse d'un centimètre cube d'eau distillée, à la température de 4°. Cette unité prend le nom de *gramme-masse*.

L'unité de temps est la seconde de temps moyen.

Le système constitué par cet ensemble d'unités fondamentales et par les unités dérivées a reçu le nom de système C. G. S. (centimètre, gramme, seconde).

L'unité de force est alors définie, (12), par la relation  $F = m\gamma$ . Si l'on pose  $m = 1$  et  $\gamma = 1$ , on aura  $F = 1$ . L'unité de force, appelée *dyne* (du grec δύναμις, force), est donc la force qui imprimerait à l'unité de masse une accélération de 1 centimètre en 1 seconde.

Pour avoir une idée de la grandeur de la dyne, calculons la valeur  $F$  de l'ancienne unité de force (le kilogramme à Paris) exprimée en dynes. — Cette force  $F$ , appliquée à une masse égale à 1000 grammes-masses, lui imprime une accélération égale à 981 centimètres; on a alors, en appliquant la formule  $F = m\gamma$ ,

$$F = 1000 \times 981 \text{ dynes.}$$

Le nombre 981 étant approximativement égal à 1000, on voit que la force d'un kilogramme représente à peu près un million de dynes, ou ce qu'on appelle une *mégadyne*. En d'autres termes, la dyne équivaut sensiblement à un millionième de kilogramme, ou 1 milligramme. — Exactement, l'ancienne unité, le gramme-poids, vaut 981 dynes.

L'unité de travail ou d'énergie est définie, d'après ce qu'on a vu (20), par la relation  $W = Fe$ . Si l'on pose  $F = 1$ , et  $e = 1$ , on aura  $W = 1$ . L'unité d'énergie, appelée *erg* (du grec ἔργον, travail), est le travail produit par une force d'une dyne qui déplace son point d'application de 1 centimètre. — Un milligramme, tombant de un centimètre de hauteur, accomplit à peu près un travail de 1 erg; quand on soulève un milligramme à un centimètre de hauteur, on augmente son énergie de 1 erg.

Il est d'ailleurs facile de calculer la valeur du kilogrammètre au moyen de cette nouvelle unité. — Dans la formule  $W = Fe$ , faisons  $F$  égal à 1 kilogramme, c'est-à-dire à  $1000 \times 981$  dynes, et faisons  $e$  égal à 1 mètre, c'est-à-dire 100 centimètres: nous aurons

$$W = 1000 \times 981 \times 100 \text{ ergs;}$$

le kilogrammètre vaut donc sensiblement  $10^8$  ergs, ou 100 mégergs (*méga*, un million).

## IV. — INSTRUMENTS DE MESURE.

55. **Mesure des longueurs.** — **Vernier.** — Pour mesurer une longueur rectiligne, le procédé général consiste à porter sur cette longueur, autant de fois que possible, le mètre et ses subdivisions. La

plus petite subdivision usitée est le millimètre, en raison de la nécessité de donner aux traits une épaisseur qui les rende visibles à l'œil nu. Or il arrive, le plus souvent, que la longueur à mesurer contient, avec un nombre entier de millimètres, une fraction de millimètre que ce mode de division ne permet pas d'évaluer avec exactitude. L'emploi du vernier est destiné à pousser plus loin l'approximation, sans modifier les subdivisions de la règle.

Imaginons deux règles (fig. 18), l'une AB fixe et divisée en millimètres, l'autre CD plus courte et mobile le long de la première. Supposons que la longueur de CD soit égale à celle de 9 divisions de AB, et qu'elle soit partagée en 10 parties égales, dont chacune vaut ainsi  $\frac{1}{10}$  de millimètre; cette petite règle est le vernier.



Fig. 18. — Vernier.



Fig. 19.

la figure, cherchons, parmi les traits du vernier, quel est celui qui se trouve en regard de l'un des traits de la règle : supposons par exemple que ce soit le septième. Puisqu'une division de AB équivaut à 1 millimètre, et une division de CD à  $0^{\text{mm}},9$ , il est clair que la distance des traits marqués 6 et *a* est  $0^{\text{mm}},1$ ; celle des traits marqués 5 et *b* est  $0^{\text{mm}},2$ ; enfin la distance du zéro du vernier au trait *g* est de  $0^{\text{mm}},7$ . En général, le numéro d'ordre de la division du vernier qui coïncide avec un trait de la grande règle, donne la fraction additionnelle, en dixièmes de millimètre (\*).

56. **Cathétomètre.** — Le cathétomètre, imaginé par Dulong et Petit, est destiné à mesurer la distance verticale de deux points, c'est-à-dire la distance des plans horizontaux qui passent par ces points.

(\*) Si l'on prenait un vernier dont la longueur totale fût égale à 49 millimètres, et que l'on divisât cette longueur en 50 parties égales, on pourrait de même effectuer des mesures en cinquantièmes de millimètre. Il n'y a d'ailleurs aucun avantage à dépasser cette limite, parce que en égard à la largeur des traits eux-mêmes, les coïncidences paraîtraient réalisées simultanément pour plusieurs traits consécutifs du vernier et de la règle.

Le cathétomètre (fig. 20 et 21) se compose essentiellement d'une lunette horizontale AB mobile le long d'une règle verticale graduée MN, laquelle tourne librement elle-même autour d'un axe vertical. — Les figures 20 et 21 montrent deux vues d'un même instrument, prises de deux positions opposées : la colonne verticale MN a ici la forme d'un

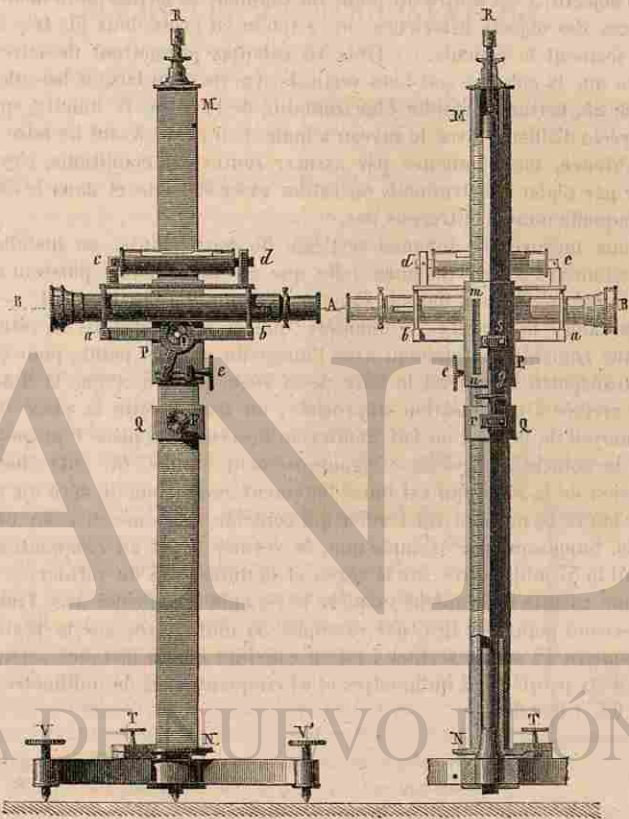


Fig. 20.

Cathétomètre.

Fig. 21.

prisme triangulaire, qui porte une division en millimètres sur l'une de ses faces (fig. 21), et qui est traversé suivant son axe par une barre métallique : c'est sur cette barre que se fait la rotation, autour de la pointe de la vis R. — La lunette est portée par un chariot formé de deux pièces P, Q, qui sont liées entre elles par une vis *g* (fig. 21) : en *r*, cette vis n'est qu'assujettie dans une sorte de collier; en *s*, le pas de

la vis tourne dans un écrou fixé à la pièce P. La pièce inférieure Q porte une vis de pression F (fig. 20) qui permet de la fixer solidement sur la colonne, et alors la vis *g* peut faire monter ou descendre la pièce P, de quantités aussi petites qu'on veut. Un vernier est tracé sur l'arête de la fenêtre *mn* (fig. 21). — A l'intérieur de la lunette, au foyer de l'objectif, c'est-à-dire au point où viennent se former nettement les images des objets extérieurs, on a tendu en croix deux fils très fins, qui forment le réticule. — Trois vis calantes permettent de faire en sorte que la colonne soit bien verticale. La vis *e*, en faisant basculer la pièce *ab*, permet d'établir l'horizontalité de l'axe de la lunette, qu'on apprécie d'ailleurs avec le niveau à bulle d'air *cd*. — Avant de faire une expérience, on commence par assurer toutes ces conditions, c'est-à-dire par régler l'instrument, opération assez délicate et dans le détail de laquelle nous n'entrerons pas.

Pour mesurer la distance verticale de deux points, on installe le cathétomètre à une distance telle que ces deux points puissent être distingués nettement dans la lunette, et l'on règle l'instrument. — On place alors la lunette de manière que le *croisé* des fils du réticule vienne coïncider exactement avec l'image du premier point; pour cela, on transporte le chariot le long de la règle jusqu'à ce que la lunette soit arrivée à une position approchée; on fixe ensuite la pièce Q, et au moyen de la vis *g* on fait monter ou descendre la pièce P jusqu'à ce que la coïncidence paraisse rigoureusement établie. On note alors la division de la règle qui est immédiatement au-dessous du zéro du vernier *mn* et le numéro du vernier qui coïncide avec une division de la règle. Supposons par exemple que, le vernier étant au cinquantième, on ait lu 57 millimètres sur la règle, et le numéro 45 du vernier. — On amène ensuite de la même manière le réticule à coïncider avec l'image du second point. On lira, par exemple, 55 millimètres sur la règle et le numéro 12 sur le vernier: on en conclura que la distance verticale des deux points est 2 millimètres et 51 cinquantièmes de millimètre, ou 2<sup>mm</sup>,62, à 0<sup>mm</sup>,02 près.

## LIVRE PREMIER

### PESANTEUR ET HYDROSTATIQUE

#### CHAPITRE PREMIER

##### PESANTEUR

###### I. — PESANTEUR. — CENTRE DE GRAVITÉ.

57. **Direction de la pesanteur. — Verticale.** — On donne le nom de *pesanteur* à la cause qui sollicite les corps à tomber vers le sol, et qui détermine ce mouvement quand les corps ne sont pas soutenus.

Suspendons à l'extrémité d'un fil un corps quelconque, une balle de plomb par exemple, et prenons à la main l'autre extrémité du fil: l'effort que nous avons à faire pour soutenir le corps montre qu'il est sollicité par une *force*, à laquelle cet effort fait équilibre. — Quant à la direction de cette force, c'est évidemment celle que prend le fil lui-même, quand il arrive au repos: cette direction est ce qu'on nomme la *verticale*.

L'instrument, si simple, que l'on réalise en suspendant à l'extrémité d'un fil un corps solide quelconque (fig. 22), est ce qu'on nomme un *fil à plomb*. — Il est fréquemment employé, pour régler la verticalité des murs des édifices et, en général, des objets dont on veut assurer l'équilibre.

58. **Tout se passe comme si la pesanteur était due à une attraction émanant du centre de la terre.** — Lorsqu'on place plusieurs fils à plomb à côté les uns des autres, ils paraissent parallèles, c'est-à-dire que leurs directions semblent ne jamais devoir se rencontrer, quelque loin qu'on les prolonge. — Mais, d'autre part, l'observation montre que, en chaque point du globe, la *verticale est perpendiculaire à la surface des eaux tranquilles*. Or, la surface des



Fig. 22.  
Fil à plomb.

la vis tourne dans un écrou fixé à la pièce P. La pièce inférieure Q porte une vis de pression F (fig. 20) qui permet de la fixer solidement sur la colonne, et alors la vis *g* peut faire monter ou descendre la pièce P, de quantités aussi petites qu'on veut. Un vernier est tracé sur l'arête de la fenêtre *mn* (fig. 21). — A l'intérieur de la lunette, au foyer de l'objectif, c'est-à-dire au point où viennent se former nettement les images des objets extérieurs, on a tendu en croix deux fils très fins, qui forment le réticule. — Trois vis calantes permettent de faire en sorte que la colonne soit bien verticale. La vis *e*, en faisant basculer la pièce *ab*, permet d'établir l'horizontalité de l'axe de la lunette, qu'on apprécie d'ailleurs avec le niveau à bulle d'air *cd*. — Avant de faire une expérience, on commence par assurer toutes ces conditions, c'est-à-dire par régler l'instrument, opération assez délicate et dans le détail de laquelle nous n'entrerons pas.

Pour mesurer la distance verticale de deux points, on installe le cathétomètre à une distance telle que ces deux points puissent être distingués nettement dans la lunette, et l'on règle l'instrument. — On place alors la lunette de manière que le *croisé* des fils du réticule vienne coïncider exactement avec l'image du premier point; pour cela, on transporte le chariot le long de la règle jusqu'à ce que la lunette soit arrivée à une position approchée; on fixe ensuite la pièce Q, et au moyen de la vis *g* on fait monter ou descendre la pièce P jusqu'à ce que la coïncidence paraisse rigoureusement établie. On note alors la division de la règle qui est immédiatement au-dessous du zéro du vernier *mn* et le numéro du vernier qui coïncide avec une division de la règle. Supposons par exemple que, le vernier étant au cinquantième, on ait lu 57 millimètres sur la règle, et le numéro 45 du vernier. — On amène ensuite de la même manière le réticule à coïncider avec l'image du second point. On lira, par exemple, 55 millimètres sur la règle et le numéro 12 sur le vernier : on en conclura que la distance verticale des deux points est 2 millimètres et 51 cinquantièmes de millimètre, ou 2<sup>mm</sup>,62, à 0<sup>mm</sup>,02 près.

## LIVRE PREMIER

### PESANTEUR ET HYDROSTATIQUE

#### CHAPITRE PREMIER

##### PESANTEUR

###### I. — PESANTEUR. — CENTRE DE GRAVITÉ.

57. **Direction de la pesanteur. — Verticale.** — On donne le nom de *pesanteur* à la cause qui sollicite les corps à tomber vers le sol, et qui détermine ce mouvement quand les corps ne sont pas soutenus.

Suspendons à l'extrémité d'un fil un corps quelconque, une balle de plomb par exemple, et prenons à la main l'autre extrémité du fil : l'effort que nous avons à faire pour soutenir le corps montre qu'il est sollicité par une *force*, à laquelle cet effort fait équilibre. — Quant à la direction de cette force, c'est évidemment celle que prend le fil lui-même, quand il arrive au repos : cette direction est ce qu'on nomme la *verticale*.

L'instrument, si simple, que l'on réalise en suspendant à l'extrémité d'un fil un corps solide quelconque (fig. 22), est ce qu'on nomme un *fil à plomb*. — Il est fréquemment employé, pour régler la verticalité des murs des édifices et, en général, des objets dont on veut assurer l'équilibre.

58. **Tout se passe comme si la pesanteur était due à une attraction émanant du centre de la terre.** — Lorsqu'on place plusieurs fils à plomb à côté les uns des autres, ils paraissent parallèles, c'est-à-dire que leurs directions semblent ne jamais devoir se rencontrer, quelque loin qu'on les prolonge. — Mais, d'autre part, l'observation montre que, en chaque point du globe, la *verticale est perpendiculaire à la surface des eaux tranquilles*. Or, la surface des



Fig. 22.  
Fil à plomb.

eaux qui recouvrent une partie considérable du globe est sensiblement sphérique; donc, en chaque point, les directions prolongées de toutes les verticales iraient passer sensiblement par le centre de la terre.



Fig. 25.

Dès lors, si deux verticales, menées en des points du globe voisins l'un de l'autre A et A' (fig. 25), semblent parallèles, c'est que le point où elles iraient se rencontrer est à une distance considérable, par rapport à la distance des points où on les observe. Mais, si l'on considère des verticales menées en des points suffisamment éloignés l'un de l'autre à la surface de la terre, comme A et B, ou A et C, ces verticales font entre elles un angle d'autant plus grand que la distance des deux points est plus considérable.

Enfin, puisque la verticale, en chaque point du globe, est la direction qui suivent les corps pesants, abandonnés à eux-mêmes, on peut dire que tout se passe comme si la pesanteur était due à une attraction exercée par la terre sur les corps, et comme si cette attraction émanait du centre même du globe (\*).

**59. Poids d'un corps. — Centre de gravité.** — Lorsqu'on divise une pierre, ou un corps quelconque, en parties de plus en plus petites, l'observation montre que chacune de ces parties est pesante, c'est-à-dire qu'elle tombe quand aucun obstacle ne s'oppose à sa chute. — On est ainsi conduit à considérer l'action de la pesanteur comme s'exerçant à la fois sur tous les points matériels dont chaque corps se compose.

Mais, d'autre part, tant que ces divers points sont réunis entre eux, les forces qui les sollicitent, et qui doivent être considérées comme parallèles et de même sens, ont une résultante de même sens qu'elles et égale à leur somme (15). Donc les forces dues à la pesanteur, qui agissent sur les divers points d'un même corps, ont une résultante qui est verticale, dirigée de haut en bas, et égale à la somme de ces forces; on la nomme poids du corps. — De là, la définition suivante : *Le poids*

(\*) C'est la généralisation de cette idée qui a été le point de départ des immortels travaux de Newton sur les mouvements des astres, et de sa théorie de l'attraction universelle. — Dans cette théorie, les mouvements des astres, les uns par rapport aux autres, sont dus à leurs attractions mutuelles, et tout se passe comme si, pour chaque astre en particulier, la force attractive qu'il exerce sur les autres émanait de son centre. Les astres ayant été, à l'origine, lancés dans l'espace, ce sont leurs attractions réciproques qui les maintiennent dans les routes que nous les voyons parcourir.

d'un corps est la résultante des actions de la pesanteur sur tous les points de ce corps.

Enfin, on sait que la résultante de tout système de forces parallèles passe par un point qui demeure invariable, quelle que soit la direction de ces forces par rapport au corps, pourvu qu'elles restent parallèles entre elles et qu'elles conservent leurs rapports d'intensité (16) : ce point s'appelle, en général, le centre des forces parallèles; dans le cas des forces dues à la pesanteur, qui sollicitent les divers points d'un même corps, il prend le nom de centre de gravité du corps. — Ainsi, le centre de gravité d'un corps est le point par lequel passe constamment la résultante des forces dues à la pesanteur, appliquées à ce corps, quelque position que l'on donne au corps dans l'espace et en quelque lieu du globe qu'on le transporte.

**40. Détermination expérimentale du centre de gravité.** — Lorsqu'un corps est homogène (c'est-à-dire lorsqu'il présente, dans toutes ses parties, un même poids sous un même volume), et qu'il est terminé par une surface géométriquement définie, la Mécanique donne

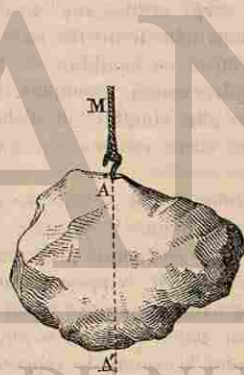


Fig. 24.

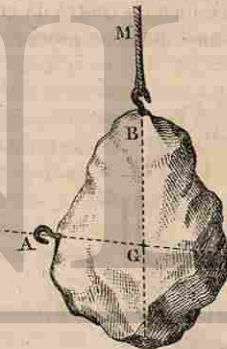


Fig. 25.

des règles qui permettent de trouver la position de son centre de gravité. — Il est, d'ailleurs, des cas où cette position s'obtient immédiatement par des considérations de symétrie. C'est ainsi que le centre de gravité d'une sphère est au centre de cette sphère; celui d'un parallélépipède, au point de rencontre des diagonales, etc.

Mais, quelle que soit la forme ou la structure d'un corps solide, on peut déterminer le centre de gravité par le procédé expérimental suivant : — On suspend le corps, par l'un quelconque de ses points A, à l'extrémité d'un fil flexible MA (fig. 24), et on laisse l'équilibre s'établir. Puisque tout se passe comme si le corps était sollicité par une force

unique, appliquée en son centre de gravité, il est évident que le fil a dû se placer dans la direction même de cette force : en d'autres termes, si l'on prolonge au travers du corps la direction du fil MA, on peut être certain que ce prolongement AA' passe par la position, encore inconnue, du centre de gravité. — On suspend alors le corps par un autre point quelconque B (fig. 25), et on laisse de nouveau l'équilibre s'établir : le prolongement BB' de la direction du fil doit encore passer par le centre de gravité. Ces deux droites AA' et BB' se coupent donc nécessairement, en un point G, qui est le centre de gravité cherché.

*Remarque.* — On est souvent conduit à considérer, comme centre de gravité d'un corps solide, un point qui ne fait pas partie du corps lui-même. Tel est le cas d'un anneau solide, dont le centre de figure est évidemment le centre de gravité. — Si l'on veut, pour la solution d'une question quelconque, remplacer le système des forces élémentaires qui agissent sur les divers points de l'anneau, par une force unique appliquée en son centre, il est clair qu'on devra raisonner comme si le centre était lié à l'anneau lui-même d'une manière invariable.

**41. Équilibre d'un corps soutenu par un de ses points.** — La connaissance du centre de gravité d'un corps permet souvent d'exprimer d'une manière précise les conditions dans lesquelles un corps peut se trouver en équilibre. — Nous allons prendre, comme exemples, deux des cas les plus simples; et d'abord, le cas d'un corps soutenu par un de ses points.

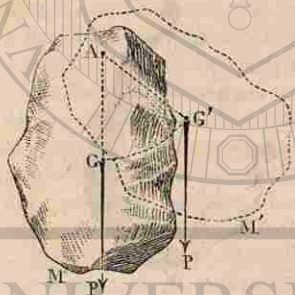


Fig. 26. — Équilibre stable.

**1° Équilibre stable.** — Soit un corps de forme quelconque M (fig. 26), soutenu par un de ses points A et mobile autour de ce point. Supposons que le centre de gravité G se trouve sur la verticale menée par le point A, et au-dessous du point A, comme le représente la figure 26. Il est évident que le corps sera en équilibre; son poids P, appliqué au point G, dans le prolongement même de la direction AG, n'aura pas d'autre effet que d'appuyer sur le point A. — Dérangeons maintenant le corps, vers la droite par exemple, et amenons-le dans une autre position M. Dès que nous l'abandonnerons à lui-même, le poids P, appliqué à la nouvelle position G' du centre de gravité, aura pour effet de ramener le corps vers la gauche, c'est-à-dire vers sa position primitive M; en vertu de la vitesse qu'il aura ainsi acquise, il dépassera en général cette position; mais son poids le ramènera alors en sens inverse, et ainsi de suite, de sorte que, après quelques oscillations de part et d'autre de la position M, il reviendra à cette position.

On dit alors que la position M est une position d'équilibre stable, c'est-à-dire que le corps, si on l'en écarte, tend toujours à y revenir, sous l'action de son poids. — On peut remarquer que c'est la position pour laquelle le centre de gravité est situé le plus bas possible au-dessous du point de suspension.

**2° Équilibre instable.** — Reprenons maintenant le même corps, soutenu toujours par le point A, et plaçons-le dans une position N, telle que son centre de gravité G se trouve encore sur la verticale passant par le point A, mais au-dessus du point A, comme le représente la figure 27. Le corps sera encore en équilibre; son poids P, appliqué au centre de gravité G, dans une direction GA qui passe par le point A, n'aura pas d'autre effet que d'appuyer sur ce point. — Mais, si nous dérangeons le corps, vers la droite par exemple, et que nous l'aménions dans une position telle que N', son poids P', appliqué à la nouvelle position G' du centre de gravité, tendra à l'écartier de plus en plus vers la droite, et à le ramener à la position M de la figure précédente.

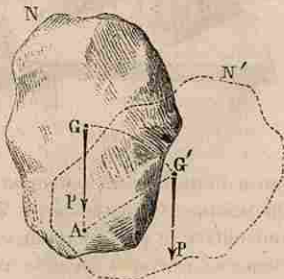


Fig. 27. — Équilibre instable.

On dit alors que la position N est une position d'équilibre instable, c'est-à-dire que le corps, si on l'écarte de cette position, continue à s'en écartier de plus en plus, sous l'action de son poids. — On peut remarquer que c'est la position pour laquelle le centre de gravité est situé le plus haut possible au-dessus du point de suspension.

**3° Équilibre indifférent.** — Considérons enfin le cas tout particulier où le point de suspension A serait le centre de gravité même du corps (fig. 28). — Il est évident que, quelle que soit la position donnée au corps autour de ce point, son poids P, étant alors appliqué au point de suspension lui-même, n'aura jamais d'autre effet que d'appuyer sur ce point.

On dit alors que le corps est en équilibre indifférent, c'est-à-dire qu'il reste toujours en équilibre, quelle que soit la position qu'on lui donne autour du point de suspension.

**42. Équilibre d'un corps placé sur un plan horizontal.** — Considérons un corps, comme une chaise ou une table, reposant sur un sol horizontal par un certain nombre de points. Si nous joignons entre eux ces points d'appui, c'est-à-dire les extrémités des pieds de la chaise ou de la table, nous obtenons un polygone, que nous appel-



Fig. 28. — Équilibre indifférent.

lerons *polygone de sustentation*. — Lorsqu'il s'agit d'un corps reposant sur un plan par une surface plane, comme le prisme P ou le prisme P' (fig. 29), le polygone de sustentation n'est autre que la base même du prisme, c'est-à-dire la surface qui comprend tous les points par lesquels il touche le plan qui le soutient.

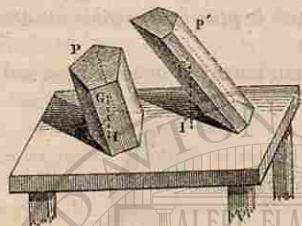


Fig. 29.

Dans tous les cas de ce genre, pour que le corps soit en équilibre, il faut et il suffit que la verticale menée par son centre de gravité vienne rencontrer le plan d'appui à l'intérieur du polygone de sustentation. C'est le cas du prisme P dans la figure 29. — Si cette verticale vient rencontrer le plan d'appui en dehors de ce polygone, le corps se renverse du côté même où tombe le pied de la verticale. C'est le cas du prisme P'.

## II. — CHUTE DES CORPS.

43. *Chute des corps dans le vide*. — Lorsqu'on abandonne, à la même distance du sol et au même instant, des corps de diverses natures ou de diverses formes, comme une balle de plomb, un morceau de liège, une feuille de papier, on constate qu'il mettent, pour arriver au sol, des temps sensiblement différents. — Ces différences sont dues uniquement à l'influence de la résistance de l'air : c'est ce que montre l'expérience suivante.

On prend un gros tube de verre (fig. 50), de deux mètres de longueur environ, fermé à ses extrémités par des garnitures de cuivre, dont l'une est munie d'un robinet. On introduit dans ce tube quelques grains de plomb, de petits morceaux de papier ou des barbes de plume, etc.; puis, on y fait le vide au moyen de la machine pneumatique. L'appareil étant ainsi préparé, si on le retourne brusquement, tous les corps qu'il contient arrivent ensemble à l'extrémité inférieure. Si l'on ouvre un instant le robinet pour laisser rentrer un peu d'air, et qu'on recommence l'expérience, on voit le papier et les barbes de plume rester en arrière sur les grains de plomb; le retard est d'autant plus grand qu'il est rentré plus d'air. Enfin, quand on ouvre entièrement le robinet, les différences



Fig. 50.

reparaissent, aussi considérables qu'elles le seraient à l'air libre (\*). — 44. *Marteau d'eau*. — Lorsqu'on laisse tomber un liquide d'une certaine hauteur, il se subdivise de plus en plus pendant la chute; si la hauteur de chute est un peu grande, le liquide arrive au sol comme une espèce de pluie. Ce résultat est produit par l'air que le liquide rencontre, et qui s'interpose entre ses parties. — Examinons, en effet, comment se fait la chute d'un liquide dans le vide. Nous emploierons, pour cela, l'appareil connu sous le nom de *marteau d'eau*.



Fig. 52. — Marteau d'eau.

Cet appareil se compose d'un tube de verre (fig. 52) terminé en boule à l'une de ses extrémités : on a introduit de l'eau dans le tube, à peu près jusqu'aux deux tiers, et l'on a chassé l'air qui remplissait encore le reste de l'appareil, en faisant bouillir vivement l'eau dans le tube, avant de fermer à la lampe la pointe qui surmonte la boule. — Prenons le

(\*) Il semble d'abord difficile de comprendre comment des corps de poids différents peuvent tomber dans le vide avec la même vitesse. — Or, considérons deux corps identiques, deux cubes de cuivre C et C', par exemple (fig. 51). Ces deux corps tomberont évidemment avec la même vitesse, c'est-à-dire que, s'ils sont à côté l'un de l'autre au départ, ils resteront juxtaposés pendant toute la chute. De là résulte que, si on les réunit ensemble, de manière à en former un bloc unique R, la chute de ce bloc aura encore lieu de la même manière : le corps R sera alors sollicité par une force P, double de la force p qui sollicitait l'un des corps C; mais cette force sera employée à mettre en mouvement une masse double, et le mouvement restera le même. — Un raisonnement semblable permet de comprendre comment des corps de natures différentes prennent, dans le vide, des mouvements identiques.

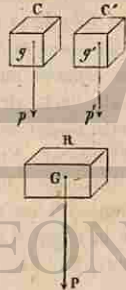


Fig. 51.

Pour faire concevoir, au moins d'une manière générale, les différences que présente la chute des divers corps tombant dans l'air, nous considérerons seulement un cas particulièrement simple. — Prenons une feuille de papier, que nous partagerons en deux moitiés égales. Plions l'une des moitiés, de manière à former un petit cube compact; laissons l'autre moitié déployée et plaçons-la horizontalement, à la même distance du sol que la face inférieure du cube. Les deux morceaux de papier comprenant le même nombre de molécules, la pesanteur agit sur chacun d'eux de la même manière et développe une même force p; cependant l'expérience montre que le premier met un temps beaucoup moins long que le second pour arriver au sol. Or, dès que le mouvement se produit, la résistance opposée par l'air doit être considérée comme une force dirigée en sens contraire du mouvement. Pour un même corps, la résistance augmente avec la vitesse, et elle est d'autant plus grande que la surface par laquelle le corps rencontre l'air est plus considérable. Donc, si l'on supposait les deux corps animés, à un instant déterminé, d'une même vitesse, le premier éprouverait une résistance r, tandis que le second, eu égard à l'étendue de sa surface, éprouverait une résistance R beaucoup plus grande. Ces deux masses égales

tube à la main et retournons-le d'abord lentement, de manière à accumuler toute l'eau du côté de la boule; puis redressons-le brusquement dans la position indiquée par la figure : le liquide tombe tout d'un bloc, et produit alors, contre le fond du tube, un choc qui a fait donner à cet appareil son nom de *marteau d'eau*.

La subdivision d'un liquide pendant la chute, telle qu'elle se produit dans les conditions ordinaires, est donc due à l'interposition de l'air.

**45. Lois de la chute des corps. — Principe de la machine d'Atwood.** — Puisque tous les corps prennent, dans le vide, sous l'action de la pesanteur, des mouvements identiques, il suffit d'étudier les lois de la chute pour *un seul corps*. — Mais l'étude directe de la chute libre d'un corps *dans le vide* présenterait de grandes difficultés pratiques. Pour étudier les lois du mouvement, on a eu recours à diverses dispositions : l'une des plus simples consiste dans l'emploi de la machine d'Atwood.

La machine d'Atwood, réduite à ses éléments essentiels, se compose d'une poulie R (fig. 53) sur laquelle passe un fil de soie très léger, supportant à ses extrémités des masses égales M, M, en sorte que les poids de ces masses se font équilibre. Si maintenant on vient à placer une masse additionnelle *m* sur l'une des masses M, l'équilibre n'existe plus; mais, comme le seul poids de la masse *m* doit entraîner simultanément les masses fixées aux deux extrémités du fil, on conçoit que ce mouvement doit être plus lent que celui de la chute libre. — Nous allons l'étudier d'abord et nous indiquerons ensuite comment il peut conduire aux lois de la chute libre.

*Lois des espaces.* — Pour déterminer la loi suivant laquelle varient les *espaces* parcourus au bout des temps successifs, on emploie une règle verticale divisée, le long de laquelle descend la masse M + *m*. Cette masse est maintenue au zéro de la règle, jusqu'au moment où le battement d'une horloge marque le commencement d'une seconde déterminée; la masse est alors abandonnée; on cherche, par tâtonnements, et en recommençant plusieurs fois l'expérience, en quel point de la règle il faut placer une plaque horizontale B portée par un curseur (fig. 54), pour qu'elle soit frappée par cette masse à l'instant où

étant alors sollicitées, l'une par la force  $p - r$ , l'autre par la force  $p - R$ , l'accroissement de vitesse éprouvé par la première, dans l'instant suivant, serait supérieur à l'accroissement de vitesse éprouvé par la seconde. Cela revient à dire que les mouvements de ces deux corps ne peuvent être identiques à aucun instant.

Lorsque l'on considère, en particulier, un corps formé d'une matière très dense, et ne rencontrant l'air que par une petite surface, on peut, si la vitesse ne devient jamais très grande, considérer la résistance  $r$  comme restant toujours négligeable. Un pareil corps, tombant sous l'action d'une force constante, prend alors un mouvement uniformément accéléré (9). — Dans tous les autres cas, le mouvement suit une loi complexe. — Cependant, la résistance R augmentant rapidement avec la vitesse, il arrive un moment où elle tend à devenir égale en grandeur au poids du corps, en sorte que le mouvement tend à se rapprocher d'un mouvement uniforme.

l'on entend le battement de l'horloge qui termine cette seconde. On connaît ainsi l'espace  $e_1$  qui est parcouru en une seconde. — On détermine de la même manière les espaces  $e_2, e_3, \dots$  parcourus en 2, 3... secondes (fig. 55 et 56). En comparant entre eux ces résultats, on trouve que les espaces  $e_1, e_2, e_3, \dots$  sont entre eux comme les nombres

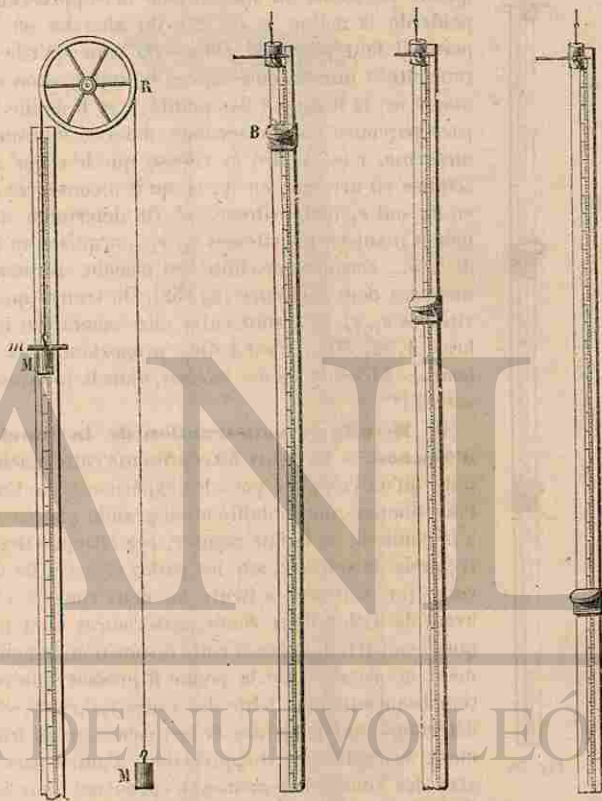


Fig. 53.

Fig. 54.

Fig. 55.

Fig. 56.

1, 4, 9..., c'est-à-dire comme les carrés des temps. — C'est ce qu'on nomme la *loi des espaces*, pour le mouvement du système actuel.

*Loi des vitesses.* — Si maintenant on se propose de mesurer directement, avec l'appareil, les *vitesses* acquises par le système à différents instants du mouvement, on emploie un autre curseur, portant un anneau A (fig. 57), qui laissera passer la masse M sans la toucher,



mais qui arrêtera au passage la masse additionnelle  $m$ , dont la forme est allongée. — On place d'abord l'anneau à la division  $e_1$ , de manière que la masse additionnelle  $m$  soit enlevée au bout d'une seconde; à partir de ce moment, la masse  $M$  continue à descendre d'un mouvement uniforme, avec la vitesse qu'elle possédait au moment de la suppression du poids de la masse  $m$  (5, 2<sup>o</sup>). On cherche en quel point il faut placer la plaque  $B$ , pour qu'elle soit rencontrée une seconde après la suppression de la masse  $m$ : la distance des points  $A$  et  $B$  donne l'espace parcouru en une seconde, dans ce mouvement uniforme, c'est-à-dire la vitesse que le corps avait acquise en arrivant en  $A$ , et qu'il a conservée de  $A$  en  $B$ ; soit  $v_1$  cette vitesse. — On détermine de la même manière les vitesses  $v_2, v_3, \dots$  acquises au bout de 2, 3, ... secondes de chute, en plaçant convenablement les deux curseurs (fig. 58). On trouve que les vitesses  $v_1, v_2, v_3, \dots$  sont entre elles comme les nombres 1, 2, 3, ... c'est-à-dire *proportionnelles aux temps*. — C'est la *loi des vitesses*, dans le mouvement actuel (\*).



Fig. 57. Fig. 58.

**46. Détails de construction de la machine d'Atwood.** — La figure 59 représente cette machine, telle qu'on l'emploie pour les expériences de Cours. Pour donner une mobilité aussi grande que possible à la poulie  $R$ , on la fait reposer, par chacune des extrémités de son axe, sur les jantes croisées de deux roues (on voit sur la figure les deux roues  $r, r'$ , en avant de  $R$ ; les deux roues postérieures sont masquées en partie). Grâce à cette disposition, le mouvement de rotation de la poulie  $R$  produit une rotation beaucoup plus lente des roues  $r, r', r'', r'''$ , et ne détermine, sur les jantes de ces roues, qu'un frottement de roulement inappréciable; d'autre part, les axes des roues elles-mêmes n'éprouvent, sur leurs supports, que des frottements très faibles, en raison de la lenteur du glissement.

Une horloge  $H$ , dont le balancier  $M$  bat les secondes, et dont l'aiguille

(\*) Si, prenant les résultats numériques fournis par ces expériences, on compare la vitesse  $v_1$  à l'espace parcouru  $e_1$ , on constate que  $v_1$  est double de  $e_1$ .

Il en est d'ailleurs toujours ainsi dans un mouvement uniformément accéléré, et sans vitesse initiale. En effet, si l'on fait  $t=1$  dans les formules établies précédemment (4, Remarque), il vient :  $v_1 = \frac{v}{2}$ ,  $e_1 = \frac{v}{2}$ , et, par suite,  $v_1 = 2e_1$ .

se meut sur un cadran divisé en 60 parties égales, sert à apprécier les durées des mouvements (\*).

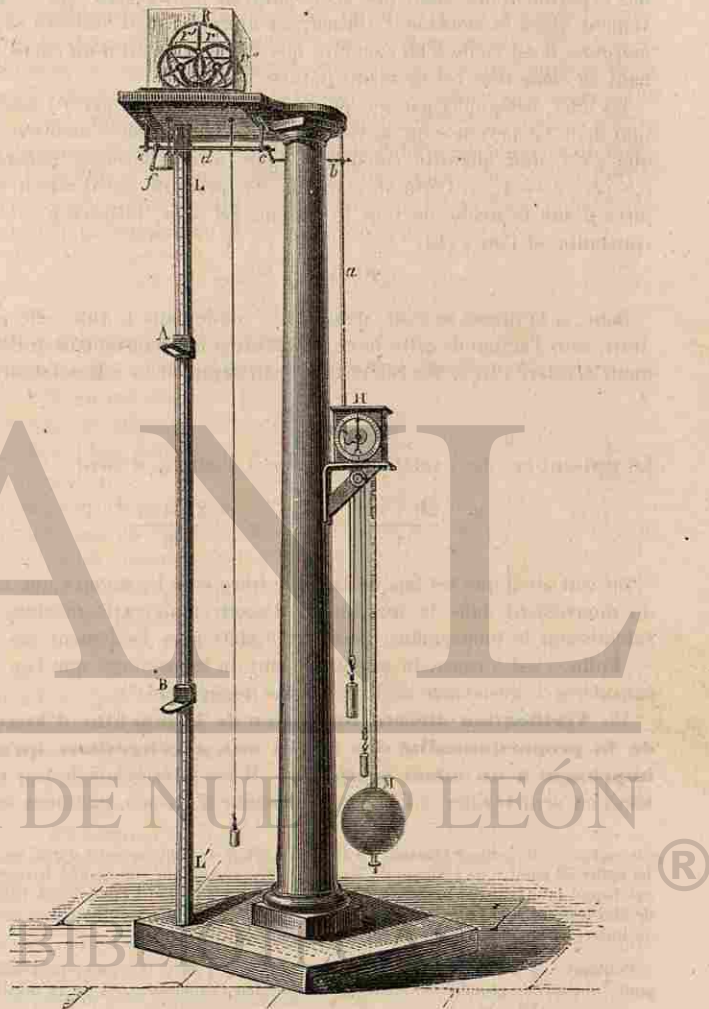


Fig. 59. — Machine d'Atwood.

(\*) L'appareil est souvent disposé de façon que ce soit l'horloge elle-même qui détermine le départ de la masse surchargée, à l'instant précis où l'aiguille arrive au zéro.

47. **Le mouvement des corps tombant en chute libre, dans le vide, est uniformément accéléré.** — On vient d'obtenir deux lois expérimentales, dont une seule suffirait pour établir que le mouvement, dans la machine d'Atwood, est uniformément accéléré (4, Remarque). Il est facile d'en conclure que le mouvement d'un corps tombant en chute libre est de même nature.

En effet, désignons par  $p$  le poids de la masse  $m$ , et par  $\gamma$  l'accélération dans l'expérience qu'on vient de faire. L'expérience même montre que  $\gamma$  est une quantité constante, égale aux différences constantes  $v_2 - v_1, v_3 - v_2, \dots$ . Cette accélération est produite par l'action de la force  $p$  sur la masse de tout le système  $2M + m$ ; la force  $p$  est donc constante, et l'on a (12)

$$p = (2M + m)\gamma.$$

Donc, si la masse  $m$  était abandonnée seule dans le vide, elle prendrait, sous l'action de cette force constante  $p$ , un mouvement uniformément accéléré (9), et l'accélération  $g$  satisferait alors à la relation

$$p = mg.$$

En divisant ces deux relations membre à membre, il vient

$$\frac{g}{\gamma} = \frac{2M + m}{m} \quad \text{ou} \quad g = \gamma \frac{2M + m}{m}.$$

On voit ainsi que les lois de la chute libre sont les mêmes que celles du mouvement dans la machine d'Atwood; mais cette machine, en ralentissant le mouvement, permet d'établir plus facilement ces lois. — Enfin, c'est à cause du ralentissement du mouvement que l'on peut considérer la résistance de l'air comme négligeable (\*).

48. **Vérification directe, au moyen de la machine d'Atwood, de la proportionnalité des forces aux accélérations qu'elles impriment à un même système.** — Il est intéressant de voir comment on peut vérifier, à l'aide de la machine d'Atwood, que deux forces

du cadran, c'est-à-dire à l'instant où l'horloge bat le commencement d'une seconde. La figure 39 montre un système de leviers coulés  $abcde$ , qui commande le support  $f$  par lequel la masse  $M + m$  est maintenue au zéro de la règle : à l'instant où l'aiguille de l'horloge arrive au zéro, une disposition particulière met en mouvement ce système de leviers, le support  $f$  s'abaisse, et le mouvement commence.

(\*) Quant à la détermination de la valeur numérique de  $g$ , il semble qu'il suffirait, pour l'obtenir, de prendre la valeur de  $\gamma$  tournée par l'expérience, et de la multiplier par le rapport  $\frac{2M + m}{m}$ , rapport que la balance peut fournir avec une grande précision.

— Mais, en réalité, les erreurs commises dans la mesure d'un espace si petit et d'un temps si court, jointes à celles qu'introduit l'influence des frottements et la masse de la poulie, enlèveraient à cette méthode toute exactitude. — On verra plus loin comment on détermine la valeur de  $g$ , avec précision, au moyen du pendule (57).

constantes sont entre elles comme les accélérations qu'elles impriment à un même système (10).

Plaçons, sur l'une des masses constantes  $M$  (fig. 35), cinq petites masses additionnelles, ayant chacune un poids  $p$ . La force qui déterminera le mouvement du système sera  $5p$ . Mesurons l'accélération  $\gamma$ , en prenant, par exemple, le double de l'espace parcouru au bout de la première seconde (note de la page 56). — Transportons alors l'une des masses additionnelles à l'autre extrémité du fil; le système à mettre en mouvement sera encore le même, mais la force productrice du mouvement sera  $4p - p$ , c'est-à-dire  $3p$ ; déterminons encore, par l'expérience, l'accélération  $\gamma'$ . — On constatera, sur les valeurs numériques de  $\gamma$  et  $\gamma'$  ainsi obtenues, qu'on a

$$\frac{\gamma}{\gamma'} = \frac{5}{3} \quad \text{ou} \quad \frac{\gamma}{\gamma'} = \frac{5p}{3p},$$

égalité qui vérifie le principe énoncé.

49. **Principe de l'appareil du général Morin.** — L'appareil du général Morin est destiné à la détermination directe des lois de la chute libre, sous l'action de la pesanteur.

Réduit à ses éléments essentiels, cet appareil se compose d'un cylindre vertical, couvert d'une feuille de papier, et animé d'un mouvement de rotation uniforme autour de son axe  $TT'$  (fig. 40); au niveau de sa base supérieure, se trouve un corps pesant  $D$ , muni d'un crayon horizontal dont la pointe appuie légèrement sur le papier. — Si l'on vient à abandonner ce corps

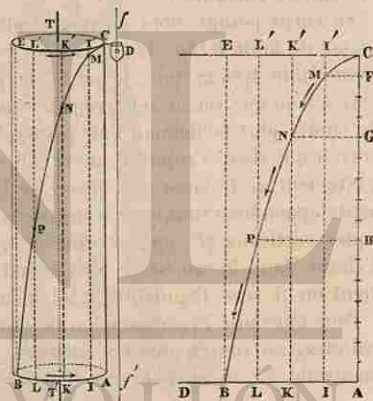


Fig. 40.

Fig. 41.

pendant que le cylindre est en mouvement, le crayon trace sur la feuille une courbe telle que  $CMNPB$ .

L'expérience étant faite, coupons la feuille de papier suivant la verticale  $CA$  qui passe par le point de départ  $C$  du crayon, et développons-la sur un plan (fig. 41); la droite  $CE$ , perpendiculaire à  $CA$ , n'est autre que le développement du cercle qui serait tracé, par le crayon supposé immobile, sur la surface du cylindre tournant. Menons maintenant des droites  $II', KK', LL', \dots$ , parallèles à  $CA$  et équidistantes entre elles : soient  $M, N, P, \dots$  les points où ces droites rencontrent la courbe. — Lorsque, pendant l'expérience, le crayon s'est trouvé en  $M$ , la généra-

trice  $l'l$  du cylindre avait pris, sous la verticale décrite par la pointe du crayon, la place de  $CA$ ; de même, quand le crayon s'est trouvé en  $N$ , c'est la génératrice  $KK$  qui avait pris la place de  $CA$ . Or, puisque le mouvement de rotation du cylindre est uniforme, ces substitutions ont eu lieu à des intervalles de temps égaux; en d'autres termes, les temps qu'il a fallu, pour que le crayon arrivât aux points  $M$ ,  $N$ ,  $P$ , peuvent être considérés comme mesurés par les distances  $CM$ ,  $CK$ ,  $CL$ ; c'est-à-dire que ces temps sont entre eux comme les nombres 1, 2, 5.... — D'autre part, les espaces décrits verticalement par le crayon, à ces mêmes instants, sont  $IM$ ,  $KN$ ,  $LP$ .... Or, en mesurant ces longueurs sur la feuille, on constate qu'elles sont entre elles comme les nombres 1, 4, 9...., c'est-à-dire comme les carrés des temps correspondants.

Donc, les espaces parcourus en chute libre sont proportionnels aux carrés des temps : cette loi suffit, comme on l'a vu (4, Rem.), pour caractériser un mouvement uniformément accéléré (\*).

#### 50. Détails de construction de l'appareil du général Morin.

— Les conditions que l'on vient de supposer remplies sont réalisées de la manière suivante :

Le corps pesant, dont on doit étudier le mouvement, est une petite masse de fonte  $D$  (fig. 42), de forme cylindro-conique : la densité de la fonte étant très grande, la perte de poids que ce corps éprouve dans l'air n'a qu'une valeur relative peu considérable, et sa forme lui permet de fendre plus facilement l'air pendant le mouvement. Il porte un petit crayon qui vient s'appuyer sur le cylindre tournant  $SS$ , et, pour que ce frottement ne le fasse pas dévier de la verticale, on y a ménagé deux petits appendices munis de trous, dans lesquels passent deux fils métalliques verticaux  $ff'$ ,  $gg'$ , servant de guides. — Le crochet  $a$ , engagé d'abord dans le crochet  $b$ , sert à maintenir le corps  $D$ , jusqu'au moment où il sera abandonné à lui-même sous l'action de la pesanteur.

Pour faire une expérience, on règle d'abord la verticalité de l'axe du cylindre, au moyen des vis calantes  $V$ ,  $V$ ,  $V$ ; puis, au moyen de la manivelle  $h$ , on enroule sur le tambour  $U$  la corde qui soutient le

(\*) Théoriquement, il semble que, pour déduire du résultat de l'expérience la valeur numérique de l'accélération  $g$ , il suffirait de connaître la vitesse de rotation que possédait le cylindre, ou le nombre de tours ou fractions de tours effectués en une seconde. — En effet, on connaîtrait alors la grandeur de l'arc parcouru en une seconde par un point de la surface du cylindre : alors, en mesurant, avec cette unité, la distance  $CL$ , par exemple (fig. 41), on connaîtrait le temps écoulé depuis le commencement de la chute du corps jusqu'à l'instant où il est arrivé en  $P$ . D'autre part, la mesure de la longueur  $LP$ , en mètres, donnerait l'espace parcouru à cet instant.

Par suite, dans la formule  $e = \frac{gt^2}{2}$ , on connaîtrait un système de valeurs numériques correspondantes de  $t$  et de  $e$ , ce qui permettrait de calculer  $g$ .

Mais cette méthode offre, dans la détermination de chacune des deux quantités  $t$  et  $e$ , des difficultés pratiques qui ne permettraient d'obtenir  $g$  qu'avec une approximation très grossière. — La méthode du pendule, qui sera exposée plus loin (57), est la seule qui présente une précision suffisante.

pois  $R$ . Lorsqu'on vient ensuite à abandonner le tambour, le système se met en mouvement en sens contraire, sous l'action du poids  $R$  : ce mouvement est transmis, par une roue dentée, à une vis sans fin  $v$ , placée sur l'axe du cylindre  $SS$ , en sorte que ce cylindre lui-même est

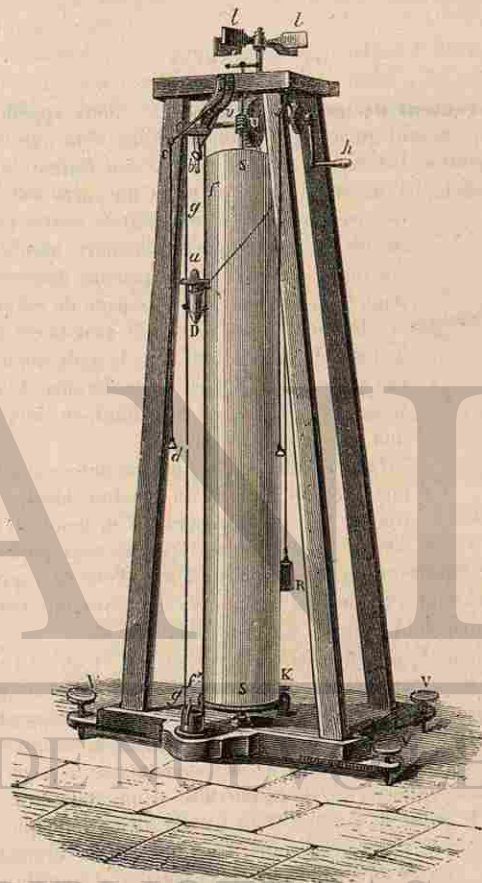


Fig. 42. — Appareil du général Morin.

mis en mouvement. Ce mouvement tendrait à s'accélérer sans cesse; mais les ailettes  $l, l$  étant entraînées en même temps et rencontrant dans l'air une résistance qui augmente rapidement avec la vitesse, il arrive bientôt un moment où la vitesse devient sensiblement constante :

ce moment est généralement atteint quand le poids moteur R a effectué environ les deux tiers de sa descente. — C'est alors que, en tirant sur le cordon *cd*, on dégage le crochet *b*; la masse D se met en mouvement, et le crayon trace sur le papier la courbe qui donne la loi de la chute.

## III. — PENDULE.

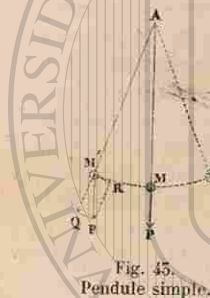
51. **Mouvement du pendule simple.** — Nous appellerons *pendule* un corps pesant quelconque, mobile autour d'un axe fixe, appelé *axe de suspension*, cet axe ne passant pas par son centre de gravité.

Dans le pendule ainsi défini, chaque point du corps est assujéti à décrire un arc de cercle dont le centre est sur l'axe de suspension; la perpendiculaire menée du point considéré sur l'axe de suspension demeure toujours dans le même plan (\*). — Le pendule est en équilibre stable, lorsque son centre de gravité est au-dessous de l'axe de suspension, dans le plan vertical passant par cet axe (41, 1°); si on le déränge de cette position, il y revient, en exécutant de part et d'autre une série d'oscillations.

Pour étudier le phénomène des oscillations, nous imaginerons d'abord un pendule idéal, le *pendule simple*, qui se composerait d'un point matériel suspendu à l'extrémité d'un fil sans poids, flexible, inextensible, l'autre extrémité du fil étant fixe. Pour se rapprocher de ces conditions toutes théoriques, on pourra employer une petite sphère pesante M, suspendue à un fil fin et flexible (fig. 45).

Si l'on amène le pendule dans la position AM' et qu'on l'abandonne à lui-même, il ne peut conserver cette position. En effet, le poids P de la sphère, qui est une force verticale, peut se décomposer en deux forces: l'une Q, dirigée suivant le prolongement du fil, et qui n'a d'autre effet que de le tendre; l'autre R, perpendiculaire à cette direction, c'est-à-dire tangente à l'arc de cercle MM', et qui sollicite la sphère à revenir vers le point M. Comme il en est de même tant que la sphère est à gauche de M, celle-ci parcourt, avec une vitesse croissante, l'arc de cercle M'M. Arrivée en M, elle dépasse la position d'équilibre, en vertu de la vitesse acquise; mais la composante tangentielle du poids, agissant maintenant en sens contraire du mouvement, diminue peu à peu la

(\*) On appelle plus généralement *pendule*, un corps pesant mobile autour d'un point fixe, appelé *point de suspension*, ce point étant différent du centre de gravité. Chaque point du pendule peut alors se déplacer sur une sphère dont le centre est le point de suspension; la droite qui joint le point considéré au point de suspension décrit un cône; c'est pourquoi ce pendule prend le nom de *pendule conique*.



vitesse, et finit par l'annuler. A ce moment, le pendule, parvenu en AM'', a accompli *une oscillation*. — La pesanteur continuant toujours à agir sur le corps, il redescend l'arc M''M, remonte de l'autre côté du point M usqu'à ce que sa vitesse redevienne nulle, puis revient encore sur lui-même, et accomplit ainsi une série d'oscillations, alternativement dans un sens et dans l'autre.

La théorie montre qu'un pendule simple, partant d'une position AM', doit parvenir, de l'autre côté de la verticale, *jusqu'à la position symétrique* AM''; il en résulte que, partant ensuite de AM'', il doit revenir en AM', et ainsi de suite; en d'autres termes, ses oscillations doivent conserver indéfiniment la *même amplitude*, et par suite la *même durée*.

En soumettant la question au calcul, et considérant seulement le cas où l'*amplitude des oscillations est très petite*, on trouve que la durée constante d'une oscillation est donnée par la formule

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

dans laquelle *t* désigne la durée de l'oscillation, exprimée en secondes;  $\pi$  est le rapport de la circonférence au diamètre, égal à 3,1416 environ; *l* est la longueur du pendule; *g* est l'accélération du mouvement vertical de la chute libre dans le vide, au lieu même où s'effectue l'oscillation. Ces deux quantités *l* et *g* doivent être exprimées au moyen d'une même unité de longueur.

52. **Pendule quelconque, oscillant dans le vide et sans frottement.** — Le raisonnement donné pour un pendule simple subsiste pour un pendule quelconque, dont le point M serait le centre de gravité et dont l'axe de suspension passerait par le point A. — L'*oscillation* est alors le passage d'une position extrême du pendule à l'autre position extrême; la *durée* de l'oscillation est le temps nécessaire pour effectuer ce trajet: l'*amplitude* de l'oscillation est l'angle que forment entre elles les deux positions extrêmes de la perpendiculaire abaissée du centre de gravité sur l'axe de suspension.

Un raisonnement simple suffit pour montrer que, quand un pendule oscille *dans le vide*, sans frottement sur son axe, les positions extrêmes du centre de gravité M' et M'' sont dans un même plan horizontal. — Considérons, en effet, les variations qu'éprouvent la force vive et l'énergie potentielle du pendule, pendant une oscillation, de M' en M''. Au point M', le pendule partant du repos, la force vive est nulle; l'énergie potentielle dépend de l'altitude du point M'. Au point M, cette altitude est minima, l'énergie potentielle est minima, et par suite, en vertu de la conservation de l'énergie (52), la force vive est maxima. A la fin de l'oscillation, la force vive est redevenue nulle, l'énergie potentielle doit donc avoir la même valeur qu'au point M', c'est-à-dire que les deux positions extrêmes du centre de gravité, M' et M'', doivent être dans le même plan horizontal. — Il en résulte immédiatement que toutes les oscillations successives doivent avoir même amplitude et même durée.

Il n'en est plus de même quand le pendule oscille *dans l'air*; en raison de

la résistance de l'air et du frottement, l'énergie totale diminue d'une oscillation à l'autre; les points  $M, M', \dots$  se rapprochent peu à peu du point  $M$ , l'amplitude des oscillations va en décroissant progressivement.

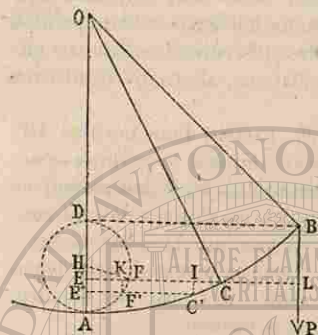


Fig. 44.

53. **Démonstration de la formule du pendule simple.** — Supposons que le pendule simple  $OA$ , de masse  $m$ , soit amené en  $OB$  et abandonné sans vitesse initiale, il oscillera du point  $B$  au point  $B'$  situé sur la ligne horizontale  $BD$ . Décrivons sur  $AD$  comme diamètre une circonférence dont  $H$  est le centre, et divisons cette circonférence en  $N$  arcs égaux et très petits; soit  $FF'$  l'un de ces arcs. Menons les horizontales  $EFC, E'F'C'$ . — En partant du point  $B$ , le pendule a une force vive nulle; au point  $C$  la vitesse est  $v$  et la force vive  $\frac{1}{2}mv^2$ ; d'autre part, le travail effectué par le poids du pendule est égal à  $P \times BL$  (22), et, d'après le principe des forces vives (25), on a :

$$\frac{1}{2}mv^2 = P \times BL = mg \times DE$$

ou

$$v = \sqrt{2g \times DE}.$$

Nous supposons l'arc  $FF'$  assez petit pour que l'on puisse confondre les arcs  $FF'$  et  $CC'$  avec leurs cordes, et pour que, pendant l'intervalle de temps  $\theta$  que met le pendule pour aller de  $C$  en  $C'$ , on puisse considérer la vitesse comme constante et égale à  $v$ ; alors

$$(1) \quad CC' = \theta \sqrt{2g \times DE}.$$

Les triangles  $CC'I$  et  $OCE$  donnent :

$$(2) \quad \frac{CC'}{CI} = \frac{OC}{CE} = \frac{l}{CE},$$

en désignant par  $l$  la longueur du pendule simple. D'autre part  $CE$  est moyenne proportionnelle entre  $AE$  et  $2l - AE$ . Nous examinerons seulement le cas d'une oscillation de très faible amplitude; alors  $AE$  est toujours négligeable vis-à-vis  $2l$ , et la valeur de  $CE$  est donnée par l'égalité :

$$(3) \quad CE = \sqrt{AE \times 2l}.$$

En combinant les égalités (1) (2) et (3), on obtient la valeur de  $\theta$  :

$$\theta = \frac{CI}{2\sqrt{AE \times DE}} \sqrt{\frac{l}{g}} = \frac{CI}{2EF} \sqrt{\frac{l}{g}},$$

en remarquant que  $AE \times DE = EF^2$ . — Enfin les deux triangles  $HFE$  et  $KFF'$  donnent la proportion :

$$\frac{FK}{EF} = \frac{FF'}{HF} \text{ ou } \frac{CI}{2EF} = \frac{FF'}{2HF} = \frac{\pi FF'}{2\pi HF} = \frac{\pi}{N},$$

puisque  $FF'$  est la  $N^{\text{me}}$  partie de la circonférence  $DFA$ . On a donc finalement :

$$\theta = \frac{\pi}{N} \sqrt{\frac{l}{g}}.$$

Le pendule met donc le même temps  $\theta$  pour parcourir tous les arcs tels que  $CC'$ ; pour parcourir la trajectoire  $BB'$  tout entière, il mettra un temps  $N$  fois plus grand; si  $t$  désigne la durée de l'oscillation, on aura donc :

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

54. **Pendule composé.** — Tout pendule qui n'est pas un pendule simple est un pendule composé. On démontre, en Mécanique, qu'à un pendule composé quelconque correspond un pendule simple qui lui est *synchrone*. Cela ne veut pas seulement dire que le pendule composé et le pendule simple correspondant ont même durée d'oscillation; cela signifie qu'il existe, dans le pendule composé, une droite parallèle à l'axe de suspension, telle que, si les deux pendules sont abandonnés au même instant sans vitesse initiale, et si leurs oscillations ont même amplitude, un point quelconque de cette droite sera toujours animé de la même vitesse que le pendule simple au même instant. Cette droite s'appelle *axe d'oscillation*; sa distance à l'axe de suspension est précisément égale à la longueur du pendule simple synchrone.

Dans le cas particulier où le pendule est formé d'une sphère pesante, suspendue par un fil très léger, et ayant une longueur très grande par rapport au rayon de la sphère, on démontre qu'on peut prendre, pour longueur du pendule simple synchrone, la distance du centre de la sphère à l'axe de suspension du fil.

55. **Isochronisme des petites oscillations.** — Quand un pendule oscille dans l'air, il éprouve, de la part de l'air, une résistance qui tend à diminuer sa vitesse; les frottements de l'axe de suspension ont un effet semblable; aussi, les amplitudes des oscillations vont-elles en diminuant peu à peu, jusqu'à devenir insensibles.

En observant les mouvements d'une lampe suspendue à la voûte de la cathédrale de Pise, Galilée a remarqué que, malgré la décroissance de l'amplitude, les oscillations de faible amplitude conservent une même durée. — Pour vérifier expérimentalement cette loi, on fera osciller un pendule, et quand les oscillations seront devenues suffisamment petites, on déterminera, à l'aide d'une montre à secondes, la durée de 100 oscillations, dont l'amplitude moyenne sera, par exemple, 4 degrés. Quel-

ques minutes après, l'amplitude des oscillations n'étant plus que 2 degrés, on déterminera de nouveau la durée de 100 oscillations; le résultat obtenu concordera avec le précédent.

La loi de Galilée peut s'énoncer ainsi : *En un même lieu, les oscillations de faible amplitude d'un même pendule sont isochrones.*

La loi de l'isochronisme n'est qu'une approximation; elle est d'autant mieux vérifiée que l'amplitude des oscillations est plus petite.

56. **Lois du pendule.** — Les lois du pendule, au nombre de quatre, peuvent se déduire toutes de la formule précédente,  $t = \pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ .

1° Dans cette formule, qui n'est exacte que pour les oscillations de faible amplitude, n'entre pas la valeur de l'amplitude elle-même; donc toutes les oscillations de faible amplitude sont isochrones. La loi de l'isochronisme, énoncée précédemment, peut donc être considérée comme une conséquence de la formule du pendule.

2° Dans la valeur de  $t$  n'intervient pas non plus la densité de la matière du pendule. Et en effet, si l'on construit divers pendules de même longueur, avec des sphères de plomb, de cuivre, d'ivoire, ... ayant même diamètre, et si on les fait osciller dans un même lieu, on trouve que la durée des oscillations est sensiblement la même; dans le vide, les oscillations auraient exactement la même durée. — De là, cette loi : *Dans le vide, la durée de l'oscillation d'un pendule est indépendante de la matière qui le constitue : elle ne dépend que de sa forme.*

Ce résultat, trouvé par Galilée, peut être considéré comme démontrant que l'accélération  $g$ , imprimée par la pesanteur à divers corps, en un même lieu, est la même.

3° D'après la formule du pendule, la valeur de  $t$  est proportionnelle à la racine carrée de  $l$ ; d'où cette loi : les durées des oscillations de deux pendules de longueurs différentes, en un même lieu, sont *proportionnelles aux racines carrées des longueurs.* — On peut vérifier ce résultat avec deux pendules formés chacun d'une sphère métallique suspendue à un fil fin; et ayant respectivement pour longueurs 1 mètre et 25 centimètres; le premier, qui bat sensiblement la seconde, ne fait qu'une oscillation pendant que le second en fait deux.

4° Enfin, d'après la même formule,  $t$  dépend de  $g$  : si  $g$  varie,  $t$  doit varier en sens inverse. Or, il résulte de nombreuses observations, faites par Borda et par d'autres physiciens, que *la durée de l'oscillation d'un même pendule augmente quand on se rapproche de l'équateur, ou quand on s'élève au-dessus du niveau de la mer.* Il en faut donc conclure que l'accélération de la chute des corps n'est pas la même aux différents points du globe : elle diminue quand on s'approche de l'équateur, ou quand on s'élève au-dessus du niveau de la mer.

57. **Détermination des valeurs de l'intensité de la pesanteur.** — On appelle intensité de la pesanteur, en un point du globe, la force

qui résulte de l'action de la pesanteur sur l'unité de masse. — Dans l'ancien système d'unités, d'après ce qu'on a vu (14), l'unité de masse a pour poids, à Paris, 9<sup>kil</sup>,81; c'est l'intensité de la pesanteur à Paris, évaluée en kilogrammes. — Dans le système C. G. S., l'intensité de la pesanteur est la force, évaluée en dynes, qui résulte de l'action de la pesanteur sur la masse d'un gramme. Or, dans la formule  $p = mg$ , si l'on fait  $m = 1$ , on a  $p = g$  dynes; c'est-à-dire que l'intensité de la pesanteur, évaluée en dynes, et l'accélération de la chute des corps au même lieu, évaluée en centimètres, sont représentées par le même nombre. A Paris, l'accélération de la chute des corps est 981 centimètres; l'intensité de la pesanteur est 981 dynes.

Quant à la détermination de l'accélération  $g$  de la chute des corps, que nous venons de supposer connue, de la formule  $t = \pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ , on tire  $g = \frac{\pi^2 l}{t^2}$ . — On fera donc osciller un pendule en un lieu déterminé; on mesurera sa longueur en centimètres et la durée de son oscillation en secondes, et on en déduira la valeur de  $g$  dans le lieu de l'expérience.

58. **Variations de l'intensité de la pesanteur aux divers points du globe.** — Les mesures effectuées, au moyen du pendule, ont montré que l'intensité de la pesanteur augmente lorsqu'on s'éloigne de l'équateur terrestre pour se rapprocher des pôles (\*).

D'après les mesures de Borda et des savants contemporains, la valeur de  $g$  est :

|                       |                       |                       |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| A l'équateur.         | A Paris.              | A la latitude de 80°. |
| 978 <sup>cm</sup> ,10 | 980 <sup>cm</sup> ,96 | 985 <sup>cm</sup> ,00 |

L'intensité de la pesanteur augmente donc, de l'équateur au pôle, d'environ  $\frac{1}{200}$  de sa valeur. — On a constaté également que, à latitude égale, l'intensité de la pesanteur diminue à mesure qu'on s'élève dans l'atmosphère; elle est plus grande au niveau de la mer que sur les continents élevés ou sur le sommet des montagnes.

59. **Application du pendule aux horloges.** — L'isochronisme des oscillations du pendule est mis à profit pour régulariser le mouvement des horloges. La disposition qui est le plus ordinairement employée, et qui est connue sous le nom d'*échappement à ancre*, a été imaginée par Huyghens en 1657 (\*\*).

(\*) Cette augmentation est déterminée principalement par l'aplatissement de la terre vers ses pôles, mais elle est aussi due, en partie, au mouvement de rotation de la terre autour de son axe, mouvement dans lequel les divers points de la surface du globe ont, sur les circonférences qu'ils décrivent, des vitesses d'autant plus petites qu'ils sont plus voisins des pôles.

(\*\*) C'est à cette époque que Huyghens présenta aux États de Hollande une horloge réglée par le mouvement d'un pendule. — Cette invention se répandit rapidement, et on donna bientôt, par extension, le nom de *pendules*, aux horloges qui furent construites sur le modèle de celle de Huyghens.

Le mouvement de l'horloge est produit, soit par la tension d'un ressort, soit par la chute d'un poids P, supporté par une corde enroulée sur un arbre. Le mouvement de rotation de cet arbre se transmet aux divers rouages de l'horloge; il est clair que ce mouvement tendrait à s'accélérer sans cesse, sous l'action continue du poids ou du ressort. — Dans la figure 45, on n'a représenté, pour simplifier, qu'une seule roue R, dite *roue à rochet*, ou *roue de rencontre*, fixée directement sur l'arbre : cette roue porte, comme le montre la figure, des dents qui sont toutes inclinées dans un même sens.

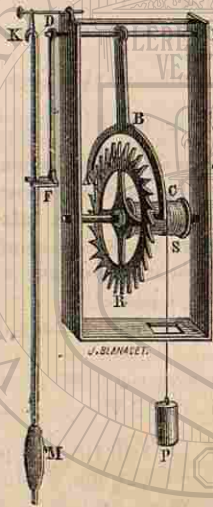


Fig. 45. — Application du pendule aux horloges.

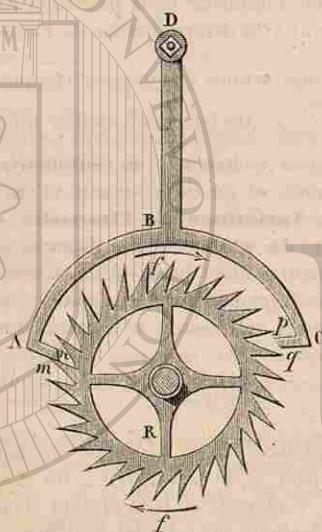


Fig. 46. — Échappement à ancre.

Une pièce ABC, en forme d'*ancre*, fixée à un axe horizontal mobile DE, est placée au-dessus de la roue : ce même axe DE porte une fourchette DF, dans laquelle passe la tige d'un pendule KM, ou *balancier*, parfaitement mobile autour de son point de suspension K. — Quand le balancier est immobile, l'une des dents de la roue R vient appuyer sur la face inférieure Am du crochet A de l'ancre (fig. 46), et l'horloge est arrêtée. Mais, une fois le balancier mis en mouvement, il entraîne l'ancre dans son oscillation : le crochet A s'éloignant de la roue vers la gauche, la dent qui appuyait sur ce crochet devient libre ; la roue peut alors tourner sous l'action du poids ou du ressort qui la sollicite, dans le sens de la flèche f, jusqu'à ce que l'autre crochet C vienne arrêter la dent qui se trouvait à une petite distance au-dessus de lui, et qui arrive

en contact avec sa face supérieure Cp. — A son oscillation suivante, l'ancre se mettant en mouvement vers la droite, le crochet C abandonne la dent qu'il avait arrêtée, et la roue peut tourner de nouveau, jusqu'à ce que le crochet A de l'ancre vienne rencontrer la dent suivante de la roue, et ainsi de suite. — Dès lors, le mouvement de la roue ne peut plus s'effectuer que par saccades, se succédant à intervalles de temps égaux, comme les oscillations du balancier, et le mouvement de l'horloge est ainsi régularisé. — Ce sont les chocs produits par les crochets de l'ancre, sur les dents de la roue de rencontre, qui produisent le battement de l'horloge.

IV. — BALANCE.

60. **Mesure des poids et des masses.** — L'intensité  $g$  de la pesanteur étant variable avec la latitude et l'altitude, le poids P d'un corps, de masse  $m$ , c'est-à-dire la résultante des actions de la pesanteur sur la masse du corps, est une quantité variable d'un point à un autre du globe; un même corps, suspendu à un dynamomètre suffisamment sensible, ne lui ferait pas éprouver, aux divers points du globe, une flexion rigoureusement constante.

Mais ce n'est qu'exceptionnellement qu'on cherche à déterminer le poids véritable d'un corps,  $P = mg$ ; le plus souvent, par exemple dans les transactions commerciales, ce qu'on a intérêt à connaître, c'est la quantité de matière contenue dans un corps, c'est-à-dire la *masse* du corps, évaluée en *grammes*. — Pour l'obtenir, on se sert de la *balance* et d'une *boîte de poids marqués*, qui contient des masses échantillonnées, égales au gramme, à ses multiples et à ses sous-multiples. — La balance permet de comparer, en un même lieu, le poids P d'un corps au poids  $p$  d'un autre corps pris comme unité. Le rapport de ces poids est indépendant de la valeur de  $g$  au lieu considéré; on a, en effet,

$$\frac{P}{p} = \frac{Mg}{mg} = \frac{M}{m}.$$

Le rapport des poids, fourni par la balance, est donc, en réalité, le *rapport des masses*. Si le corps pris comme unité est le gramme, on détermine le nombre de grammes dont le poids est équivalent au poids du corps; et ce nombre de grammes représente exactement la *masse* du corps (\*). — Dans le langage usuel, on emploie constamment

(\*) Pour avoir le poids du corps, en dynes, il faudrait multiplier le nombre qui mesure la masse par le nombre qui mesure l'intensité de la pesanteur, au point où l'on opère (37) :  $P = mg$ .

le mot *poids* pour le mot *masse*; c'est ce que nous ferons aussi le plus souvent, pour nous conformer à cet usage.

61. **Balance. — Justesse et sensibilité.** — La balance se compose essentiellement d'une barre rigide ou *fléau* AB (fig. 47), traversée, en son milieu C, par un couteau d'acier trempé, qui fait saillie des deux côtés : l'arête inférieure de ce couteau repose, de part et d'autre, sur deux petits plans d'acier trempé ou d'agate, situés l'un en avant, l'autre en arrière du fléau, et dans un même plan horizontal; le fléau peut ainsi osciller librement autour de cette arête. Aux extrémités A et B du fléau sont fixés deux couteaux qui tournent en haut leurs arêtes vives, et sur lesquels s'appuient les crochets qui portent les plateaux

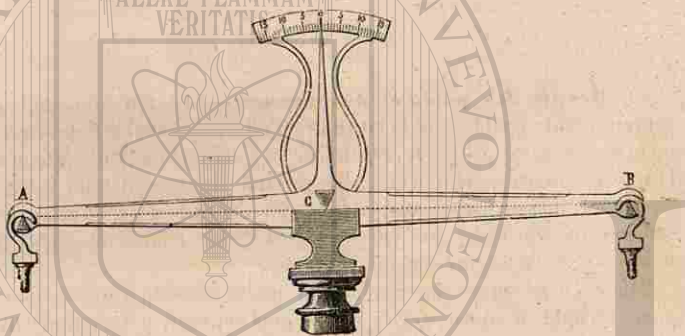


Fig. 47.

destinés à recevoir les corps, ou les poids marqués. — Les arêtes des trois couteaux, A, B, C, sont parallèles et situées dans un même plan; pour simplifier le langage, dans tout ce qui va suivre, nous les supposons réduites à trois points situés en ligne droite, et nous nommerons *ligne du fléau* la droite qui joint ces points; nous appellerons *bras du fléau* les distances AC, BC, des couteaux extrêmes au couteau médian. — Perpendiculairement à la ligne du fléau, et en son milieu, est fixée une aiguille, dont l'extrémité peut parcourir un petit arc de cercle divisé, fixé au support de la balance. On a marqué zéro au point qui correspond à la position horizontale du fléau, et on a tracé des divisions symétriques, de part et d'autre de ce point.

Pour effectuer une pesée, la méthode vulgaire consiste à placer le corps dans l'un des plateaux, et des poids marqués dans l'autre plateau, jusqu'à ce que le fléau se tienne en équilibre dans la position horizontale. On fait la somme des poids marqués, et l'on considère cette somme comme exprimant le poids du corps lui-même.

Mais, pour qu'on puisse compter sur l'exactitude du résultat, il faut à la fois : 1° que la balance soit *juste*, c'est-à-dire que le fléau se tienne

horizontal sous la charge des masses égales placées dans les deux plateaux; 2° qu'elle soit *sensible*, c'est-à-dire que l'addition d'une masse très petite, d'un côté ou de l'autre, dérange le fléau de sa position d'équilibre. — Chacune de ces qualités correspond à des conditions géométriques particulières, qu'on cherche à réaliser dans la construction de la balance.

62. **Conditions géométriques de justesse.** — Nous allons démontrer qu'une balance est juste, lorsqu'elle satisfait à la fois aux deux conditions géométriques suivantes :

1° Que le centre de gravité de la partie mobile (fléau et plateaux) soit sur une perpendiculaire à la ligne du fléau passant par le point de suspension;

2° Que les deux bras du fléau soient d'égale longueur.

En effet, soit AB (fig. 48) la ligne du fléau, et C le point de suspension : soit G le centre de gravité de la partie mobile (\*) et supposons que ce point soit sur la perpendiculaire menée à AB par le point C. Si le fléau est placé horizontalement, et que les plateaux soient vides, le centre de gravité G du système sera dans la verticale du point de suspension; il y aura donc équilibre (41), et le poids M de la partie mobile n'aura d'autre effet que d'appuyer l'axe sur ses supports. On voit même que, si le centre de gravité G est au-dessous de l'axe C, comme le suppose la figure, l'équilibre sera stable; car, si le fléau est écarté en A'B', le poids M de la partie mobile tendra à ramener le point G' en G, dans la verticale du point C et au-dessous de ce point. — Donc, si la première des conditions énoncées est remplie, lorsque les plateaux sont vides, le fléau placé horizontalement se tient en équilibre; et si le centre de gravité est au-dessous de l'axe de suspension, cet équilibre est stable.

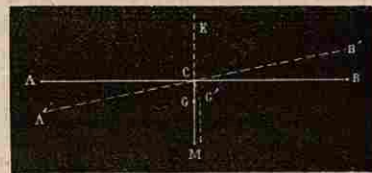


Fig. 48.

Supposons maintenant, en outre, que les deux bras du fléau soient d'égale longueur, et plaçons dans les deux plateaux des masses égales. Les poids de ces masses agiront aux extrémités A et B comme deux forces verticales P, P (fig. 49), égales et parallèles : leur résultante sera une force égale à leur somme, et passant par le milieu de AB, c'est-à-dire

(\*) D'après le mode de suspension des plateaux, quelle que soit l'inclinaison du fléau, les poids des plateaux seront toujours deux forces verticales *a, b*, appliquées respectivement aux points A et B. Pour définir le centre de gravité de la partie mobile, il faut donc considérer le centre de gravité du système solide, de forme invariable, constitué par le fléau, dont les divers points ont chacun un poids déterminé, et dont, en outre les points A et B auraient des poids supplémentaires *a* et *b*.



par le point C lui-même; elle pourra être considérée comme appliquée en C, et n'aura d'autre effet que de produire une pression de l'axe sur ses supports; donc le fléau restera horizontal. On voit

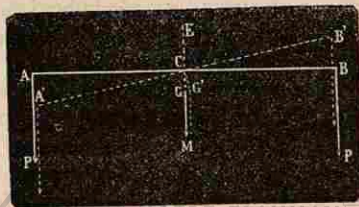


Fig. 49.

même que, si le point G est placé au-dessous de l'axe C, le fléau écarté en A'B' sera encore ramené à la position AB par le poids M de la partie mobile.

— Donc, si la seconde condition énoncée est remplie en même temps que la première, le fléau placé horizontalement

reste en équilibre sous la charge de poids égaux; cet équilibre est stable, si le centre de gravité est au-dessous de l'axe de suspension.

Il nous reste à dire quelques mots des cas où, les deux conditions de justesse étant remplies, le centre de gravité ne serait pas au-dessous de l'axe de suspension. — Si le centre de gravité était sur l'axe lui-même, les plateaux étant vides ou chargés de poids égaux, le fléau placé horizontalement serait en équilibre; mais s'il venait à être amené dans une autre position, il y demeurerait encore: il serait donc dans un état d'équilibre indifférent (41, 5°). — Enfin, si le centre de gravité était au-dessus de l'axe, la balance, vide ou chargée de poids égaux, serait encore en équilibre lorsque la ligne du fléau serait horizontale; mais on voit que cet équilibre serait instable, c'est-à-dire que l'instrument se renverserait dès qu'on viendrait à l'écarter de cette position (41, 2°). Une semblable balance est dite *folle*. — Donc, pour qu'une balance remplissant les conditions de justesse soit d'un usage commode, il faut que le centre de gravité de la partie mobile soit au-dessous de l'axe de suspension, seul cas où la position horizontale du fléau constitue une position d'équilibre stable.

**65. Réalisation pratique des conditions de justesse.** — Pour réaliser les conditions de justesse, le constructeur cherche à faire le fléau et les plateaux aussi symétriques que possible, quant aux poids et aux dimensions de leurs diverses parties (\*). — C'est pour conserver l'égalité des bras dans toutes les positions de l'instrument, qu'on fait reposer sur des arêtes vives les crochets qui supportent les plateaux :

(\*) Si le fléau est absolument symétrique, par rapport à un plan passant par l'axe de suspension, et perpendiculaire à la ligne du fléau, le centre de gravité du fléau considéré seul est situé dans ce même plan. Si, en outre, les deux plateaux ont des poids rigoureusement égaux, on voit qu'on peut suspendre indifféremment chacun d'eux d'un côté et de l'autre, sans que le centre de gravité du système cesse d'être dans le même plan, c'est-à-dire sans que la première condition de justesse cesse d'être réalisée.

les points de contact de ces crochets avec le fléau restent ainsi toujours les mêmes, quelle que soit l'inclinaison du fléau.

**64. Constatation expérimentale de la justesse.** — La balance une fois construite, on peut vérifier si elle est juste, sans qu'il soit nécessaire d'avoir des poids dont l'égalité ait été préalablement constatée. Pour cela, on fait successivement les deux opérations suivantes :

1° On abandonne la balance à elle-même, les plateaux étant vides. Si le fléau s'arrête dans la position horizontale, on en peut conclure que le centre de gravité est convenablement placé (c'est la première condition de justesse). — S'il n'en était pas ainsi, on pourrait toujours corriger ce défaut de l'instrument, en ajoutant d'un côté, une fois pour toutes, une charge suffisante pour ramener le fléau à l'horizontalité.

2° Pour vérifier ensuite l'égalité des deux bras (seconde condition de justesse), on place un corps quelconque dans l'un des plateaux, et de la grenaille de plomb ou du sable dans l'autre, en quantité telle que l'aiguille s'arrête au zéro: l'équilibre étant établi, on transporte dans le plateau de droite la charge qui était à gauche, et dans le plateau de gauche celle qui était à droite: si l'aiguille revient encore au zéro, on peut affirmer que les bras sont égaux. — En effet, si l'un d'eux AC était plus petit que l'autre, on aurait été conduit à mettre d'abord du côté A une charge plus grande que du côté B; donc, en intervertissant les charges sans les modifier, on aurait placé la plus petite charge à l'extrémité du bras le plus court, et l'équilibre aurait été détruit. — Donc, si le fléau reste horizontal, les bras sont égaux, et la balance est définitivement juste.

**65. Conditions géométriques de sensibilité.** — 1° On dit qu'une balance a une sensibilité constante, lorsque l'équilibre étant établi, l'addition d'une surcharge déterminée, dans l'un des plateaux, fait toujours incliner le fléau d'un même angle, quelle que soit la charge primitive. — Pour qu'il en soit ainsi, la condition géométrique est que les trois couteaux soient en ligne droite.

2° Si l'on veut que la sensibilité soit aussi grande que possible, c'est-à-dire que, l'équilibre étant établi, l'addition d'une surcharge déterminée dans l'un des plateaux produise une inclinaison du fléau aussi grande que possible, il faut que les bras soient aussi longs que possible, que le poids de la balance soit aussi petit que possible, et que son centre de gravité soit aussi voisin que possible de l'axe de suspension.

Considérons, en effet, une balance dont les trois couteaux A, C, B soient en ligne droite (fig. 50). Cette balance étant supposée juste, et l'équilibre étant d'abord établi au moyen de poids égaux P, P', placés dans les plateaux, ajoutons dans le plateau de gauche, par exemple, une surcharge déterminée p: le fléau prend une nouvelle position A'B'; cherchons quel doit être l'angle de A'B' avec la position primitive AB. — La résultante des forces P et P' passant toujours par le point fixe C,

il suffira d'exprimer que la force  $p$ , appliquée en  $A'$ , fait équilibre au poids  $M$  de la balance elle-même, appliqué maintenant suivant  $G'M'$ , ou, en d'autres termes, que la résultante des deux forces  $p$  et  $M'$  passe par le point  $C$ . Or, transportons les points d'application des deux forces  $p$

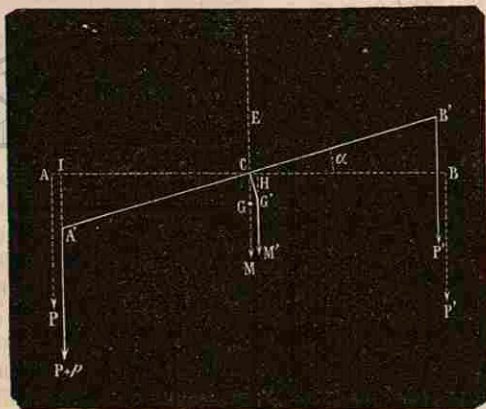


Fig. 50.

et  $M'$  aux deux points  $I$  et  $H$  où leurs directions prolongées vont rencontrer la direction  $AB$ , ces deux points étant supposés liés invariablement au fléau (15); pour que la résultante de ces deux forces parallèles passe par le point  $C$ , il faut et il suffit (15, 1°) que l'on ait :

$$\frac{CH}{CI} = \frac{p}{M'}$$

Désignons par  $l$  la longueur du bras  $A'C$ ; par  $d$  la distance  $CG$  du centre de gravité au point de suspension, et par  $\alpha$  l'angle dont le fléau s'est incliné. Les triangles rectangles  $A'IC$  et  $G'HC$  donnent  $CH = d \sin \alpha$  et  $CI = l \cos \alpha$ ; en substituant ces valeurs dans la relation précédente, on a :

$$\frac{d \sin \alpha}{l \cos \alpha} = \frac{p}{M'}$$

d'où

$$\text{tang } \alpha = \frac{p}{M'd}$$

On voit : 1° que cette expression est indépendante de la charge primitive; 2° que, pour une même valeur de la surcharge  $p$ , la tangente de l'angle  $\alpha$  est proportionnelle à la longueur  $l$  du bras du fléau, en rai-

son inverse du poids  $M$  de la balance, et en raison inverse de la distance  $d$  de son centre de gravité à l'axe de suspension.

Enfin, dans la pratique, l'inclinaison  $\alpha$  étant toujours très petite, on peut prendre l'angle lui-même pour sa tangente. Dès lors, pour une même balance, les quantités  $l$ ,  $M$  et  $d$  étant constantes, les valeurs de l'inclinaison  $\alpha$  sont proportionnelles aux valeurs de la surcharge  $p$ .

**66. Réalisation pratique des conditions de sensibilité.** — Il résulte de ce qui précède que, pour rendre une balance très sensible, le constructeur doit chercher à faire le fléau très long et très léger, et cependant assez rigide pour que, la balance étant chargée, la ligne du fléau reste toujours droite. — Ces conditions sont difficiles à concilier; cependant, on peut allier jusqu'à un certain point la légèreté à la rigidité, en taillant le fléau en forme de losange, dans une règle plate de bronze ou d'acier, et en évidant une grande partie de son intérieur, comme le montre la figure 51. — On appelle *limite de charge* d'une balance, le poids le plus grand qu'on puisse lui faire porter, sans faire fléchir sensiblement le fléau.

Enfin, on dit qu'une balance est sensible au *milligramme* ou au *centigramme*, selon qu'il suffit d'une surcharge d'un milligramme ou d'un centigramme pour faire incliner le fléau d'un angle appréciable.

Pour les besoins de la pratique, on construit des balances de dimensions très diverses, selon la nature des pesées qu'elles doivent effectuer. — Les unes sont destinées aux corps très légers; elles ont un fléau très faible, et peuvent être rendues sensibles au demi-milligramme. — D'autres sont destinées aux corps plus pesants: elles ont un fléau plus résistant et peuvent supporter, sans fléchir, des poids assez considérables. Ces dernières ne sont généralement guère sensibles qu'au centigramme; mais une erreur d'un centigramme sur un poids de plusieurs kilogrammes a peu d'importance, en sorte que la *sensibilité relative* de ces balances peut être comparable à celle des balances les plus délicates, à la condition qu'on les emploie à évaluer des poids suffisamment considérables.

**67. Méthode de la double pesée.** — Les conditions de justesse sont très rarement réalisées. La méthode de la double pesée, ou *méthode de Borda*, permet de faire une pesée exacte, même avec une balance qui n'est pas juste, pourvu que cette balance soit sensible. — Voici en quoi consiste cette méthode :

On place dans l'un des plateaux le corps à peser, et on lui fait équilibre en mettant du sable ou de la grenaille de plomb dans l'autre plateau: c'est ce qu'on appelle faire la *tare* du corps. On enlève ensuite le corps et on met des *poids marqués* à sa place, dans le même plateau, jusqu'à ce que l'aiguille revienne s'arrêter au zéro. Lors même que la balance ne serait pas juste, la somme de ces masses échantillonnées représente exactement la masse du corps, puisque le corps et les poids

marqués, placés successivement dans un même plateau, ont fait équilibre à une même tare placée dans l'autre. — Il importe seulement que la balance soit sensible, afin qu'il n'y ait pas d'indécision quant à la valeur exacte du nombre de poids nécessaire pour rétablir l'équilibre.

C'est toujours à la méthode de la double pesée que l'on a recours, même avec les meilleures balances, quand on veut effectuer une pesée dont on puisse garantir l'exactitude.

(68. **Balances de précision.** — Les balances précises offrent des détails de construction, variables d'un modèle à un autre, et destinés à assurer et à conserver la sensibilité. La figure 51 représente l'une des meilleures dispositions.

La balance est supportée par une colonne de fonte MN, établie sur une caisse reposant sur des vis calantes; la colonne porte à sa partie supérieure un support horizontal C, qui vient (en traversant une ouverture pratiquée dans le fléau) recevoir le couteau sur un plan d'agate. Le fléau a la forme d'un losange évidé; il porte, à ses deux extrémités, des couteaux d'acier trempé, sur lesquels s'appuient des étriers E, E' destinés à soutenir les plateaux (fig. 51). — Une pièce de fonte FF', qu'on nomme la *fourchette*, peut s'élever ou s'abaisser à volonté, au moyen d'un système de leviers qui est contenu dans la colonne MN, et qu'on met en mouvement par la rotation du bouton G placé hors de la cage. Lorsque, en tournant ce bouton dans un sens convenable, on fait monter la fourchette, elle saisit d'abord par ses extrémités les étriers E, E', qu'elle soulève un peu au-dessus de leurs couteaux; puis, par les deux appendices H, H', elle soulève le fléau, de façon que le couteau du milieu ne repose plus sur le plan C; aucun des trois couteaux ne peut donc s'émausser par les frottements, quand la balance n'est pas en expérience. — Quand on veut faire une pesée, on fait descendre la fourchette en tournant le bouton G en sens contraire; elle replace alors successivement le fléau sur le plan C, puis les étriers sur leurs couteaux, et la balance oscille librement (\*).

Les oscillations du fléau étant accusées par les mouvements de l'aiguille sur son cadran, elles sont d'autant plus faciles à apprécier que l'aiguille est plus longue. Or, lorsque l'aiguille est placée au-dessus du fléau, comme dans la figure 47, on ne peut en accroître la longueur sans augmenter la hauteur de l'instrument; les balances de précision portent une aiguille *ab*, placée au-dessous du fléau (fig. 51), et dont l'extrémité se meut sur un petit cadran d'ivoire, fixé à la partie inférieure de la colonne.

(\*) La figure 51 représente une disposition particulière, dans laquelle le premier étrier E en supporte un second e, mobile sur lui autour d'un axe qui passe par les pointes des deux vis V: les mouvements de ces deux étriers, qui s'effectuent respectivement autour de deux axes horizontaux, perpendiculaires entre eux, permettent aux plateaux d'obéir librement à la pesanteur, en quelque point de leur surface qu'on place les poids.

La sensibilité de l'instrument dépendant de la distance du centre de gravité à l'axe de suspension (65), on fait en sorte de pouvoir, pour les recherches précises, déplacer un peu ce centre de gravité. Pour cela,

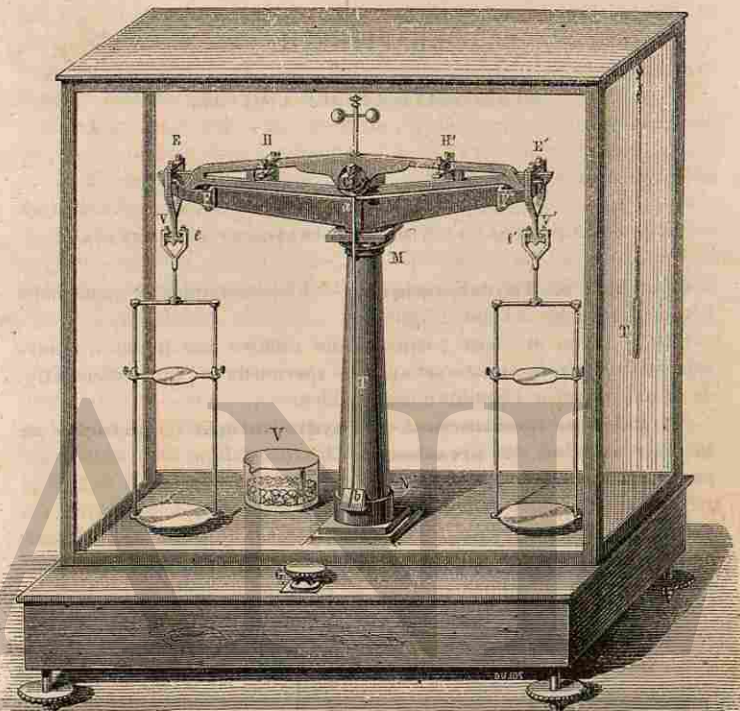


Fig. 51. — Balance de précision.

on fixe, au milieu du fléau, une tige verticale sur laquelle on peut faire mouvoir, au moyen d'un pas de vis, soit une virole métallique, comme on le voit dans un grand nombre de balances, soit une tige horizontale portant à ses extrémités de petites boules massives, comme dans la figure 51 (\*).

(\*) La balance est entourée d'une cage de verre, qui la préserve des mouvements dus aux courants d'air. Pour éviter l'oxydation des pièces d'acier, on dessèche l'air intérieur de la cage en y plaçant un vase V qui contient, soit de la chaux vive, soit du chlorure de calcium.

## CHAPITRE II

### HYDROSTATIQUE DES LIQUIDES

#### I. — ÉQUILIBRE DES LIQUIDES. — PRINCIPES FONDAMENTAUX.

69. **Objet de l'hydrostatique.** — L'hydrostatique a pour objet l'étude des fluides à l'état d'équilibre.

Elle se divise en deux parties, l'une relative aux liquides, l'autre relative aux gaz. Nous nous occuperons spécialement, dans ce chapitre, de ce qui concerne l'équilibre des liquides.

70. **Principe fondamental de l'hydrostatique ou principe de la transmission des pressions.** — L'hydrostatique tout entière repose sur le principe suivant, énoncé par Pascal :

*Si sur une portion plane de la surface d'un liquide on exerce une pression déterminée, cette pression se transmet intégralement à toute portion de paroi plane ayant une surface égale à la première.*

On trouve une confirmation de ce principe dans la presse hydraulique, dont la première idée est due à Pascal. — Réduite à sa plus simple expression, cette machine se compose de deux cylindres verticaux A et B (fig. 52), de diamètres différents, et communiquant entre eux par un tube CD. Dans chacun des cylindres est placé un piston; l'intervalle compris entre les deux pistons est entièrement plein d'eau.

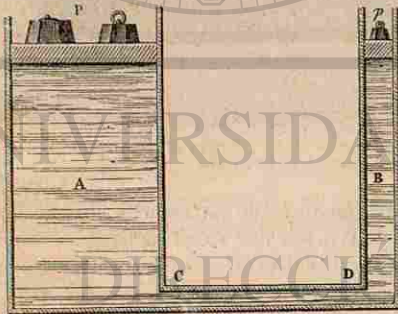


Fig. 52.

Supposons, pour fixer les idées, que la surface du plus grand piston P soit égale à 100 fois celle du plus petit p. Plaçons sur le petit piston un poids de 20 kilogrammes, par exemple; il exercera sur le liquide qui est

au-dessous de lui une pression verticale. Cette pression, d'après le principe énoncé, doit se transmettre sans altération à toute portion égale à p, prise sur la face inférieure du piston P; donc, si le principe est exact, la pression totale transmise à ce dernier piston doit être égale à 100 fois 20 kilogrammes. On reconnaît en effet, après avoir chargé le piston p du poids de 20 kilogrammes, que le piston P tend à s'élever dans le cylindre A, et que, pour le maintenir dans sa position première, il faut le charger d'un poids égal à 2000 kilogrammes.

Nous décrirons plus loin (chapitre VI) la presse hydraulique, telle qu'elle est utilisée dans l'industrie.

71. **Remarque sur l'application du principe qui précède aux liquides pesants.** — D'après ce qui précède, toutes les fois qu'on exerce une pression sur une portion de la surface d'un liquide, on peut dire que, si le liquide était soustrait à l'action de la pesanteur, des portions planes et égales de la paroi supporteraient partout des pressions égales.

En réalité, nous verrons bientôt que l'action de la pesanteur sur les divers points du liquide produit un accroissement dans la pression sur les parois, accroissement d'autant plus grand que les portions de parois considérées sont situées plus bas. Dans la presse hydraulique, les pressions dues à la pesanteur étant généralement très petites par rapport à celles qui résultent des actions exercées sur les pistons, tout se passe à peu près comme si le liquide n'était pas pesant. Mais, dans les cas où ces deux espèces de pressions sont du même ordre de grandeur, on doit considérer la pression totale, sur une portion de paroi déterminée, comme la somme de la pression due aux actions extérieures et de la pression due au poids du liquide. — Nous savons calculer la première; nous verrons bientôt comme on évalue la seconde.

72. **La pression exercée sur un élément de paroi par un liquide en équilibre est toujours normale à cet élément.** — Quelle que soit l'origine de la pression exercée sur un élément de paroi par un liquide en équilibre, cette pression est toujours normale à l'élément considéré. — En effet, si la pression était oblique, elle pourrait se décomposer en deux forces, l'une normale, et l'autre située dans le plan même de l'élément; cette dernière aurait pour effet de faire glisser sur la paroi les molécules liquides sur lesquelles s'exerce la pression, c'est-à-dire de rompre l'équilibre.

73. **Égalité de pression dans tous les sens autour d'un point pris dans l'intérieur d'un liquide en équilibre.** — Les pressions que l'on exerce sur la surface d'un liquide se transmettent, non seulement à la paroi du vase, mais encore à tout élément de surface pris dans l'intérieur du liquide.

Pour nous en rendre compte, imaginons un vase CD (fig. 55) entièrement rempli par un liquide en équilibre, et supposons que, sur une

portion  $mn$  de la surface, on exerce une pression à l'aide d'un piston A. Soit B un point quelconque, pris dans l'intérieur du liquide, et soit III un plan quelconque, mené par ce point. L'équilibre ne sera pas troublé si nous supposons que les molécules liquides comprises dans ce plan viennent à être liées entre elles, de manière à constituer une paroi solide. Mais alors la partie AIBHD devient un vase fermé : soit  $pq$  une portion très petite du plan III, comprenant le point B; sur  $pq$  s'exerce une pression dont le rapport à la pression exercée sur  $mn$  est

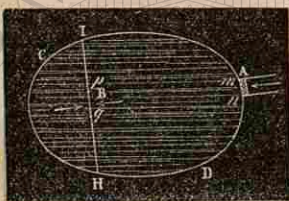


Fig. 53.

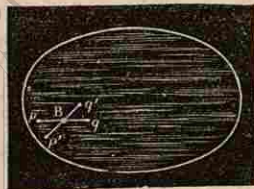


Fig. 54.

égal au rapport des surfaces  $pq$  et  $mn$  (70), et cette pression est normale au plan  $pq$  (72). — Si maintenant on rend la mobilité à toutes les molécules, sauf à celles de la portion  $pq$ , il faut, pour que  $pq$  reste en équilibre, qu'il supporte sur son autre face une pression égale et contraire. — Or nous avons donné au plan III une direction arbitraire; la pression reçue par la portion  $pq$  de ce plan ne dépend donc pas de sa direction, et, si l'on imagine que cette petite surface plane preme autour du point B toutes les positions possibles,  $pq$ ,  $p'q'$ , etc. (fig. 54), la pression normale qu'elle supporte sur ses deux faces reste invariable. — C'est là ce qu'on exprime en disant que, dans un liquide en équilibre, la pression est la même dans tous les sens autour d'un même point.

**74. Condition d'équilibre d'un liquide pesant. — Égalité de pression en tous les points d'un plan horizontal.** — Les principes qui précèdent suffisent pour résoudre toutes les questions relatives à l'équilibre des liquides. — Nous allons montrer, par exemple, que si l'on tient compte de l'action exercée par la pesanteur sur les divers points d'une masse liquide, on est conduit à une condition générale d'équilibre qui est la suivante :

*Dans un liquide pesant en équilibre, la pression est la même en tous les points d'un même plan horizontal.*

Soient deux points  $m$  et  $m'$ , pris dans un même plan horizontal, au sein d'une masse liquide pesante en équilibre ABCD (fig. 55). Imaginons un cylindre circulaire droit, ayant pour bases deux petits cercles  $ef$ ,  $e'f'$  décrits autour de  $m$  et de  $m'$  avec des rayons très petits. Si nous supposons que toutes les molécules comprises dans ce cylindre soient

liées entre elles de manière à constituer un corps solide, ce solide demeurera évidemment en équilibre, au milieu du liquide environnant, sous l'action de son poids et des pressions que le liquide exerce sur toute sa surface. — Or le poids  $P$  du cylindre est perpendiculaire à  $mm'$ ; les pressions exercées sur les divers éléments de sa surface convexe sont également perpendiculaires à  $mm'$ : aucune de ces forces ne sollicite le cylindre dans le sens de son axe. D'autre part, les pressions  $p$  et  $p'$ , exercées sur les bases, sont dirigées

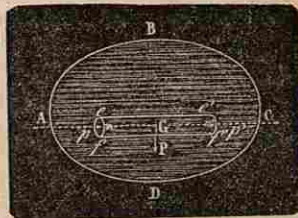


Fig. 55.

suivant l'axe du cylindre. Donc, si le cylindre est en équilibre, c'est que, d'une part, la résultante des pressions exercées sur sa surface convexe est une force égale et opposée au poids  $P$ ; et que, d'autre part, les forces  $p$  et  $p'$  sont égales entre elles.

Rendons maintenant la fluidité au cylindre, à l'exception des molécules situées dans les éléments plans  $ef$ ,  $e'f'$ . Chacun de ces éléments plans éprouvera, sur ses deux faces, des pressions égales entre elles et égales à  $p$ ; et il en sera encore de même si l'on considère des éléments égaux en surface, mais orientés d'une manière quelconque autour de  $m$  et de  $m'$ . — C'est ce qu'on exprime d'une manière abrégée, en disant que, dans un liquide pesant en équilibre, la pression est la même en tous les points d'un même plan horizontal.

**75. Différence des pressions supportées par des éléments égaux, non situés dans un même plan horizontal.** — Consi-

dérons maintenant, dans une masse liquide, un cylindre  $efe'f'$  (fig. 56), ayant ses bases situées dans des plans horizontaux différents AC, A'C', et ses arêtes verticales. Solidifions encore, par la pensée, la partie du liquide qui est comprise dans ce cylindre. Les seules forces qui tendent à déplacer le cylindre dans le sens de son axe sont : le poids  $P$ , appliqué au centre de gravité  $G$ , et les deux pressions  $p$  et  $p'$ , normales aux bases. Puisque l'équilibre existe, la pression  $p'$ , dirigée de bas en haut, doit être égale à la résultante des deux forces  $p$  et  $P$  dirigées de haut en bas, c'est-à-dire à la somme  $p + P$ .

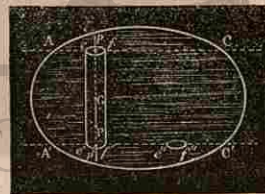


Fig. 56.

Donc la pression qui s'exerce sur l'élément  $e'f'$  est égale à la pression que supporte l'élément égal  $ef$ , plus le poids d'une colonne cylindrique de liquide ayant pour base l'un des éléments et pour hauteur la distance des plans horizontaux AC et A'C'.

La même proposition s'appliquerait à deux éléments égaux  $ef$ ,  $e''f''$ , non compris entre les mêmes verticales, puisque  $e'f'$  et  $e''f''$  éprouvent des pressions égales.

**76. Surface libre d'un liquide pesant. — Vases communicants.** — Supposons qu'un liquide pesant ne remplisse pas entièrement le vase qui le contient, et qu'il présente une *surface libre*, dont les divers éléments ne supportent aucune pression.

Soit  $BB'$  la surface libre (fig. 57) : prenons, dans un plan horizontal  $AC$  mené au-dessous de cette surface, deux éléments égaux  $m$ ,  $n$ , et construisons les cylindres verticaux  $mm'$ ,  $nn'$ , qui ont ces éléments pour bases et se terminent à la surface libre. La pression sur la surface libre étant nulle, la pression en  $m$  est égale au poids du liquide contenu dans le cylindre  $mm'$  (75); en  $n$ , au poids du liquide contenu dans le cylindre  $nn'$ . Or ces deux pressions doivent être égales entre elles (74); donc tous les points tels que  $m'$  et  $n'$  doivent être à la même distance du plan horizontal  $AC$ , c'est-à-dire que la surface libre doit être elle-même *plane et horizontale*.

Le raisonnement subsiste encore lorsque le liquide est contenu dans deux vases  $V$  et  $V'$  qui communiquent par leur partie inférieure (fig. 58). Les éléments égaux  $m$  et  $n$ , situés dans le même plan horizontal  $AC$ , doivent supporter des pressions égales, et on doit avoir

$$mm' = nn'.$$

Donc : lorsque deux vases communicants contiennent un même liquide, il faut, pour qu'il y ait équilibre, que les deux surfaces libres du liquide soient dans le même plan horizontal. — C'est ce qu'on peut

vérifier au moyen de l'appareil représenté par la figure 59. Quand on ouvre le robinet  $R$ , l'eau s'élève, dans celui des vases  $A$ ,  $B$ ,  $C$  qui est ajusté en  $N$ , au même niveau que dans le vase  $V$ .

**77. Liquides superposés. — Vases communicants.** — Nous avons montré (74) que, pour qu'un liquide pesant demeure en équilibre, il faut que la pression soit la même en tous les points d'un même plan horizontal. Le raisonnement qui a été fait s'applique, sans modification, au cas où le vase  $ABCD$  (fig. 60) contient deux liquides non miscibles et

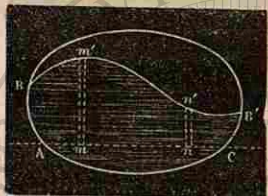


Fig. 57.

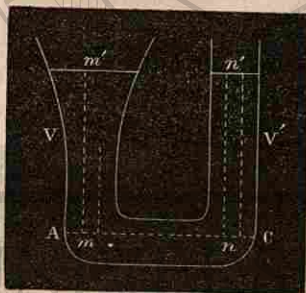


Fig. 58.

de densités différentes : de l'eau et de l'huile, par exemple. On voit immédiatement :

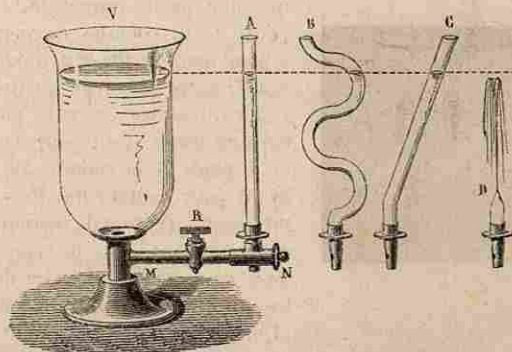


Fig. 59. — Vases communicants.

1° Que la surface libre doit être plane et horizontale;

2° Que la surface de séparation doit être un plan horizontal; en effet,

si cette surface pouvait affecter une forme telle que  $EF$ , il serait impossible que tous les éléments égaux  $m$ ,  $m'$ ... pris sur un même plan horizontal  $IH$  et dans le liquide inférieur, fussent toujours également pressés. — Ces conditions étant remplies, pour que l'équilibre subsiste, il faut encore que celui des deux liquides qui a la plus grande densité soit placé à la partie inférieure.



Fig. 60.

Lorsque l'un des vases communicants contient deux liquides superposés, il faut, pour qu'il y ait équilibre, que les hauteurs des liquides dans les deux vases, au-dessus de la surface de séparation, soient en raison inverse de leurs poids spécifiques.

En effet, prenons encore les deux vases communicants  $V$  et  $V'$ ; ver-  
sons-y d'abord une certaine quantité de mercure, puis achevons de remplir le vase  $V$  avec de l'eau (fig. 61) : la pression de l'eau déprime le mercure à gauche et le fait monter à droite. L'équilibre étant établi, menons par un point quelconque  $I$  de l'élément  $mn$  une verticale  $IL$ , qui rencontre le plan de la surface de séparation et les plans des deux surfaces libres, respectivement aux points  $H$ ,  $K$ ,  $L$ . La pression normale  $p$ , que reçoit  $mn$  du côté du vase  $V$ , est équivalente à la somme des poids d'une colonne cylindrique de mercure ayant pour base  $mn$  et pour hauteur  $IH$ , et d'une colonne d'eau ayant pour base  $mn$  et pour hauteur  $HL$ ; la pression  $p'$ , exercée sur le même élément du côté du vase  $V'$ , est équivalente au poids d'une colonne de mercure ayant pour

base  $mn$ , et pour hauteur  $IK$  ou  $IH + HK$ . Pour que l'équilibre existe, il faut que ces deux pressions  $p'$  et  $p$  soient égales entre elles; or, elles

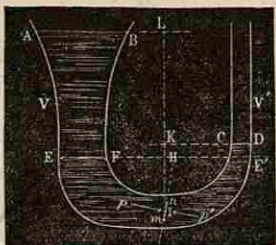


Fig. 61.

ont une partie commune, savoir : le poids de la colonne de mercure qui a pour hauteur  $III$ ; il doit donc y avoir égalité entre les deux parties restantes, c'est-à-dire entre le poids de la colonne d'eau ayant pour hauteur  $HL$ , et le poids de la colonne de mercure ayant pour hauteur  $HK$ . Mais des volumes égaux d'eau et de mercure ont des poids qui sont dans le rapport de 1 à 15,6, ce qu'on exprime en disant que les poids spécifiques de l'eau et du mercure sont dans le rapport de 1 à 15,6; pour que les poids de ces deux colonnes de même base soient égaux, il faut donc que les hauteurs  $HK$  et  $HL$  soient dans le rapport de 15,6 à 1, c'est-à-dire en raison inverse des poids spécifiques.

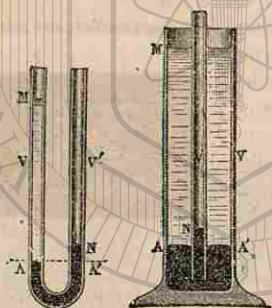


Fig. 62.



Fig. 63.

du mercure au-dessus de la surface de séparation des deux liquides.

78. **Puits ordinaires, puits artésiens, jets d'eau.** — C'est dans le principe des vases communicants qu'on trouve l'explication des particularités que présentent les puits ordinaires ou les puits artésiens.

Parmi les couches qui composent le sol, les unes, formées de sables ou de fragments pierreux, laissent pénétrer les eaux qui arrivent à leur surface; les autres, au contraire, formées de marnes ou d'argiles compactes, sont à peu près imperméables à l'eau, qui coule à leur surface sans y pénétrer d'une manière sensible. — Or, concevons qu'une masse d'eau un peu considérable  $A$  (fig. 64), comme celle d'un lac ou d'un étang, pénètre dans le sol au travers de couches sablonneuses ou pierreuses, et parvienne ainsi jusque dans l'intervalle de deux couches argileuses imperméables : elle y forme alors une nappe souterraine,

comme celle qui est représentée en  $MN$ . Si l'on vient à pratiquer des puits en des points du sol tels que  $C$  ou  $D$ , situés à des niveaux plus élevés que  $A$ , et qu'on fasse pénétrer ces puits jusqu'à la nappe  $MN$ , l'eau s'y élève jusqu'à ce qu'elle atteigne, dans chacun d'eux, au niveau de la surface horizontale  $A$ . Ce sont là les *puits ordinaires* : on garnit les parois de maçonnerie, afin d'empêcher l'eau de se perdre dans les terrains perméables au travers desquels le puits pénètre.

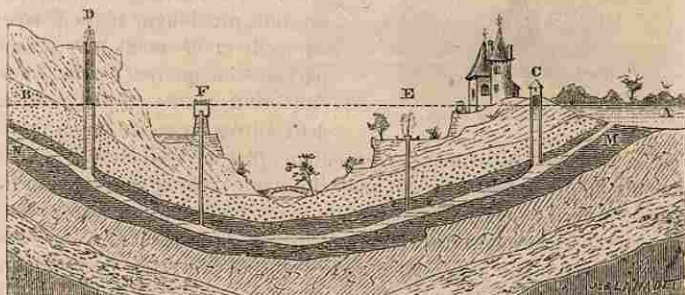


Fig. 64. — Puits ordinaires et puits artésiens.

Si les points du sol où l'on pratique les puits sont situés plus bas que le niveau  $A$ , en  $E$  ou en  $F$  par exemple, l'eau jaillit au-dessus du sol, à une hauteur plus ou moins grande, selon la différence de niveau. — Le plus ordinairement, on adapte alors, à l'ouverture du puits, un tube surmonté d'un réservoir  $F$ , dans lequel l'eau s'élève, et duquel on peut faire partir des conduits pour la distribuer aux environs. — Ces puits portent le nom de *puits artésiens*, parce que c'est dans l'Artois qu'ont été creusés les premiers qui aient été pratiqués en France.

Pour obtenir des *jets d'eau* artificiels, on dispose un réservoir dans un lieu élevé, et on le fait communiquer avec des conduits souterrains qui vont s'ouvrir à la surface de bassins situés plus bas. — Théoriquement, l'eau devrait jaillir jusqu'au niveau de la surface libre dans le réservoir. Cependant l'expérience montre (fig. 59) que le jet n'atteint jamais tout à fait cette hauteur; la différence doit être attribuée au frottement de l'eau contre les parois, et aussi à ce que les gouttes du liquide qui retombent, rencontrant celles qui s'élèvent, diminuent la vitesse d'ascension. Pour que le jet s'élève le plus possible, on l'incline légèrement sur la verticale.

79. **Niveau d'eau.** — L'instrument connu, dans l'arpentage, sous le nom de *niveau d'eau*, est fondé sur les mêmes principes. Il se compose d'un tube de métal (fig. 65), qui est porté par un trépied, et dont les deux extrémités coudées se continuent avec les parois de deux fioles de verre sans fond,  $M$  et  $N$ . On y verse de l'eau, et l'on fait en sorte que

les surfaces du liquide soient visibles dans les deux fioles; le plan MN, qui passe par ces deux surfaces, est horizontal (76).

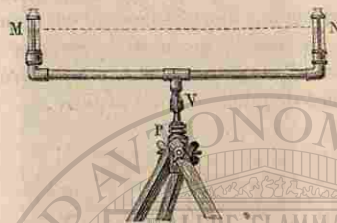


Fig. 65. — Niveau d'eau.

Quand l'arpenteur veut connaître la différence de niveau de deux points B et B' d'un terrain, il place l'instrument en un point intermédiaire A (fig. 66), et fait dresser verticalement en B, par un aide, une longue règle divisée; sur celle-ci se meut une plaque partagée en quatre carrés, dont deux sont peints en blanc, et les deux autres en rouge ou en noir : c'est la mire de l'instrument. L'arpenteur, plaçant l'œil en M à la surface du liquide, fait avec la main le signe d'élever ou abaisser la plaque, jusqu'à ce qu'il aperçoive, sur le prolongement du rayon visuel qui rase la surface de l'eau en N, le centre P de la plaque, c'est-à-dire le sommet commun aux quatre carrés, que la différence des couleurs

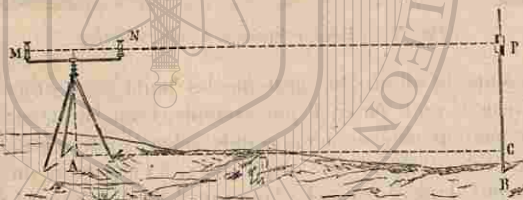


Fig. 66.

rend facile à distinguer de loin. La position de la plaque une fois fixée, on note la hauteur BP mesurée sur la règle. — L'arpenteur fait alors transporter la mire au point B' (supposé à gauche, en dehors de la figure); il détermine de même la position du point P' qui se trouve dans le même plan horizontal que P, et la hauteur B'P' de ce point au-dessus du sol. — La différence des hauteurs BP et B'P' donne la différence de niveau des points B et B'.

80. **Niveau à bulle d'air.** — On désigne sous le nom de *niveau à bulle d'air* un petit instrument (fig. 67) qui sert à vérifier l'horizontalité des lignes ou des surfaces sur lesquelles on le place.

Il consiste en un tube de verre légèrement convexe, dans lequel on a introduit de l'eau ou de l'alcool, en y laissant seulement un espace occupé par une grosse bulle d'air. Ce tube est contenu dans une gaine de cuivre MN, qui est évidée de manière à laisser voir le tube dans la plus grande partie de sa longueur; le tout est fixé sur une plaque métallique. — La bulle d'air se place toujours au point le plus haut,

et on a réglé l'instrument de manière que, si la plaque est bien horizontale, les deux extrémités de la bulle viennent correspondre à deux bandes transversales de cuivre, A, B, appliquées sur le tube et servant de repères.

Supposons que l'on veuille faire usage de cet instrument pour vérifier l'horizontalité d'une surface plane, la surface d'une table, par exemple.

— On placera le niveau sur cette table, parallèlement à l'un des bords. Si cette direction est horizontale, la bulle d'air viendra se placer exactement entre les deux repères. Au contraire, pour peu que cette direction soit inclinée, la bulle se portera du côté le plus élevé, et l'on devra alors relever progressivement la table du côté opposé, au moyen de cales par exemple, jusqu'à ce que la bulle arrive entre les repères et s'y maintienne immobile. — Ce résultat étant atteint, on répétera la même opération pour une direction perpendiculaire à la précédente (\*). — Lorsque le réglage aura été effectué pour ces deux directions, on sera certain que la surface de la table est horizontale.

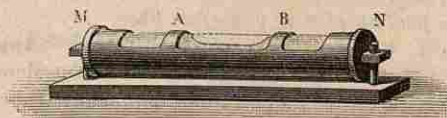


Fig. 67. — Niveau à bulle d'air.

## II. — PRESSIONS SUR LES PAROIS DES VASES.

81. **Pression exercée par un liquide pesant, sur le fond horizontal d'un vase.** — Prenons, sur le fond horizontal d'un vase ABCD

(fig. 68), un élément de surface  $mn$ , et décrivons un cylindre vertical ayant cet élément pour base; supposons que toutes les arêtes rencontrent la surface libre du liquide, elles y découperont un élément  $m'n'$  égal à  $mn$ . Or la pression que le liquide exerce sur  $mn$ , en vertu de son poids, surpasse la pression en  $m'n'$  (75) d'une quantité égale au poids d'une colonne cylindrique de liquide, ayant pour base  $mn$  et pour hauteur la

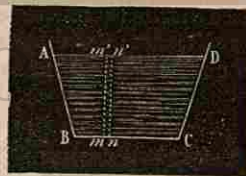


Fig. 68.

(\*) On devra avoir soin, dans cette seconde opération, de ne pas changer ce qui aura été fait dans la première; c'est-à-dire que, s'il est nécessaire d'employer de nouvelles cales, elles ne devront être placées que sous les pieds auxquels on n'aura pas touché précédemment. S'il en était autrement, on devrait recommencer la première opération après la seconde.



distance  $mn'$  de la surface libre AD au fond BC du vase (\*). — Décomposons maintenant la paroi horizontale BC tout entière en éléments tels que  $mn$ ; les pressions que supportent ces éléments se composeront en une seule, égale à leur somme. Donc :

*La pression exercée par un liquide pesant, sur le fond horizontal du vase qui le contient, est égale au poids d'une colonne cylindrique de ce liquide, ayant pour base la surface du fond et pour hauteur la distance du fond au plan de la surface libre.*

82. **Vérification expérimentale. — Appareil de Masson.** — D'après l'énoncé qui précède, si l'on considère trois vases comme ceux de la figure 70, l'un A cylindrique, le deuxième B élargi, le troisième C rétréci à la partie supérieure, si ces trois vases ont des fonds égaux et qu'ils contiennent un même liquide, s'élevant à une même hauteur au-dessus du plan du fond, les pressions doivent être égales sur les trois fonds. — Ce résultat peut être vérifié à l'aide d'une disposition qui a été indiquée par A. Masson, et qui est une modification d'un appareil imaginé par Pascal.

Trois vases A, B, C, sans fond (fig. 70), de formes différentes, mais présentant à leur partie inférieure des ouvertures égales, peuvent se visser sur un trépied métallique. L'un d'eux A étant installé sur ce trépied, on applique sur son ouverture inférieure un obturateur MN, c'est-à-dire un disque de verre plan, qu'on suspend par un fil T à l'un des bras d'une balance : on place ensuite des corps pesants dans le plateau qui est suspendu à l'autre bras, de manière à appliquer, avec une certaine force, l'obturateur sur l'ouverture. On verse alors de l'eau dans le vase, jusqu'à ce que l'obturateur laisse échapper quelques gouttes de liquide; à ce moment, la pression exercée par l'eau de haut en bas, sur ce fond mobile, est égale en grandeur à la force avec laquelle il est maintenu contre l'ouverture; on marque alors le niveau de l'eau au moyen du petit index E, mobile le long d'une tige verticale. — On remplace ensuite successivement le vase A par les vases B et C, sans toucher à l'index; l'expérience montre que l'obturateur se détache toujours au moment où le liquide atteint le même niveau.

\*) Il en est encore de même si la forme du vase et la situation de l'élément  $mn$  sont telles que les arêtes du cylindre construit sur cet élément ne rencontrent pas la surface libre (fig. 69). — Pour le démontrer, prenons sur la face libre un élément  $m'n'$  égal à  $mn$ , et projetons  $mn$  et  $m'n'$  sur un plan horizontal IH, situé de façon que les deux projections  $pq$  et  $p'q'$  soient dans l'intérieur du liquide. En  $mn$ , la pression est égale à la pression en  $pq$ , augmentée du poids du cylindre  $mnpq$ ; en  $pq$ , la pression est la même qu'en  $p'q'$ , c'est-à-dire qu'elle est égale au poids du cylindre  $p'q'm'n'$ . Donc la pression en  $mn$  est égale au poids d'une colonne cylindrique de liquide qui

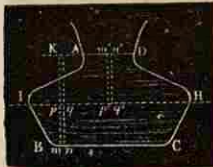


Fig. 69.

aurait pour base  $mn$  et pour hauteur la distance  $mK$  au plan de la surface libre.

La pression est donc la même sur le fond des trois vases; quant à sa valeur absolue, on peut la déterminer, au moins grossièrement, en plaçant sur l'obturateur, au lieu d'eau, des poids marqués : on trouve que la somme des poids nécessaires pour le détacher est précisément

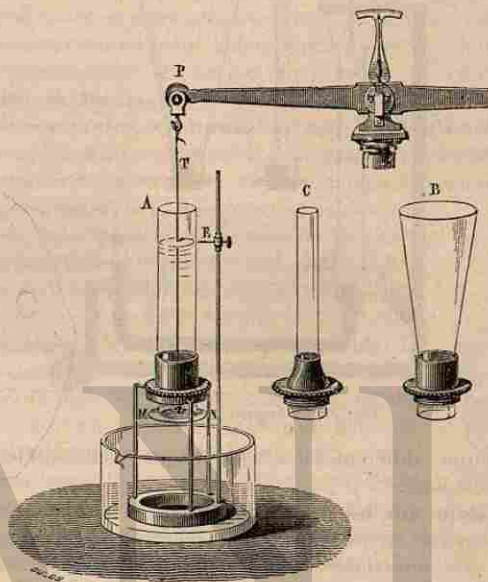


Fig. 70. — Appareil de A. Masson.

égale au poids total de l'eau qu'on avait dû verser dans le vase cylindrique A. — Il en résulte que, pour le vase élargi B, la pression exercée sur le fond est inférieure au poids de l'eau que contient ce vase; dans un vase rétréci tel que C, la pression sur le fond est supérieure au poids total de l'eau.

83. **Appareil de Haldat.** — L'appareil imaginé par de Haldat (fig. 71) conduit à la même vérification. — Le tube de verre deux fois recourbé MNPQ s'engage en M dans une monture de fonte, sur laquelle peuvent se visser à volonté les trois vases A, B, C. On introduit du mercure dans le tube recourbé; puis, le vase A étant mis en place, on y verse de l'eau jusqu'à ce que le niveau atteigne l'extrémité de la pointe verticale  $t$ ; on marque le point H auquel s'est élevé le mercure dans la branche PQ, au moyen d'une bague qui glisse le long du tube. On retire ensuite l'eau du vase A, en ouvrant le robinet R; on enlève ce vase, et on recommence l'expérience avec chacun des vases B et C : on constate toujours que, à l'instant où le niveau de l'eau atteint l'extrémité de la

tige *l*, le niveau du mercure dans la branche PQ vient affleurer au bord de la bague demeurée en H. — Donc la pression supportée par la surface du mercure dans la cuvette est la même dans les trois expériences,

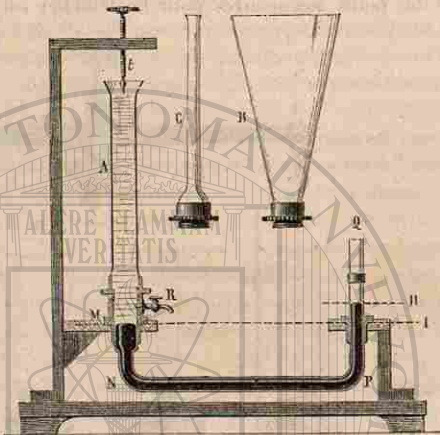


Fig. 71. — Appareil de Haldat.

malgré les formes différentes des vases auxquels cette surface sert successivement de fond.

**84. Pressions sur les parois latérales.** — L'existence des pressions sur les parois latérales peut se démontrer par l'expérience, en pratiquant des ouvertures dans les parois d'un vase : le liquide s'échappe, par chaque ouverture, en formant un jet qui est d'abord normal à la portion de paroi supprimée, et qui s'infléchit ensuite sous l'influence de la pesanteur. Les molécules liquides qui touchaient la paroi exerçaient donc contre elle une pression normale.

Pour évaluer cette pression, prenons, sur une paroi latérale d'un vase ABCD (fig. 72), un élément de surface *mn*, assez petit pour qu'on puisse toujours le considérer comme plan, et pour qu'on puisse regarder tous ses points comme étant à égale distance de la surface libre. Cet élément éprouve, de la part du liquide, une pression normale à sa surface, et égale à celle qu'il supporterait, si, venant à tourner

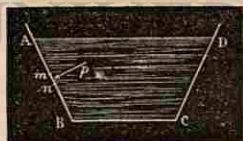


Fig. 72.

autour de l'un de ses points, il se plaçait dans une position horizontale (73) ; cette pression est donc égale au poids d'une colonne cylindrique droite de liquide, ayant pour base *mn* et pour hauteur la distance de cet élément au plan de la surface libre.

Si, au lieu d'un élément infiniment petit, on considère une portion

plane et finie de paroi latérale, chacun de ses éléments supporte une pression normale : toutes ces pressions ont donc une résultante, normale à la paroi, et égale à leur somme. — On démontre, en Mécanique, que cette résultante est égale au poids d'une colonne cylindrique droite de liquide, ayant pour base la portion de paroi considérée, et pour hauteur la distance de son centre de gravité au plan de la surface libre. Elle est appliquée en un point qu'on appelle le *centre de pression* : ce point est évidemment situé plus bas que le centre de gravité de la portion de paroi elle-même.

**85. Pression de bas en haut, sur une portion horizontale de la paroi.** — D'après ce qui précède, une paroi horizontale, en contact par sa face inférieure seule avec un liquide dont la surface libre est à un niveau plus élevé, doit éprouver une pression de bas en haut égale au poids d'une colonne de liquide ayant pour base cette surface et pour hauteur la hauteur même du liquide extérieur au-dessus d'elle. Pour le vérifier, on prend un large tube de verre, fermé à la partie inférieure par un disque plan *ab* (fig. 73) que l'on maintient d'abord au moyen d'un fil fixé en son centre. Si l'on enfonce ce tube verticalement dans l'eau, le disque éprouve de bas en haut une pression qui l'applique contre l'ouverture, car on peut abandonner le fil sans que le disque se détache.

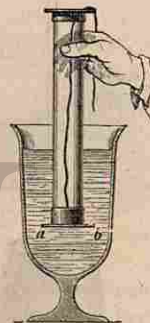


Fig. 73.

— Pour déterminer expérimentalement la valeur de cette pression, on versera de l'eau dans le tube, et l'on constatera que le disque se détache au moment où le niveau intérieur arrive dans le plan du niveau extérieur. Or, à ce moment, l'intérieur du tube constitue un vase sur le fond duquel s'exerce une pression que nous savons évaluer (84). La pression qui s'exerce de bas en haut sur *ab* lui est équivalente : elle est donc égale au poids d'une colonne de liquide ayant pour base *ab* et pour hauteur la distance de *ab* au niveau de la surface libre.

**86. Pression sur l'ensemble de la paroi du vase. — Paradoxe hydrostatique.** — Supposons que l'on porte successivement, sur l'un des plateaux d'une balance, trois vases semblables aux vases A, B, C (fig. 71), et contenant de l'eau jusqu'à une même hauteur ; négligeons, pour plus de simplicité, les poids des vases eux-mêmes, dont il serait d'ailleurs facile de tenir compte. La pression qu'exerce le liquide, sur le fond qui repose sur le plateau de la balance, est la même pour chacun de ces trois vases, et cependant il est évident qu'il faudrait, pour leur faire équilibre, placer dans l'autre plateau de la balance des poids différents. — Cette apparente contradiction, connue sous le nom de *paradoxe hydrostatique*, disparaît quand on a égard à l'ensemble des pressions que le liquide exerce sur les parois.

Il est facile de voir, en effet, que les pressions  $p$ , exercées sur les différents éléments d'une paroi telle que  $AB$  (fig. 74), qui fait un angle obtus avec le fond, peuvent se décomposer chacune en deux forces, l'une horizontale  $f'$  et l'autre verticale  $f$ ; les composantes verticales s'ajoutent à la pression exercée sur le fond, et se transmettent, par la paroi solide, au plateau de la balance. Le plateau supporte donc une pression plus grande que celle qui s'exerce directement sur le fond de ce vase.

— Sur une paroi faisant un angle aigu avec



Fig. 76.  
Expérience du crève-tonneau.



Fig. 74.

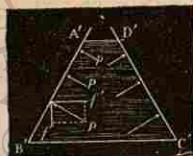


Fig. 75.

le fond, chaque pression élémentaire  $p$  (fig. 75) se décompose en une force horizontale  $f'$  et en une force verticale  $f$  dirigée en sens contraire de la pesanteur; donc la pression supportée par le plateau de la balance est la différence entre la pression supportée par le fond du vase et la résultante des forces  $f$ .

On complète cette explication, en Mécanique, en démontrant que, quelle que soit la forme du vase, toutes les pressions élémentaires supportées par l'ensemble des parois ont une résultante unique, égale au poids du liquide contenu dans le vase.

Une expérience due à Pascal montre, d'une manière frappante, l'influence qu'exerce la hauteur d'un liquide, sur la grandeur des pressions que supportent les parois de l'enveloppe qui le contient. — Un tonneau (fig. 76), dressé sur son fond, est rempli d'eau : on y assujettit un tube vertical, étroit, de plusieurs mètres de hauteur. Pour remplir ce tube, il suffit d'une petite quantité d'eau, et cependant, en raison de l'accroissement de hauteur du liquide, l'accroissement de pression sur chacune des douves du tonneau est tel, qu'on les voit éclater, et laisser échapper le liquide par tous leurs interstices.

(87) **Tourniquet hydraulique.** — Considérons un vase  $ABCD$  (fig. 77), dont nous supposons, pour plus de simplicité, les deux parois  $AB$  et

$CD$  planes, verticales et parallèles. Prenons, sur l'une de ces parois, une portion  $mn$  pour base d'un cylindre droit; ce cylindre découpe sur la paroi  $CD$  une portion  $m'n'$  égale à  $mn$ . Les pressions que le liquide exerce sur  $mn$  et sur  $m'n'$  sont



Fig. 77.

deux forces  $p$  et  $p'$  égales et contraires, qui se font équilibre; mais si l'on vient à enlever la portion de paroi  $m'n'$ , la pression  $p'$  a pour effet de faire jaillir le liquide, tandis que la force  $p$  tend à imprimer au vase un mouvement de recul, en sens contraire de l'écoulement. — C'est ce que l'on peut constater, en plaçant le vase sur un petit chariot.

Le tourniquet hydraulique (fig. 78) est fondé sur le même principe. Un réservoir de verre  $MN$ , rempli d'eau, est disposé de manière à pouvoir tourner autour d'un axe vertical; il communique, à sa partie inférieure, avec un tube deux fois recourbé  $ab$ , qui a la forme d'un  $Z$  très allongé. — A l'instant où l'eau s'échappe par les extrémités de ce tube, l'appareil prend un mouvement de rotation, en sens contraire de l'écoulement. Ce mouvement est produit par les pressions que le liquide exerce sur les portions du tube opposées aux ouvertures.

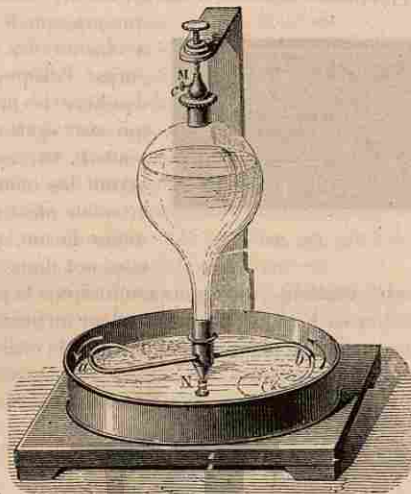


Fig. 78. — Tourniquet hydraulique.

### III. — PRINCIPE D'ARCHIMÈDE.

(88) **Principe d'Archimède.** — Tout corps plongé dans un liquide éprouve une poussée, de bas en haut, égale en grandeur au poids du liquide déplacé.

Ce principe peut se démontrer par le raisonnement suivant. — Considérons un liquide en équilibre, et supposons qu'une portion  $MN$  de ce liquide (fig. 79) vienne à se solidifier, sans changer ni de poids ni de

volume; le corps solide ainsi formé demeurera en équilibre au milieu du liquide. Or, les forces qui le sollicitent sont, d'une part, son poids  $P$ , appliqué en son centre de gravité  $G$ ; d'autre part, les pressions telles

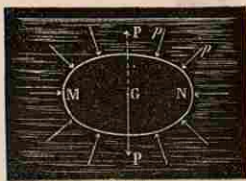


Fig. 79.

que  $p, p$ , que le liquide exerce normalement à chacun des éléments de la surface du corps. Puisque toutes ces forces se font équilibre, les pressions  $p$  ont une résultante, qui est égale et directement opposée au poids  $P$ . Or, toutes les pressions  $p$  conserveront les mêmes valeurs, si l'on remplace ce solide idéal par un corps solide réel, de même forme, mais de nature quelconque : elles ont donc toujours une résultante, et cette résultante, que nous nommerons la *poussée*, est une force dirigée de bas en haut, égale en grandeur au poids de la masse liquide dont le corps tient la place, et passant par le centre de gravité de cette masse liquide elle-même.

89. **Vérification expérimentale.** — Pour vérifier le principe

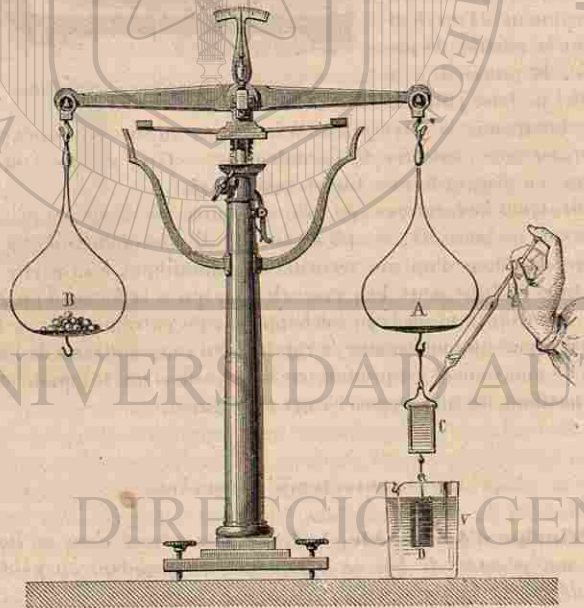


Fig. 80. — Vérification du principe d'Archimède.

d'Archimède, on fait l'expérience suivante. — On prend deux cylindres,

l'un plein  $D$  (fig. 80), l'autre creux  $C$ , travaillés de manière que le volume du cylindre plein soit exactement égal à la capacité du cylindre creux (ce dont on peut s'assurer en constatant que le premier entre exactement dans le second). On suspend, sous l'un des plateaux  $A$  d'une balance hydrostatique (\*), le cylindre creux, et, au-dessous de lui, le cylindre plein; puis, on fait équilibre à ce système au moyen d'une tare, placée dans l'autre plateau  $B$ . — Cela fait, on introduit au-dessous du cylindre  $D$  un vase contenant de l'eau, et l'on fait en sorte que le cylindre  $y$  plonge complètement. La poussée exercée par l'eau sur le cylindre  $D$  fait incliner la balance de l'autre côté. Mais on constate que, pour ramener le fléau à la position horizontale, il suffit de remplir d'eau le cylindre creux  $C$ ; on fait donc équilibre à la poussée, en ajoutant, du même côté, un poids d'eau égal à celui de l'eau déplacée.

90. **Poids apparent d'un corps complètement plongé dans un liquide.** — D'après le principe d'Archimède, un corps solide  $MN$ , plongé dans un liquide (fig. 81), est soumis : 1° à l'action de la poussée  $P$ , qui est une force verticale dirigée de bas en haut, égale en grandeur au poids de la partie du liquide dont ce corps tient la place et appliquée au centre de gravité  $G$  de cette partie elle-même; 2° à l'action de son poids  $P'$ , qui peut être considéré comme appliqué au centre de gravité  $G'$  du corps solide.

Supposons que le corps soit *homogène*, c'est-à-dire que, à des volumes égaux, pris en différents points de sa masse, correspondent toujours des poids égaux; alors, si le corps est complètement plongé, son centre de gravité  $G'$  coïncide avec le centre de gravité  $G$  du liquide déplacé; par suite, les deux forces  $P'$  et  $P$ , appliquées en un même point et directement opposées, ont une résultante égale à leur différence  $P' - P$ , et dirigée de haut en bas si cette différence est positive. Cette résultante est ce qu'on appelle le *poids apparent* du corps dans le liquide. — Si le corps n'est pas homogène, il s'oriente, sous l'action des forces  $P'$  et  $P$ , de manière que  $G'$  et  $G$  se placent sur une même verticale; dans cette position, les forces  $P'$  et  $P$  ont encore une résultante, et, si  $P'$  est plus grand que  $P$ , le *poids apparent* du corps est encore une force  $P' - P$ , dirigée de haut en bas. — On dit quelquefois que le corps *perd une partie de son poids*, égale au poids du liquide déplacé; c'est là une locution peu correcte, mais dont le sens n'offre pas d'ambiguïté.



Fig. 81.

(\*) On appelle *balance hydrostatique* une balance comme celle que représente la figure 80, dont on peut faire monter ou descendre le fléau, au moyen d'une crémaillère contenue dans la colonne qui supporte l'instrument. Cette disposition est particulièrement commode pour introduire, dans l'eau ou dans un liquide quelconque, les corps que l'on a suspendus à l'un des plateaux.

Si le poids  $P'$  du corps est égal au poids  $P$  du liquide déplacé, le poids apparent du corps est nul, c'est-à-dire qu'il se tient en équilibre de lui-même au milieu du liquide.

Enfin, si la poussée  $P$  est plus grande que le poids  $P'$  du corps, le poids apparent  $P' - P$  est négatif, c'est-à-dire que le corps est sollicité par une force résultante qui tend à le faire mouvoir de bas en haut dans le liquide. C'est ce qu'on observe pour le liège, le bois, plongés dans l'eau; pour le fer plongé dans le mercure, etc. — Lorsqu'il en est ainsi, et que le liquide présente une surface libre, le mouvement ascendant du corps l'amène, comme nous allons le voir, à une position d'équilibre.

**91. Équilibre des corps flottants.** — Lorsqu'un corps, sollicité par une poussée plus grande que son poids, arrive à la surface libre du liquide dans lequel il est plongé, une portion de plus en plus grande de ce corps émerge successivement du liquide; par suite, la poussée acquiert des valeurs successivement décroissantes: il arrive donc un moment où la poussée devient égale au poids du corps, et peut lui faire équilibre. — L'expérience montre, en effet, que l'équilibre s'établit toujours; on dit alors que le corps *flotte* à la surface du liquide.

Si l'on désigne alors par  $p$  la valeur actuelle de la poussée, due à la partie plongée, on peut dire, une fois l'équilibre établi: 1° que la poussée  $p$  et le poids  $P'$  du corps sont appliqués en des points  $G$  et  $G'$  qui sont dans la direction même de ces forces, c'est-à-dire sur une même verticale; 2° que ces deux forces sont égales entre elles. — C'est surtout cette seconde remarque qu'il importe de retenir; elle peut s'énoncer comme il suit:

*Toutes les fois qu'un corps flotte à la surface d'un liquide, son poids est égal à celui du liquide que déplace la portion plongée.*

**92. Ludion.** — On réalise, au moyen du ludion (fig. 82), les conditions diverses dans lesquelles un corps solide descend, monte, ou se tient en équilibre dans un liquide. —

Dans une éprouvette pleine d'eau, on a introduit une boule de verre creuse  $B$ , percée vers sa partie inférieure d'une petite ouverture capillaire (placée à gauche sur la figure); cette boule supporte une figurine d'émail, dont le poids a été réglé de façon que, la boule étant vide, le système ait un poids total moindre que celui de l'eau déplacée, et

monte à la surface du liquide. Une membrane, fixée sur le bord de l'éprouvette, permet d'exercer, avec le doigt, une pression sur la sur-



Fig. 82. — Ludion.

face de l'eau; cette pression, se transmettant dans le liquide, fait pénétrer dans la boule une certaine quantité d'eau, qui comprime l'air intérieur, en sorte que le poids du système se trouve augmenté du poids de cette eau: dès que le poids total est devenu supérieur à la poussée, le ludion descend. — Si l'on vient à supprimer la pression, la force élastique de l'air chasse de la boule l'eau qui y était entrée, et le ludion remonte. — Enfin, on peut régler la pression de manière que la boule se tienne en équilibre au milieu du liquide, le poids total du système étant alors égal à la poussée.

IV. — CAPILLARITÉ.

**93. Phénomènes capillaires.** — On désigne sous le nom de *phénomènes capillaires*, des phénomènes qui paraissent en opposition avec les lois de l'équilibre des liquides, et qu'on observe particulièrement dans les tubes dont le diamètre est, jusqu'à un certain point, comparable à celui d'un cheveu.

Lorsqu'on plonge un tube de verre  $AB$  (fig. 83), d'un diamètre suffisamment petit, dans l'eau ou dans un liquide quelconque capable de mouiller le verre, on voit le liquide s'élever dans ce tube plus haut qu'à l'extérieur. La surface courbe  $mpn$ , dans le tube capillaire, forme alors ce qu'on appelle un *ménisque concave*.

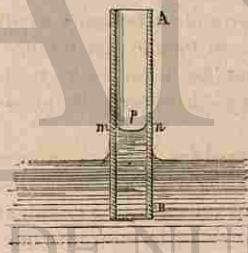


Fig. 83.

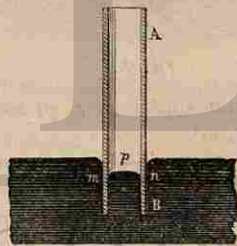


Fig. 84.

Si l'on fait la même expérience avec du mercure, ou en général avec un liquide qui ne mouille pas le verre, ce liquide est déprimé à l'intérieur du tube, au-dessous du niveau extérieur (fig. 84); sa surface est alors un *ménisque convexe*.

On remarque, en outre, dans le premier cas, que le liquide se relève au contact des parois extérieures du tube; dans le second, qu'il se déprime dans le voisinage de ces parois.

Newton a indiqué les considérations qui permettent de faire disparaître le désaccord apparent entre les phénomènes capillaires et les lois

de l'hydrostatique. Laplace en a donné une théorie mathématique, dont les conséquences ont été vérifiées par divers expérimentateurs. — Nous nous bornerons à indiquer les lois expérimentales de l'ascension ou de la dépression des liquides dans les tubes capillaires.

**94. Ascensions capillaires.** — Pour un même liquide, les hauteurs des colonnes soulevées, dans divers tubes capillaires, sont en raison inverse des diamètres de ces tubes.

Gay-Lussac a vérifié cette loi [par l'expérience suivante. Un large vase V (fig. 85) contient le liquide sur lequel on opère; il repose sur un plateau muni de vis calantes, qui permettent de rendre le bord du vase horizontal. Dans la plaque métallique AB sont assujettis des tubes capillaires,  $t$ ,  $t'$ ,  $t''$ , de différents diamètres. Les diamètres de ces tubes ont été préalablement mesurés, en pesant le mercure qui occupe dans le tube une longueur déterminée. — Pour mesurer les ascensions, on a assujetti dans la plaque AB une vis à deux points CC', dont la pointe inférieure C' est amenée à l'affleurement de la partie plane de la surface liquide dans le vase: la hauteur verticale de la vis tout entière a été déterminée avant l'introduction du liquide. On mesure successivement les distances verticales de la pointe supérieure C au point le plus bas de chacun des ménisques  $m$ ,  $m'$ ,  $m''$ .

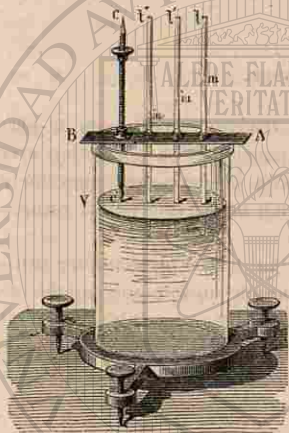


Fig. 85.

la pointe supérieure C au point le plus bas de chacun des ménisques  $m$ ,  $m'$ ,  $m''$ .

**95. Influence de la nature des liquides.** — Les expériences montrent que, dans un même tube, l'ascension capillaire dépend essentiellement de la nature du liquide. — Dans un tube de 1 millimètre de diamètre, par exemple, on trouve que l'eau s'élève à  $50^{\text{mm}},7$ ; l'alcool, à  $12^{\text{mm}},1$ ; l'éther, à  $10^{\text{mm}},8$ ; le sulfure de carbone, à  $10^{\text{mm}},2$ .

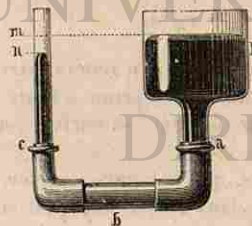


Fig. 86.

tube de verre capillaire soumis à l'expérience. On introduit du mer-

**96. Dépressions capillaires.** — Les dépressions capillaires sont soumises à des lois semblables. — Les expériences de vérification ont été faites principalement sur le mercure. On mastique aux deux extrémités d'un tube de fer deux fois recourbé  $abc$  (fig. 86), d'une part une large cuvette de verre D, et, d'autre part, le

cure dans ces deux vases communicants, et on détermine alors facilement, au cathétomètre, la distance verticale des deux niveaux  $m$  et  $n$ .

**97. Effets divers dus à la capillarité.** — L'eau, l'alcool, l'éther, etc., s'élèvent, entre deux lames parallèles (fig. 87), à une hauteur d'autant plus grande que ces lames sont plus rapprochées. L'ascension est la moitié de ce qu'elle serait dans un tube d'un diamètre égal à l'écartement des lames.

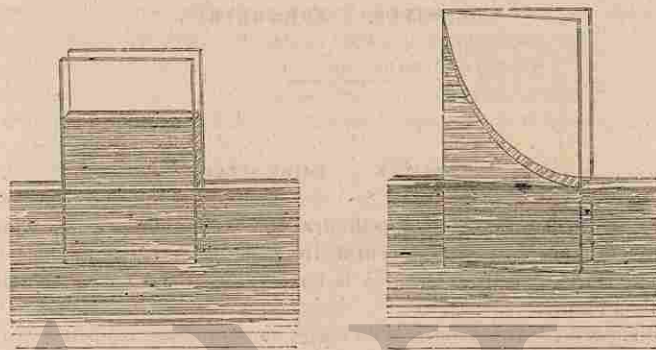


Fig. 87.

Fig. 88.

Entre des lames de verre se touchant par un de leurs bords verticaux (fig. 88), le liquide s'élève, dans l'espace angulaire qu'elles comprennent, d'autant plus haut que l'on considère des points plus voisins de l'arête de contact.

La capillarité explique l'ascension des liquides dans les canaux des corps poreux. — Elle joue un rôle important, comme l'a montré Jamin, dans les mouvements de la sève chez les végétaux.

### CHAPITRE III

#### DENSITÉS. ARÉOMÈTRES

##### I — DENSITÉS. — POIDS SPÉCIFIQUES.

98. **Définitions.** — On appelle *densité absolue*, ou *masse spécifique* d'un corps, la masse d'un centimètre cube de ce corps, évaluée en grammes. La densité de l'eau à la température 4° est, par définition, égale à l'unité.

On appelle *densité relative* d'un corps, ou *densité par rapport à l'eau*, le rapport de la masse du corps à la masse du même volume d'eau. — La densité absolue dans le système C. G. S. et la densité relative sont représentées par le même nombre. — Par exemple, la densité absolue du fer est 7<sup>gr</sup>, 8; sa densité relative est le nombre abstrait 7,8.

On appelle *poids spécifique relatif* d'un corps, ou *poids spécifique par rapport à l'eau*, le rapport du poids de ce corps au poids du même volume d'eau. Soient M et m les masses du corps et du même volume d'eau, P et p les poids du corps et du même volume d'eau; on a :

$P = Mg$ ;  $p = mg$ ; d'où  $\frac{P}{p} = \frac{M}{m}$ ; le premier de ces rapports est, par définition, le poids spécifique du corps par rapport à l'eau; le second est la densité relative.

On voit donc que les tables qui donneront ces nombres, pour diverses substances, pourront être intitulées indifféremment : tables de *densités absolues*, tables de *densités relatives*, ou tables de *poids spécifiques relatifs* (\*).

Quant à la détermination expérimentale de l'un de ces nombres, elle comprendra deux opérations : 1° détermination de la masse M d'un échantillon de cette substance (vulgairement, détermination de son

(\*) On appelle *poids spécifique absolu* d'un corps, le poids de l'unité de volume de ce corps. Dans le système C. G. S., il est évalué en dynes; si D est la densité absolue du corps, son poids spécifique absolu sera Dg dynes; c'est donc un nombre variable avec l'altitude et la latitude; une table de poids spécifiques absolus s'appliquerait exclusivement au point du globe où elle aurait été construite.

poids); 2° détermination de la masse m du même volume d'eau (vulgairement, détermination du poids du même volume d'eau). — On fera ensuite le quotient de M par m;

$$D = \frac{M}{m}$$

Quant à l'usage que l'on pourra faire de ce nombre D, le plus fréquent consiste à déterminer la masse d'un corps (ou ce qu'on appelle vulgairement son poids) sans avoir recours à une pesée directe, en connaissant simplement son volume V en centimètres cubes. — Puisque le nombre D représente, en grammes, la masse (ou le poids) d'un centimètre cube de la substance, la masse du corps, dont le volume est V centimètres cubes, sera :

$$M^{\text{gr}} = VD.$$

99. **Remarques relatives aux tables de poids spécifiques ou densités.** — Pour fixer avec précision la signification du nombre qui représentera le poids spécifique relatif ou la densité de chaque corps, il est nécessaire de définir les conditions dans lesquelles ce nombre est supposé déterminé, et en particulier la température à laquelle est supposé le corps dont il s'agit. — En effet, le volume d'un corps dépend de sa température : par suite, le poids ou la masse d'un centimètre cube de ce corps dépend de la température à laquelle est supposé le corps lui-même. — Dans les tables numériques, comme celles de la page 86, qui donnent les poids spécifiques ou les densités des corps solides ou liquides, les corps sont supposés à la température de 0°. On verra, dans l'étude de la Chaleur, comment on en peut déduire, pour chaque corps, la densité à une température quelconque.

##### II. — DÉTERMINATION EXPÉRIMENTALE DES DENSITÉS DES CORPS SOLIDES ET LIQUIDES.

100. **Méthode du flacon.** — *Corps solides.* — Les flacons destinés à déterminer les densités des corps solides sont de formes diverses. Lorsqu'on veut opérer sur des corps un peu volumineux, on se sert de flacons à large goulot (fig. 89), dont le bord a été usé à l'émeri, de façon qu'un disque de verre plan puisse s'y appliquer exactement. Quand le flacon aura été rempli d'eau, on fera glisser cet obturateur de verre sur le goulot, de manière à chasser le liquide qui pourrait dépasser le bord du flacon.

Pour déterminer la densité d'un corps solide insoluble dans l'eau,

d'un fragment de marbre par exemple, on le met dans l'un des plateaux A de la balance, et l'on place à côté le flacon rempli d'eau et fermé par son obturateur; on fait équilibre avec une tare placée dans l'autre plateau. On enlève alors le corps et on le remplace par des poids



Fig. 89.

marqués, ce qui donne son poids P, par double pesée (67). — On retire ensuite les poids marqués et l'on introduit le fragment de marbre dans le flacon; il sort une certaine quantité d'eau; on essuie l'obturateur de verre, on essuie le flacon, et on le remet dans le plateau A. L'équilibre ne peut subsister, puisque le corps a chassé un volume d'eau égal au sien : les poids marqués qu'on doit ajouter en A représentent le poids de cette eau, c'est-à-dire  $p$ , avec l'exactitude de la double pesée. — Le quotient de P par  $p$  est la densité du marbre.

Pour opérer sur des corps en petits fragments, on en poudre, on emploie de petits flacons à goulot étroit (fig. 90), dont le bouchon  $ab$  est formé d'un tube effilé, usé à l'émeri en  $b$  de façon qu'il s'enfonce d'une quantité toujours égale dans le goulot; lorsqu'on a rempli d'eau le flacon et qu'on introduit le bouchon, il sort une certaine quantité de liquide par l'ouverture  $a$ , et, comme la surface libre de l'eau a un diamètre



Fig. 90.



Fig. 91.

très petit, il n'importe pas qu'elle soit plane ou courbe. — On opère comme avec le flacon précédent : il faut remarquer seulement que les corps en poudre peuvent, lorsqu'on les introduit dans l'eau, entraîner les bulles d'air qui se dégagent difficilement : pour chasser ces bulles d'air, on place le flacon sous le récipient de la machine pneumatique, et on le laisse quelque temps dans le vide.

101. *Corps liquides.* — On se sert ordinairement, pour les liquides, de petits flacons dont l'usage a été introduit par Regnault. La figure 91 représente un de ces flacons : il se compose d'un réservoir cylindrique R, surmonté d'un petit tube capillaire portant un trait de repère  $a$ , et d'une autre partie cylindrique C qui sert d'entonnoir. Un bouchon de verre B empêche l'évaporation des liquides volatils pendant les pesées. Lorsqu'on a rem-

pli le flacon d'un liquide (\*), on enlève, avec un petit rouleau de papier buvard, tout ce qui dépasse le trait  $a$  marqué sur le tube.

Pour obtenir la densité, on place le flacon plein de liquide dans l'un des plateaux de la balance, et l'on établit l'équilibre en faisant une tare dans l'autre plateau. Puis, on vide le flacon, on le sèche avec soin et on le replace dans le même plateau; les poids marqués qu'il faut ajouter, du même côté, pour rétablir l'équilibre, expriment le poids P du liquide que contenait le flacon. — La même opération, faite avec de l'eau, donne le poids  $p$  d'un égal volume d'eau. — Il suffit de diviser P par  $p$  pour avoir la densité.

102. *Méthode de la balance hydrostatique.* — *Corps solides.* — La méthode de la balance hydrostatique est fondée sur ce principe, qu'un corps plongé dans un liquide éprouve une poussée, de bas en haut, égale en grandeur au poids du liquide déplacé (88).

Pour déterminer la densité d'un corps solide, insoluble dans l'eau, d'un fragment de bronze, par exemple, on l'accroche, par un fil métallique fin, à l'un des plateaux A de la balance (fig. 92), et on lui fait équilibre avec une tare placée dans l'autre plateau; on enlève le corps, et on rétablit l'équilibre en plaçant des poids marqués dans le plateau A : on connaît ainsi le poids P du corps, par la méthode même de la double pesée (67). — Après avoir enlevé les poids marqués, on accroche de nouveau le corps sous le plateau, et on le descend dans l'eau; l'équilibre étant détruit, on le rétablit en plaçant des poids marqués dans le plateau A. — Ces poids expriment le poids  $p$  de l'eau déplacée, indépendamment de la justesse de la balance. — On divise P par  $p$ , et le quotient est le poids spécifique cherché.

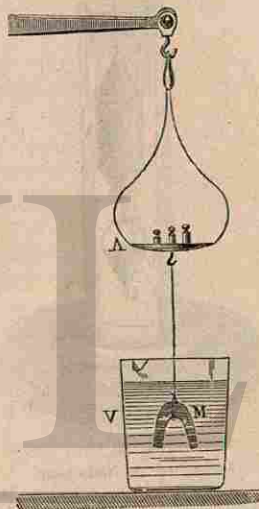


Fig. 92.

105. *Corps liquides.* — Pour déterminer la densité d'un corps liquide, d'un alcool, par exemple, on suspend par un fil fin, à l'un des plateaux A de la balance, un corps solide quelconque, par exemple une boule de verre convenablement lestée, et on en fait la tare. On plonge alors cette boule dans l'alcool, et, pour rétablir l'équilibre, on place dans le plateau A des poids marqués, qui indiquent le poids P de l'alcool déplacé. — En plongeant ensuite la boule dans l'eau pure, on connaît, par

(\*) Le tube  $a$  étant capillaire, il faut, pour introduire le liquide, employer une méthode particulière, semblable à celle qui sera indiquée plus loin pour la construction du thermomètre.



les poids qu'il faut placer dans le plateau A pour rétablir l'équilibre, le poids  $p$  du même volume d'eau. — En divisant  $P$  par  $p$ , on obtient la densité de l'alcool.

104. **Méthode des aréomètres à volume constant.** — *Corps solides.* — On nomme *aréomètres à volume constant*, des appareils flotteurs qui sont assez légers pour ne s'enfoncer qu'incomplètement dans les divers liquides où on les place, mais qu'on peut charger de façon à faire toujours plonger la même portion de leur volume.

L'aréomètre le plus employé pour déterminer la densité des corps solides est l'aréomètre de Nicholson (fig. 95). Le corps de l'instrument est en métal, et creux; il se compose d'une portion cylindrique A, terminée en haut et en bas par deux cônes : le cône supérieur porte une tige métallique et un plateau B; le cône inférieur porte un crochet, auquel on suspend une corbeille C contenant, sous un double fond, de la grenaille de plomb qui sert de lest à l'appareil et le maintient vertical dans l'eau. Sur la tige, est marqué un trait  $a$ , qu'on nomme *point d'affleurement*.

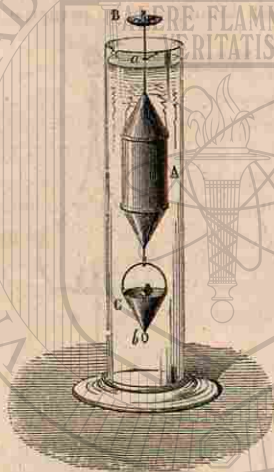


Fig. 95.  
Aréomètre de Nicholson.

Pour déterminer la densité d'un corps solide, insoluble dans l'eau, d'un fragment de soufre, par exemple, on met l'instrument dans l'eau, on place le corps sur le plateau B, et on ajoute de la grenaille de plomb de telle sorte que l'instrument s'enfonce jusqu'au point d'affleurement; puis, on enlève le corps et on le remplace par des poids marqués, de manière à produire de nouveau l'affleurement; on connaît ainsi le poids  $P$  du corps, comme on l'obtiendrait avec une balance, mais avec une sensibilité moindre, à cause de l'adhérence de l'eau pour les parois de l'instrument. — On retire alors ces poids, et on place le morceau de soufre sur la corbeille C; le corps, étant plongé dans l'eau, éprouve une poussée, en sorte que, pour rétablir l'affleurement, il faut placer des poids marqués sur le plateau B; ils expriment le poids d'un volume d'eau égal à celui du soufre. — Le quotient de  $P$  par  $p$  est la densité cherchée.

Lorsqu'on opère sur des corps dont la densité est moindre que celle de l'eau, la poussée tendrait à les faire remonter à la surface : on retourne alors la corbeille, et on l'accroche par l'anneau  $b$ ; la poussée presse le corps dans la concavité de la corbeille, et la méthode s'applique sans autre modification.

Cette méthode de l'aréomètre, qui n'exige pas, comme les deux autres, l'usage de la balance, est surtout employée par les minéralogistes. L'instrument est commode, en ce qu'il est portatif; on l'enferme dans un étui de fer-blanc, qui peut tenir lieu, en voyage, de l'éprouvette dans laquelle on fait flotter l'aréomètre.

105. *Corps liquides.* — On a construit, pour déterminer la densité des liquides, un instrument analogue, l'aréomètre de Fahrenheit, dont on fait d'ailleurs assez rarement usage. Il est en verre (fig. 94) et lesté par du mercure placé dans une petite boule, à sa partie inférieure.

L'instrument a été pesé une fois pour toutes; soit, par exemple, 50 grammes son poids. — On le plonge dans le liquide dont on veut déterminer la densité, et on ajoute des poids marqués sur le plateau supérieur, de manière que l'instrument s'enfonce jusqu'au trait d'affleurement marqué sur sa tige. Puisque l'instrument flotte, la poussée qu'il éprouve est égale à son poids total, c'est-à-dire à la somme de 50 grammes et des poids placés sur le plateau : cette somme exprime donc le poids  $P$  d'un volume du liquide égal au volume de la partie plongée. — On plonge ensuite l'instrument dans l'eau, et on opère de la même manière : la somme de 50 grammes et des poids qui déterminent l'affleurement représente le poids  $p$  d'un volume d'eau égal au précédent. — On divise  $P$  par  $p$ , et le quotient exprime la densité du liquide.

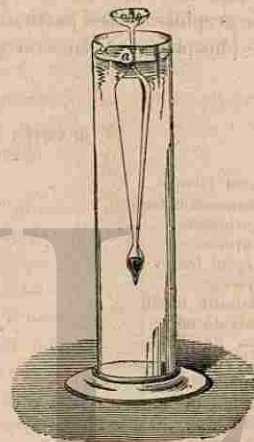


Fig. 94.  
Aréomètre de Fahrenheit.

106. **Corps solides solubles dans l'eau.** — Aucune des méthodes précédentes n'est immédiatement applicable aux corps solides qui sont solubles dans l'eau. — Or, en général, les corps qui sont solubles dans l'eau ne sont pas solubles dans l'essence de térébenthine. On opère avec ce liquide comme nous l'avons fait avec l'eau, ce qui donne la densité du corps *par rapport à l'essence* : il est facile de voir qu'il suffit de multiplier ensuite ce nombre par la densité de l'essence par rapport à l'eau.

En effet, soient  $P$  le poids du corps,  $p$  le poids du même volume d'eau, et  $p'$  le poids du même volume d'essence. L'opération, effectuée avec de l'essence, aura donné la valeur de  $\frac{P}{p'}$ ; or, multiplier cette valeur par la densité de l'essence, c'est la multiplier par  $\frac{p'}{p}$ , ce qui donne  $\frac{P}{p} \times \frac{p'}{p}$ , ou  $\frac{P}{p}$ , c'est-à-dire la densité du corps par rapport à l'eau.

107. **Résultats.** — Les tables ci-après donnent les densités des principaux corps solides et liquides. — On pourra remarquer que, pour un même corps solide, la densité peut varier, dans certaines circonstances, entre des limites assez étendues. Ainsi, pour la plupart des métaux, le cuivre ou le platine, par exemple, l'expérience fournit des valeurs sensiblement différentes, selon qu'on opère sur les échantillons qui ont été simplement fondus, ou sur des échantillons qui ont été soumis ultérieurement à des actions mécaniques, comme le laminage ou l'étirage à la filière. — Le carbone présente aussi des poids spécifiques différents, suivant qu'on le prend à l'état de diamant ou à l'état de graphite. — Des particularités analogues se retrouvent dans le soufre, le phosphore, et dans un grand nombre d'autres corps.

## DENSITÉS DE QUELQUES CORPS SOLIDES.

|                            |       |                                      |       |
|----------------------------|-------|--------------------------------------|-------|
| Acier trempé. . . . .      | 7,82  | Iode . . . . .                       | 4,95  |
| Aluminium fondu. . . . .   | 2,36  | Ivoire. . . . .                      | 1,92  |
| Anthracite. . . . .        | 1,40  | Jayet. . . . .                       | 1,51  |
| Antimoine . . . . .        | 6,72  | Laiton. . . . .                      | 8,15  |
| Argent fondu. . . . .      | 10,47 | Liège. . . . .                       | 0,24  |
| Arsenic. . . . .           | 5,75  | Magnésium. . . . .                   | 1,74  |
| Bismuth fondu. . . . .     | 9,82  | Manganèse. . . . .                   | 8,01  |
| Bois de hêtre. . . . .     | 0,85  | Marbre statuaire. . . . .            | 2,71  |
| — de peuplier. . . . .     | 0,59  | Nickel fondu. . . . .                | 8,28  |
| — de sapin jaune. . . . .  | 0,66  | Or fondu. . . . .                    | 19,26 |
| Bore cristallisé. . . . .  | 2,68  | — forgé. . . . .                     | 19,56 |
| Cadmium écroui. . . . .    | 8,69  | Phosphore ordinaire. . . . .         | 1,84  |
| Calcium. . . . .           | 1,58  | — rouge. . . . .                     | 2,10  |
| Chrome. . . . .            | 5,90  | Platine fondu. . . . .               | 21,15 |
| Cobalt fondu. . . . .      | 7,81  | — écroui. . . . .                    | 25,00 |
| Cristal de roche. . . . .  | 2,65  | Plomb. . . . .                       | 11,35 |
| Cuivre fondu. . . . .      | 8,85  | Porcelaine de Chine. . . . .         | 2,58  |
| — laminé. . . . .          | 8,95  | — de Sévres. . . . .                 | 2,24  |
| Diamant du Brésil. . . . . | 3,52  | Potassium. . . . .                   | 0,87  |
| Étain. . . . .             | 7,29  | Silicium cristallisé. . . . .        | 2,49  |
| Fer. . . . .               | 7,79  | Sodium. . . . .                      | 0,97  |
| Flint-glass. . . . .       | 5,39  | Soufre natif ou octaédrique. . . . . | 2,07  |
| Fonte de fer. . . . .      | 7,21  | — prismatique. . . . .               | 1,97  |
| Glace. . . . .             | 0,92  | Succin. . . . .                      | 1,08  |
| Graphite. . . . .          | 2,16  | Verre à vitres. . . . .              | 2,55  |
| Houille compacte. . . . .  | 1,55  | Zinc. . . . .                        | 7,19  |

## DENSITÉS DE QUELQUES LIQUIDES.

|                                  |       |                                  |        |
|----------------------------------|-------|----------------------------------|--------|
| Acide nitrique fumant. . . . .   | 1,451 | Essence de térébenthine. . . . . | 0,869  |
| — sulfurique concentré. . . . .  | 1,841 | Huile d'olive. . . . .           | 0,915  |
| Alcool absolu. . . . .           | 0,792 | Lait. . . . .                    | 1,050  |
| Brome. . . . .                   | 2,966 | Mercure. . . . .                 | 15,595 |
| Eau de mer. . . . .              | 1,026 | Sulfure de carbone. . . . .      | 1,295  |
| — distillée, à 4 degrés. . . . . | 1,000 | Vin de Bordeaux. . . . .         | 0,994  |
| Esprit de bois. . . . .          | 0,798 | — de Bourgogne. . . . .          | 0,991  |

## III. — ARÉOMÈTRES A POIDS CONSTANT.

108. **Aréomètres à poids constant, en général.** — On donne le nom d'*aréomètres à poids constant* à des instruments dont on fait usage dans l'industrie, et qui sont destinés à fournir des indications sur le degré de concentration des liquides, c'est-à-dire sur la quantité d'eau qui s'y trouve mélangée. — Ils se composent tous (fig. 95, 96 et 97) d'un tube de verre, portant un renflement à sa partie inférieure; une ampoule, contenant du mercure ou de la grenaille de plomb, sert à lester l'appareil et le maintient vertical quand il flotte dans un liquide. — Les divers aréomètres diffèrent entre eux par leur graduation, comme nous allons l'indiquer.

109. **Aréomètres de Baumé.** — Les aréomètres de Baumé se graduent de deux manières différentes, selon qu'ils sont destinés à des liquides plus denses que l'eau, ou à des liquides moins denses.

1° Les aréomètres destinés à des liquides *plus denses que l'eau* sont désignés, dans l'industrie, sous les noms de *pèse-acides*, *pèse-sirops*, *pèse-sels*, etc. — Pour graduer l'un de ces instruments, on le plonge dans l'eau pure, à la température de 12° environ, et on règle le lest de manière qu'il s'enfonce à peu près jusqu'au sommet du tube: on marque zéro au point d'affleurement (fig. 95). On fait ensuite une solution contenant, en poids, 15 parties de sel marin pour 85 parties d'eau; on y plonge l'instrument, qui s'y enfonce moins que dans l'eau pure, puisque cette solution est plus dense: au nouveau point d'affleurement, on marque 15. On partage l'intervalle de ces deux points en 15 parties égales, qu'on appelle *degrés* de l'aréomètre, et l'on continue à marquer des degrés égaux jusqu'au bas de la tige. — Lorsque l'instrument, plongé dans un acide quelconque, s'enfonce, par exemple, jusqu'au 54° degré, on dit que cet acide marque 54 degrés au pèse-acides de Baumé.

2° Les aréomètres qui doivent servir pour les liquides *moins denses que l'eau* sont désignés, dans l'industrie, sous le nom de *pèse-esprits*, *pèse-liqueurs*, etc. — Pour graduer l'un de ces instruments, on le plonge d'abord dans une solution contenant 10 parties de sel marin pour 90 parties d'eau, et on règle le lest de façon que l'instrument s'enfonce seulement jusqu'à la naissance du tube: on marque zéro au point

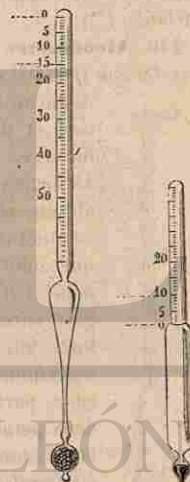


Fig. 95. Fig. 96.  
Aréomètres de Baumé. ®

d'affleurement (fig. 96). On plonge ensuite l'instrument dans l'eau pure : au point d'affleurement, on marque 10. On partage l'intervalle de ces deux points en dix parties égales, ou *degrés*, et on continue la graduation jusqu'au sommet de la tige (\*).

On voit que ces deux graduations sont absolument arbitraires : elles sont, en outre, indépendantes l'une de l'autre, et les deux échelles n'ont pas le même zéro. — Ces instruments sont donc uniquement destinés à fournir des points de repère à l'industrie; on sait, par exemple, que l'acide sulfurique du commerce doit marquer 66 degrés au pèse-acides de Baumé; que l'éther ordinaire du commerce doit marquer au pèse-esprits 56 degrés, et qu'il peut en marquer jusqu'à 65 quand on le rectifie, etc... Si ces liquides marquent un degré plus élevé que le degré commercial, c'est qu'ils sont plus concentrés qu'on n'est en droit de l'exiger; s'ils marquent un degré moindre, c'est qu'ils ne sont pas assez concentrés. — Mais l'instrument n'indique pas quelle est la proportion d'eau : il ne peut donc donner exactement la valeur vénale du mélange (\*\*).

110. **Alcoomètre centésimal de Gay-Lussac.** — L'alcoomètre de Gay-Lussac (fig. 97) est un aréomètre dont la graduation est effectuée de façon à donner la *richesse en alcool* des mélanges d'alcool et d'eau, pourvu qu'ils ne contiennent aucune autre matière. — La graduation est faite à la température de 15 degrés. On plonge d'abord l'instrument dans de l'alcool absolu, et on règle le lest de façon qu'il s'enfonce jusqu'au sommet de la tige : en ce point, on marque 100. Puis on fait une solution contenant *en volume* 95 d'alcool pour 100; au point d'affleurement on marque 95, et ainsi de suite, en opérant successivement avec des solutions contenant en volume 90, 85, 80, etc., d'alcool pour 100. Les points ainsi déterminés étant très rapprochés, on peut, sans erreur sensible, partager en 5 parties égales l'intervalle compris entre deux points consécutifs. — Si l'instrument s'enfonce jusqu'à la division 78, dans un mélange d'alcool et d'eau, ce mélange contiendra, en volume, 78 d'alcool pour 100.

Il est intéressant de remarquer combien sont différentes

(\*) Le plus souvent, on se contente de graduer les pèse-liqueurs en les comparant avec d'autres instruments déjà construits : on se dispense alors de marquer sur la tige les dix premiers degrés, qui seraient inutiles dans la pratique.

(\*\*) L'aréomètre de Cartier n'est qu'une modification de celui de Baumé, imaginée dans un but de concurrence commerciale. Sa graduation est tout aussi arbitraire, et Cartier n'en a pas fait connaître les bases; le 10° degré représente encore l'affleurement dans l'eau pure à la température de 12°,5; mais le 29° degré correspond au 51° de l'aréomètre de Baumé. — Cet aréomètre a été longtemps employé par la régie, pour les droits à percevoir sur les eaux-de-vie et les esprits. On le remplace aujourd'hui par l'alcoomètre centésimal de Gay-Lussac.

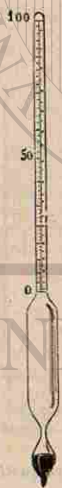


Fig. 97.

les grandeurs des divisions ainsi déterminées par l'expérience : les degrés voisins du zéro sont beaucoup plus petits, comme le montre la figure 97, que les degrés voisins du 100° degré.

L'instrument ayant été gradué à la température de 15 degrés, ses indications doivent subir des corrections quand on en fait usage à une autre température. Gay-Lussac a donné des tables qui permettent d'effectuer ces corrections : elles peuvent conduire à modifier, de plusieurs unités, les indications fournies par l'instrument.

111. **Essais des vins.** — L'alcoomètre ne peut être employé pour obtenir immédiatement la richesse alcoolique des vins, parce que ces liquides contiennent, outre l'eau et l'alcool, diverses substances qui en modifient la densité. — Il faut donc commencer par éliminer ces substances. Or l'expérience a montré que, quand on distille un échantillon de vin ordinaire (c'est-à-dire quand on le fait bouillir et que l'on condense le liquide vaporisé), l'alcool passe *tout entier*, avec un peu d'eau, dans le premier tiers du liquide condensé. — Cette distillation peut se faire, en quelques minutes, au moyen du petit appareil qui est représenté par la figure 98. On met du vin dans l'éprou-

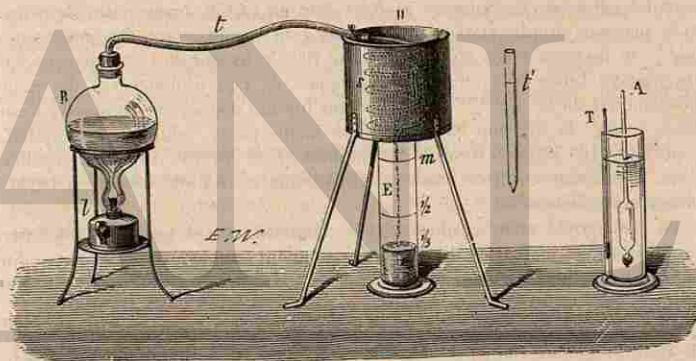


Fig. 98. — Essai des vins.

vette E, jusqu'à un trait marqué en *m*, on verse ce vin dans le ballon B, et l'on rince l'éprouvette avec un peu d'eau, qu'on verse encore dans le ballon. On fait communiquer le ballon, au moyen d'un tube de caoutchouc *t*, avec un petit serpentin *s*, contenu dans un vase de laiton D plein d'eau froide, et on allume la lampe *l*. Au bout de quelques instants, on voit l'ébullition commencer, et l'on recueille le liquide condensé dans l'éprouvette E. Quand il a atteint le trait 1/3, on retire la lampe et l'on achève de remplir l'éprouvette avec de l'eau pure, jusqu'au trait *m*. — On a ainsi un liquide contenant, *sous le même volume*, la *même quantité d'alcool* que le vin à essayer : comme il ne renferme plus de substances étrangères, on peut le doser avec l'alcoomètre. Un thermomètre T donne la température de ce liquide, et permet de faire les corrections au moyen de la table de Gay-Lussac (\*).

(\*) Quand on opère sur des vins capiteux, comme le vin de Madère, les vins d'Espagne

**112. Pèse-sels centésimaux.** — Lorsqu'on a besoin de déterminer la richesse de solutions diverses d'un même sel, on peut graduer un *pèse-sels* centésimal pour cet usage, en se servant de ce sel lui-même, comme on s'est servi de l'alcool pour graduer l'alcoomètre. C'est ce qu'on fait dans quelques fabriques, et c'est ainsi encore qu'on a pu construire des *pèse-vins*, des *pèse-laits*, etc. — Mais la confiance qu'on peut avoir dans ces instruments est toujours subordonnée à l'hypothèse que le liquide soumis à l'essai ne contient aucune matière étrangère.

**113. Volumètres. — Densimètres.** — Un aréomètre peut être gradué de façon à donner, soit la densité d'un liquide (poids de l'unité de volume), soit le volume occupé par l'unité de poids de ce liquide. L'instrument prend alors le nom de *densimètre*, ou de *volumètre*.

Pour graduer un *volumètre* destiné aux liquides plus denses que l'eau, on règle le poids de l'appareil de façon qu'il s'enfonce dans l'eau pure jusqu'au haut de la tige, et l'on marque 100 au point d'affleurement. On le plonge ensuite dans un liquide dont la densité soit connue,  $\frac{1}{2}$  par exemple : il s'enfonce d'une quantité moindre, et le poids du liquide déplacé étant le même dans les deux cas, les volumes plongés sont en raison inverse des densités. Si le premier volume était représenté par 1, le second devrait être représenté par  $\frac{1}{2}$ ; le premier ayant été désigné par 100, le second doit être marqué 50. On partage l'intervalle en 25 parties égales, et l'on prolonge ces divisions jusqu'au bas de la tige (\*). — Si, dans un liquide donné, un volumètre s'enfonce jusqu'à la division 95, c'est qu'un même poids, celui de l'instrument, représente 100 volumes d'eau et 95 volumes de ce liquide. Or 1 kilogramme d'eau représente un litre; donc 1 kilogramme du liquide soumis à l'expérience représente 0,95.

Un instrument étant gradué comme volumètre, il est facile d'en déduire les indications de cet instrument fonctionnant comme *densimètre*. — En effet, pour le liquide que nous venons de prendre comme exemple, puisque 0,95 pèse un kilogramme, la densité est  $\frac{1}{0,95}$  ou  $\frac{100}{95}$ ; elle s'obtient donc en divisant le nombre 100 par le degré du volumètre. Il suffit donc de construire une table donnant, pour les divisions successives du volumètre, les valeurs de ces quotients, c'est-à-dire les densités correspondantes : on peut ainsi marquer ces nombres sur l'instrument, qui prend alors le nom de *densimètre*.

ou du midi de la France, il est nécessaire de distiller jusqu'au trait  $\frac{1}{2}$ . C'est là, du reste, ce qu'il faut toujours faire quand on opère sur un vin dont on ne connaît pas *a priori* la richesse approximative.

(\*) Une méthode analogue pourrait être employée pour graduer les volumètres destinés aux liquides moins denses que l'eau. — On préfère ordinairement la suivante : le lest ayant été réglé de façon que l'instrument plonge dans l'eau jusqu'à la naissance de la tige, et le nombre 100 ayant été marqué en ce point, on pèse l'instrument; on y ajoute ensuite momentanément une surcharge ayant, par exemple, un poids égal au quart du poids primitif; le rapport du poids primitif au poids actuel est le rapport de 4 à 5, et ce rapport est aussi celui des volumes d'eau déplacés. Donc, puisqu'on a marqué 100 au premier point d'affleurement, on doit marquer 125 au second; on partage l'intervalle en vingt-cinq parties égales et on prolonge la division jusqu'au haut de la tige.

## CHAPITRE IV

### PESANTEUR DE L'AIR ET DES GAZ. — BAROMÈTRE

**114. Extension des principes de l'hydrostatique aux corps gazeux.** — Les gaz se rapprochent des liquides par la fluidité, c'est-à-dire par la mobilité de leurs molécules, qui rend leur forme variable avec celle du vase qui les contient. Ils s'en distinguent seulement par leur facile compressibilité et par leur *force élastique* (28, 29). — Aussi tous les principes d'hydrostatique qui dépendent seulement de la mobilité des molécules sont-ils applicables aux gaz aussi bien qu'aux liquides.

**115. Transmission des pressions dans les gaz. — Égalité de pressions en tous sens autour d'un point.** — Le principe de la *transmission des pressions*, qui est le principe fondamental de l'hydrostatique (70), est applicable aux corps gazeux.

Si, par exemple, l'intervalle compris entre les deux pistons A et B de la figure 52 était occupé par un gaz, et si, le piston P ayant une surface 100 fois égale à celle du piston *p*, on venait à placer sur le petit piston un poids de 20 kilogrammes, et sur l'autre un poids de 2000 kilogrammes, l'équilibre s'établirait encore entre les deux pressions. Seulement, dans ce cas, les pistons s'enfonceraient d'abord d'une certaine quantité dans leurs cylindres, en raison de la compressibilité du gaz. — Une fois cette diminution de volume produite, la pression totale transmise au piston P, par l'intermédiaire du gaz, serait équivalente à 100 fois la pression exercée sur le piston *p*.

De ce principe, on déduit, pour les corps gazeux comme pour les liquides, et par le même raisonnement, le principe d'*égalité de pression dans tous les sens autour d'un point*.

**116. L'air et les gaz sont pesants.** — Pour démontrer que les gaz sont pesants, on peut faire l'expérience suivante, qui n'est qu'une modification d'une expérience de Galilée.

Dans un ballon de verre, fermé par un robinet, on fait le vide à l'aide de la machine pneumatique. On le suspend sous l'un des plateaux

**112. Pèse-sels centésimaux.** — Lorsqu'on a besoin de déterminer la richesse de solutions diverses d'un même sel, on peut graduer un pèse-sels centésimal pour cet usage, en se servant de ce sel lui-même, comme on s'est servi de l'alcool pour graduer l'alcoomètre. C'est ce qu'on fait dans quelques fabriques, et c'est ainsi encore qu'on a pu construire des pèse-vins, des pèse-laits, etc. — Mais la confiance qu'on peut avoir dans ces instruments est toujours subordonnée à l'hypothèse que le liquide soumis à l'essai ne contient aucune matière étrangère.

**113. Volumètres. — Densimètres.** — Un aréomètre peut être gradué de façon à donner, soit la densité d'un liquide (poids de l'unité de volume), soit le volume occupé par l'unité de poids de ce liquide. L'instrument prend alors le nom de densimètre, ou de volumètre.

Pour graduer un volumètre destiné aux liquides plus denses que l'eau, on règle le poids de l'appareil de façon qu'il s'enfonce dans l'eau pure jusqu'au haut de la tige, et l'on marque 100 au point d'affleurement. On le plonge ensuite dans un liquide dont la densité soit connue,  $\frac{1}{2}$  par exemple : il s'enfonce d'une quantité moindre, et le poids du liquide déplacé étant le même dans les deux cas, les volumes plongés sont en raison inverse des densités. Si le premier volume était représenté par 1, le second devrait être représenté par  $\frac{1}{2}$ ; le premier ayant été désigné par 100, le second doit être marqué 50. On partage l'intervalle en 25 parties égales, et l'on prolonge ces divisions jusqu'au bas de la tige (\*). — Si, dans un liquide donné, un volumètre s'enfonce jusqu'à la division 95, c'est qu'un même poids, celui de l'instrument, représente 100 volumes d'eau et 95 volumes de ce liquide. Or 1 kilogramme d'eau représente un litre; donc 1 kilogramme du liquide soumis à l'expérience représente 0,95.

Un instrument étant gradué comme volumètre, il est facile d'en déduire les indications de cet instrument fonctionnant comme densimètre. — En effet, pour le liquide que nous venons de prendre comme exemple, puisque 0,95 pèse un kilogramme, la densité est  $\frac{1}{0,95}$  ou  $\frac{100}{95}$ ; elle s'obtient donc en divisant le nombre 100 par le degré du volumètre. Il suffit donc de construire une table donnant, pour les divisions successives du volumètre, les valeurs de ces quotients, c'est-à-dire les densités correspondantes : on peut ainsi marquer ces nombres sur l'instrument, qui prend alors le nom de densimètre.

ou du midi de la France, il est nécessaire de distiller jusqu'au trait  $\frac{1}{2}$ . C'est là, du reste, ce qu'il faut toujours faire quand on opère sur un vin dont on ne connaît pas *a priori* la richesse approximative.

(\*) Une méthode analogue pourrait être employée pour graduer les volumètres destinés aux liquides moins denses que l'eau. — On préfère ordinairement la suivante : le lest ayant été réglé de façon que l'instrument plonge dans l'eau jusqu'à la naissance de la tige, et le nombre 100 ayant été marqué en ce point, on pèse l'instrument; on y ajoute ensuite momentanément une surcharge ayant, par exemple, un poids égal au quart du poids primitif; le rapport du poids primitif au poids actuel est le rapport de 4 à 5, et ce rapport est aussi celui des volumes d'eau déplacés. Donc, puisqu'on a marqué 100 au premier point d'affleurement, on doit marquer 125 au second; on partage l'intervalle en vingt-cinq parties égales et on prolonge la division jusqu'au haut de la tige.

## CHAPITRE IV

### PESANTEUR DE L'AIR ET DES GAZ. — BAROMÈTRE

**114. Extension des principes de l'hydrostatique aux corps gazeux.** — Les gaz se rapprochent des liquides par la fluidité, c'est-à-dire par la mobilité de leurs molécules, qui rend leur forme variable avec celle du vase qui les contient. Ils s'en distinguent seulement par leur facile compressibilité et par leur force élastique (28, 29). — Aussi tous les principes d'hydrostatique qui dépendent seulement de la mobilité des molécules sont-ils applicables aux gaz aussi bien qu'aux liquides.

**115. Transmission des pressions dans les gaz. — Égalité de pressions en tous sens autour d'un point.** — Le principe de la transmission des pressions, qui est le principe fondamental de l'hydrostatique (70), est applicable aux corps gazeux.

Si, par exemple, l'intervalle compris entre les deux pistons A et B de la figure 52 était occupé par un gaz, et si, le piston P ayant une surface 100 fois égale à celle du piston *p*, on venait à placer sur le petit piston un poids de 20 kilogrammes, et sur l'autre un poids de 2000 kilogrammes, l'équilibre s'établirait encore entre les deux pressions. Seulement, dans ce cas, les pistons s'enfonceraient d'abord d'une certaine quantité dans leurs cylindres, en raison de la compressibilité du gaz. — Une fois cette diminution de volume produite, la pression totale transmise au piston P, par l'intermédiaire du gaz, serait équivalente à 100 fois la pression exercée sur le piston *p*.

De ce principe, on déduit, pour les corps gazeux comme pour les liquides, et par le même raisonnement, le principe d'égalité de pression dans tous les sens autour d'un point.

**116. L'air et les gaz sont pesants.** — Pour démontrer que les gaz sont pesants, on peut faire l'expérience suivante, qui n'est qu'une modification d'une expérience de Galilée.

Dans un ballon de verre, fermé par un robinet, on fait le vide à l'aide de la machine pneumatique. On le suspend sous l'un des plateaux

d'une balance (fig. 99), et dans l'autre plateau on fait une tare. On ouvre alors le robinet, pour laisser rentrer l'air dans le ballon : on voit le fléau de la balance s'incliner du côté du ballon. Donc *l'air est pesant*.

En laissant rentrer dans le ballon un gaz quelconque, on obtient un résultat semblable. Donc *tous les gaz sont pesants*.

Nous verrons plus loin (livre II, chapitre III) comment on peut déterminer avec exactitude le poids, ou plus exactement la masse, d'un volume déterminé d'un gaz : provisoirement, nous admettrons que le poids d'un litre d'air, sous la pression ordinaire, est environ 1<sup>er</sup>,3.

**117. Condition d'équilibre d'un gaz pesant.** — L'air et les gaz étant pesants, le raisonnement qui a été fait pour trouver la condition d'équilibre d'un liquide pesant (74) leur est applicable; par suite, *dans une masse gazeuse en équilibre, la pression doit être la même en tous les points d'un même plan horizontal*.

L'atmosphère qui nous entoure nous fournit une masse gazeuse, d'une soixantaine de kilomètres de hauteur, dans laquelle nous pouvons étudier la pression en différents points. — C'est cette étude expérimentale que nous allons maintenant aborder.

**118. Pression atmosphérique. — Expérience de Torricelli.** — A l'époque où Galilée prouva que l'air est pesant, on expliquait encore par une hypothèse singulière un grand nombre de faits d'observation quotidienne, notamment l'ascension de l'eau dans les tuyaux des pompes aspirantes. On admettait que *la nature a horreur du vide*; que, partout où un vide tend à se produire, la nature tend à le combler. — Cependant, vers la même époque, des fontainiers de Florence remarquèrent que les pompes ne peuvent jamais aspirer l'eau à plus de 32 pieds de hauteur (environ 10 mètres) : l'ancienne hypothèse devenait donc insuffisante.

C'est à Torricelli, élève de Galilée, que revient l'honneur d'avoir prouvé que la cause réelle de ces phénomènes est la pression exercée par l'atmosphère sur la surface libre des liquides. Il pensa que, si cette pression ne peut soutenir qu'une colonne d'eau de 10 mètres de haut, elle ne doit pouvoir soutenir qu'une colonne de mercure de hauteur encore moindre, puisque le mercure est plus dense que l'eau.

Il emplit de mercure un tube de verre AB (fig. 400), long d'à peu près 1 mètre, et fermé en A; puis, bouchant l'autre extrémité B avec le doigt, il renversa le tube et le plongea par cette extrémité dans une



Fig. 99. — Démonstration de la pesanteur de l'air.

cuvette MN contenant du mercure. En retirant le doigt, il vit la colonne liquide conserver, au-dessus de la surface libre MN du mercure dans la

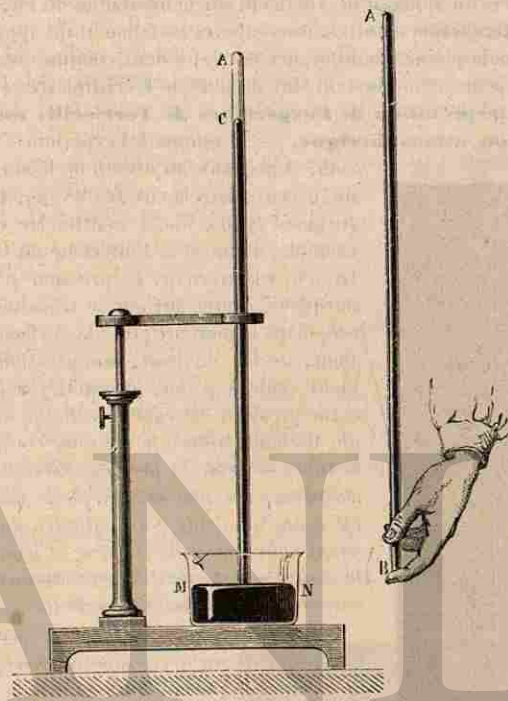


Fig. 400. — Expérience de Torricelli.

cuvette, une hauteur qui, avec nos mesures actuelles, est d'environ 76 centimètres.

**119. Expériences de Pascal.** — Pascal répéta l'expérience de Torricelli avec d'autres liquides, ayant une densité différente de celle du mercure. Il la répéta, par exemple, avec du vin. — Or le mercure a pour densité 15,6; la densité du vin est sensiblement la même que celle de l'eau, c'est-à-dire qu'elle est à peu près égale à 1. Pour produire le même effet que le mercure, la colonne de vin doit donc avoir une hauteur treize fois et demie plus grande, ou plus exactement  $0^m,76 \times 15,6$ , c'est-à-dire à peu près 10<sup>m</sup>,33. Et, en effet, en opérant avec un tube suffisamment long, Pascal constata que le vin resta soutenu jusqu'à une hauteur d'environ 10 mètres, avec nos mesures actuelles.

Enfin, pour achever de rendre la démonstration concluante, Pascal remarqua que la pression atmosphérique doit aller progressivement en diminuant, à mesure qu'on s'élève dans l'atmosphère; par suite, la

hauteur du mercure dans l'appareil de Torricelli doit diminuer lorsqu'on le transporte sur une montagne. — Pascal fit installer, par son beau-frère Périer, un appareil de Torricelli sur la montagne du Puy de Dôme, en même temps que d'autres observateurs installaient un appareil semblable dans la plaine. La différence entre les deux colonnes de mercure, observées à un même instant, fut de plus de 8 centimètres (\*).

**120. Interprétation de l'expérience de Torricelli; mesure de la pression atmosphérique.** — Revenons à l'expérience de Torricelli, et prenons, au niveau de la surface libre du mercure dans la cuvette MN (fig. 101), deux surfaces égales, de 1 centimètre carré par exemple, l'une *ab* à l'intérieur du tube, l'autre *a'b'* à l'extérieur. La pression *p* que l'atmosphère exerce sur *a'b'* se transmet en tous sens dans le mercure (70); la surface *ab* reçoit donc, de bas en haut, une pression précisément égale à *p*; or, puisqu'il y a équilibre, cette pression est égale à celle qu'exerce sur *ab*, de haut en bas, le mercure contenu dans le tube. — Donc la pression exercée par l'atmosphère, sur une surface plane quelconque, est égale au poids d'un cylindre de mercure ayant pour base cette surface, et pour hauteur la distance verticale des deux niveaux de mercure dans l'appareil de Torricelli.



Fig. 101.

D'après cela, pour calculer la pression de l'atmosphère sur 1 centimètre carré, il suffit de calculer le poids d'un cylindre de mercure ayant 1<sup>cm</sup>² de base et 76<sup>cm</sup> de hauteur. Le volume de ce cylindre est de 76<sup>cm</sup>³; on obtiendra donc son poids en grammes, en multipliant la densité du mercure 13,6 par 76; on trouve ainsi 1053<sup>gr</sup>,6, ou 1<sup>kg</sup>,0536. — Si l'on veut faire usage du système C. G. S., et évaluer en dynes la pression atmosphérique sur un centimètre carré, on remarquera que cette pression est égale au poids d'une masse de 1053<sup>gr</sup>,6 de mercure; comme, à Paris, le poids d'un gramme est 981 dynes, la pression atmosphérique est donc égale à 1053,6 × 981 = 1 013 000 dynes, ou environ une mégadyne.

(\*) Pascal avait fait lui-même une première expérience à Paris, au sommet de la tour Saint-Jacques; il avait constaté que la hauteur de la colonne de mercure était un peu moindre au sommet de la tour qu'au pied (la différence était d'environ 4 millimètres et demi). Il avait pensé alors qu'on obtiendrait une différence bien plus considérable en opérant sur un lieu beaucoup plus élevé, comme le Puy de Dôme. — C'est en mémoire de ces expériences, qu'on a placé la statue de Pascal sous la voûte qui supporte la tour Saint-Jacques.

**121. Évaluation des pressions en hauteurs de mercure.** — On vient de voir que la hauteur de la colonne de mercure, dans le tube de Torricelli, varie avec l'altitude à laquelle se trouve l'appareil dans l'atmosphère; elle varie aussi, en un même lieu, aux différents instants du jour: il en est donc de même de la pression atmosphérique. Or, si l'on rapporte toutes ces pressions à une même surface, il est clair qu'elles sont entre elles dans le même rapport que les hauteurs des colonnes de mercure qui leur font équilibre. — Aussi, au lieu de désigner la pression atmosphérique par sa valeur en kilogrammes (ou en dynes, avec le système C. G. S.), on l'exprime ordinairement par la hauteur de la colonne de mercure qui lui fait équilibre. On dit, par exemple, que, à un instant donné, la pression est de 75 centimètres: cette locution abrégée signifie que, à cet instant, la pression exercée par l'atmosphère, sur une surface déterminée, est égale au poids d'une colonne de mercure ayant pour base cette surface et pour hauteur 75 centimètres (\*).

Si l'on voulait passer de l'évaluation de la pression en hauteur de mercure, à une évaluation de la pression en poids sur une surface donnée, on remarquerait qu'une hauteur de 76 centimètres de mercure produit une pression de 1<sup>kg</sup>,053 par centimètre carré; par suite, une pression de 1 kilogramme par centimètre carré serait représentée par une hauteur de mercure de  $\frac{76}{1,053}$  ou 75<sup>cm</sup>,5.

**122. La hauteur du mercure dans le tube de Torricelli mesure aussi la force élastique de l'air.** — Isolons par la pensée,

dans le lieu même où est placé le tube de Torricelli, une couche d'air comprise entre deux plans horizontaux peu distants AB et CD (fig. 102). Cette couche supporte la pression de l'atmosphère, à la fois de haut en bas sur le plan AB, et de bas en haut sur le plan CD. Ces pressions tendent à rapprocher les deux plans; donc, si l'équilibre existe, c'est que la force élastique du gaz compris entre les deux plans est égale à la pression atmosphérique elle-même. — On dit alors, en employant une locution abrégée qui doit être interprétée comme la précédente (121), que la force élastique de l'air est de 75 centimètres.



Fig. 102.

(\*) Cependant, si les pressions que l'on veut comparer s'exercent en des lieux différents, elles ne sont plus dans le même rapport que les hauteurs des colonnes de mercure qui leur font équilibre. Soient H et H' ces hauteurs; *g* et *g'* les intensités de la pesanteur aux deux points considérés; P et P' les pressions sur un centimètre carré, et D la densité de mercure. On a :

$$P = HDg, \quad P' = H'Dg' \quad \text{et par suite} \quad \frac{P}{P'} = \frac{H}{H'} \frac{g}{g'}$$

On conçoit ainsi comment la hauteur de la colonne mercurielle est la même, soit qu'on place l'appareil de Torricelli dans une chambre close, soit qu'on le place à l'extérieur, puisque la force élastique de l'air de la chambre est égale à celle de l'air extérieur.

125. **Effets produits par la pression atmosphérique. — Crève-vessie, hémisphères de Magdebourg.** — On peut rendre manifestes les effets de la pression atmosphérique par les expériences suivantes.



Fig. 105. — Crève-vessie.

L'expérience du *crève-vessie* (fig. 105) consiste à placer, sur la platine de la machine pneumatique, un cylindre de verre, ouvert à ses deux extrémités, et sur l'ouverture supérieure duquel on a tendu une membrane de vessie. Tant qu'on ne fait pas fonctionner la machine, la membrane reste plane, malgré la pression qu'elle supporte de la part de l'atmosphère, parce que la force élastique de l'air intérieur exerce sur elle une pression égale de bas en haut; mais, dès les premiers coups de piston qui diminuent cette force élastique, la membrane s'infléchit, et bientôt elle se brise sous l'effort de la pression atmosphérique.

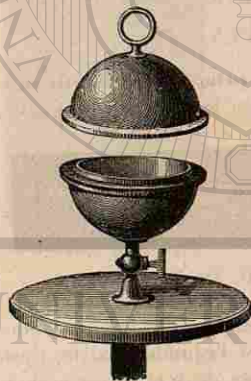


Fig. 104.  
Hémisphères de Magdebourg.

Les *hémisphères de Magdebourg* (fig. 104) sont deux hémisphères métalliques creux dont les bords peuvent s'appliquer exactement l'un sur l'autre; une bande de cuir graissé rend la fermeture encore plus hermétique. L'hémisphère inférieur porte un robinet, qui peut se visser sur le conduit de la machine pneumatique. — Les deux hémisphères étant superposés, on fait le vide dans l'intérieur, et l'on ferme le robinet. La pression que l'atmosphère exerce normalement à chacun des éléments de la sphère, n'étant plus équilibrée par la force élastique de l'air intérieur, maintient les hémisphères appliqués l'un contre l'autre : deux personnes, tirant en sens opposé, ne peuvent les séparer. Dès qu'on ouvre le robinet, on entend un sifflement qui annonce la rentrée de l'air, et l'on sépare les hémisphères sans difficulté. — Dans une expérience exécutée à Magdebourg par Otto de Guericke, vingt chevaux ne purent parvenir à séparer deux hémisphères d'un diamètre assez considérable, dans lesquels on avait fait le vide.

124. **Effets de la pression atmosphérique sur nos organes.**

— La pression de l'atmosphère n'a pas, en général, d'effet sensible sur nos organes, bien que cette pression ait une valeur d'environ 105 kilogrammes par décimètre carré (120). Les cavités de l'organisme sont occupées, ou par des liquides qui sont incompressibles, ou par des gaz dont la force élastique a pris une valeur égale à la pression atmosphérique : cette pression, tant qu'elle demeure constante, ne peut donc, ni tendre à diminuer le volume de notre corps, ni en gêner les mouvements.

Nous éprouvons, au contraire, une gêne extrême quand la pression extérieure vient à diminuer ou à augmenter notablement, parce qu'il n'y a plus équilibre entre la force élastique du gaz intérieur et la pression extérieure. C'est l'effet que produisent sur nous les variations de la pression atmosphérique, quand elles atteignent une valeur un peu grande. — Ce sont encore des effets de ce genre qui se manifestent, avec exagération, sur les aéronautes qui s'élèvent à des hauteurs considérables, ou sur les ouvriers qui travaillent, à d'assez grandes profondeurs, sous l'eau, dans des appareils à air comprimé.

125. **Baromètre à cuvette.** — L'appareil de Torricelli, disposé de manière à permettre de mesurer avec précision la pression atmosphérique, prend le nom de *baromètre à cuvette*.

Pour que les indications de l'instrument soient exactes, il faut que

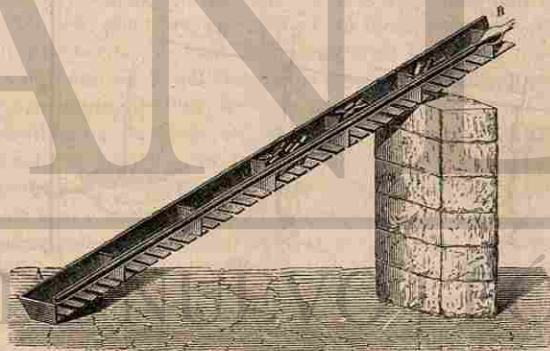


Fig. 105.

la partie supérieure du tube, ou *chambre barométrique*, ne contienne aucun gaz ni aucune vapeur, dont la force élastique puisse déprimer la colonne mercurielle. — Après s'être procuré du mercure bien pur (\*), on fait choix d'un tube de 85 à 90 centimètres de longueur (fig. 105);

(\*) Le mercure récemment expédié de la mine est, en général, tout à fait pur. Celui qui a déjà servi dans les laboratoires contient souvent un peu d'oxyde et des traces de métaux étrangers : on le débarrasse de ces impuretés, en l'agitant à plusieurs reprises avec de l'acide azotique, lavant ensuite à grande eau, puis séchant avec du papier buvard, et filtrant à travers des entonnoirs de verre effilés.



on le ferme à l'une de ses extrémités A, et l'on soude une boule B à l'autre extrémité. On emplit ce tube de mercure, puis on le couche sur une grille inclinée; on place des charbons ardents sur cette grille, de manière à faire bouillir successivement et avec précaution toutes les parties de la colonne. Dans cette opération, l'humidité et les bulles d'air qui étaient restées adhérentes à la paroi du tube sont chassées; la boule B sert à empêcher la projection du mercure pendant l'ébullition. — Lorsque la surface du mercure paraît brillante dans toute la longueur du tube, on enlève les charbons et on laisse refroidir; on détache ensuite la boule, on bouche avec le doigt l'extrémité ouverte, et on installe le tube dans la cuvette. — Une fois l'appareil construit, on reconnaît que le tube a été bien purgé d'air et d'humidité, en l'inclinant jusqu'à ce que le mercure en atteigne le sommet; si le liquide produit un bruit sec, en frappant le sommet du tube, on peut admettre que l'appareil est construit dans des conditions satisfaisantes.

L'ébullition du mercure est toujours une opération difficile à effectuer sans briser le tube, pour peu qu'il ait un assez grand diamètre. On procède alors comme il suit. — A l'extrémité B du tube on soude un petit ballon de verre C (fig. 106), présentant, d'une part un petit

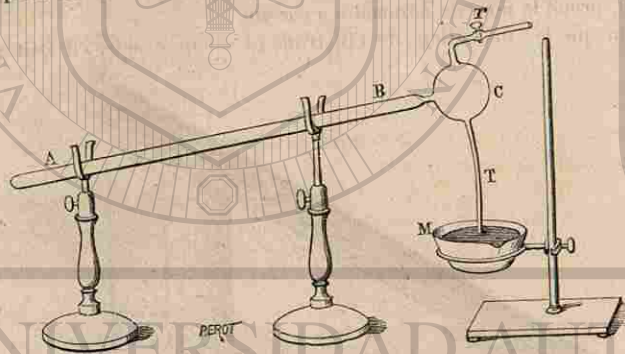


Fig. 106.

tube T terminé par une pointe très effilée et fermée à la lampe, d'autre part un tube muni d'un robinet *r*, par lequel il est mis en communication avec une pompe à mercure (175). On chauffe le tube AB, et on y fait le vide; l'humidité est chassée. On introduit alors la pointe effilée T dans un vase M contenant du mercure chauffé au-dessus de 100°, et on brise la pointe. Le mercure pénètre lentement dans le ballon, puis dans le tube AB. La pointe effilée doit être assez fine pour que le remplissage du tube dure deux heures. Lorsque le tube est plein, on ouvre le robinet *r*, on détache la boule C, et on termine l'opération comme il a été dit plus haut.

126. **Baromètres usuels à cuvette.** — Dans les baromètres d'appartement, la cuvette et le tube sont fixés sur une planche de bois: une division en millimètres, dont le zéro est au niveau du liquide dans la cuvette, sert à mesurer la hauteur de la colonne de mercure.

Dans ces baromètres, on admet que le niveau du mercure dans la cuvette demeure invariable. Cependant, chaque fois que la colonne monte dans le tube, le niveau s'abaisse dans la cuvette, et réciproquement; ce niveau cesse alors de correspondre au zéro de la graduation. Cet inconvénient peut être atténué en donnant à la cuvette une large surface (fig. 107). La cuvette est fermée par une peau de chamois qui donne passage à l'air, tout en empêchant la poussière de pénétrer.

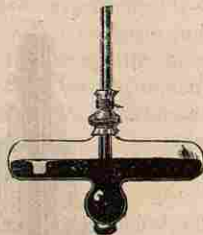


Fig. 107.

127. **Baromètre de Fortin.** — Le baromètre de Fortin est un baromètre à cuvette, qui offre le double avantage de permettre une grande précision dans les mesures et d'être facilement transportable.

La cuvette est formée par un cylindre de verre, assujéti entre deux montures métalliques (fig. 108). La figure 109, qui représente une coupe de la partie inférieure de ce baromètre, montre que les deux montures métalliques NN, MM, sont garnies intérieurement de pièces de buis BB, B'B', pour éviter le contact du mercure avec le métal qu'il pourrait attaquer. — Le fond de la cuvette est formé par une peau de chamois PP; une vis V, qui traverse la monture métallique inférieure, supporte un disque de buis, fixé à la peau de chamois, en sorte qu'on peut faire monter ou descendre le niveau du mercure dans la cuvette en tournant la vis dans un sens ou dans l'autre. Une petite pointe d'ivoire *a*, fixée à la partie supérieure de la cuvette, indique le niveau auquel on devra toujours amener la surface *mn* du mercure, avant de commencer l'observation. Pour arriver à ce résultat, on fait mouvoir la vis V jusqu'à ce que l'extrémité de la pointe *a* paraisse toucher exactement son image, vue par réflexion dans le mercure.

Le tube du baromètre est fixé dans l'ouverture CC, que présente la cuvette à sa partie inférieure, au moyen d'une peau de chamois qu'il traverse: cette peau est serrée, par des fils, d'une part sur le tube, dans un étranglement ménagé à cet effet, d'autre part sur un rebord saillant de la garniture de buis. La flexibilité et la perméabilité de la peau permettent à la pression atmosphérique de s'exercer librement à la surface du mercure dans la cuvette. — Sur la gaine de laiton qui entoure le tube de verre dans toute sa longueur, est tracée une échelle divisée en millimètres ou en demi-millimètres, dont le zéro correspondrait à l'extrémité de la pointe d'ivoire *a*. Deux fentes, pratiquées dans la longueur de la gaine et opposées l'une à l'autre, permettent d'aper-

cevoir le sommet de la colonne de mercure. — Enfin, pour mesurer avec précision la hauteur barométrique, on se sert du curseur métal-

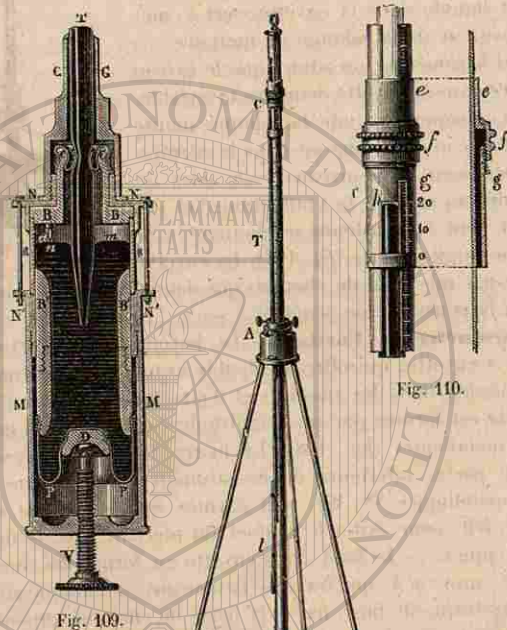


Fig. 108.

Fig. 108. — Baromètre de Fortin.

lique C (fig. 108 et 110). Ce curseur porte deux petites fenêtres, placées en face l'une de l'autre, de manière que leurs arêtes supérieures soient au même niveau. On fait glisser le curseur, le long de la gaine,

jusqu'à ce que le plan horizontal mené par ces deux arêtes paraisse tangent au sommet de la colonne de mercure; le numéro de la division qui correspond à ce niveau est ainsi déterminé avec exactitude (\*).

Pour installer l'instrument, on peut le suspendre par sa partie supérieure, comme un fil à plomb. — On peut encore l'assujettir sur un trépied, comme l'indique la figure 108, en adaptant, vers le milieu A du tube, un système de suspension connu sous le nom de *suspension de Cardan*: ce système de suspension permet au tube de se placer toujours verticalement, sous l'action du poids considérable de mercure que contient la cuvette (\*\*).

En général, quand un baromètre à cuvette doit être transporté, on a toujours à craindre que des mouvements accidentels ne fassent rentrer de l'air, par la partie inférieure du tube, jusque dans la chambre barométrique, ou que les chocs du mercure contre le sommet du tube ne viennent à le briser. — Le baromètre de Fortin est, au contraire, facilement transportable: on peut même l'employer comme instrument de voyage. Il suffit de faire remonter le fond mobile de la cuvette, à l'aide de la vis V, jusqu'à ce que le mercure remplisse complètement la cuvette et le tube: on peut alors le renverser, ou lui imprimer des mouvements quelconques, sans avoir à craindre ni rentrée d'air, ni rupture du tube de verre.

(\*) Le curseur qui est représenté par la figure 110 se compose de trois pièces: la pièce supérieure *e* glisse, à frottement juste, le long de la gaine du tube; l'inférieure *g*, dans laquelle sont pratiquées les fenêtres, a un diamètre un peu plus grand; enfin, la pièce moyenne est une sorte de bague *f* retenue par l'anneau *e*, sur lequel, d'ailleurs, elle peut librement tourner: elle engrène, par un pas de vis, avec la pièce inférieure *g*, ainsi que le montre la coupe longitudinale jointe à la figure 110. On transporte d'abord le curseur tout entier, en faisant glisser la pièce *e* sur la gaine, jusqu'à ce que les arêtes *h* des fenêtres occupent à peu près la position voulue; on fait ensuite tourner sur elle-même la bague *f*, ce qui n'imprime à la pièce *g* qu'un mouvement vertical très lent, jusqu'à ce que l'œil, placé dans le plan des bords supérieurs des fenêtres, juge de la réalisation définitive du contact.

Pour obtenir plus de précision dans les mesures, on trace, sur le côté vertical de la fenêtre antérieure, en regard de la graduation du tube, une division faisant *vernier* avec elle. On peut ainsi évaluer, à un vingtième de millimètre près, la hauteur de la colonne mercurielle.

(\*\*) La suspension de Cardan présente la disposition suivante. Au cercle métallique A, qui réunit les trois branches du trépied P, P, P (fig. 111), sont fixées deux pointes métalliques *a, a'*, placées sur un même diamètre, et dont les extrémités pénètrent dans de petits ombilics pratiqués dans un anneau intérieur B; dans cet anneau B sont fixées deux autres pointes *b, b'*, placées sur un diamètre perpendiculaire au premier, et dont les extrémités pénètrent dans les ombilics pratiqués dans la gaine qui entoure le tube T. — Le baromètre étant ainsi mobile autour de la ligne *aa'*, le centre de gravité se placera également dans le plan vertical passant par *aa'*; il se placera donc sur l'intersection de ces deux plans verticaux; c'est-à-dire sur la verticale menée par le point d'intersection des droites *aa'* et *bb'*.

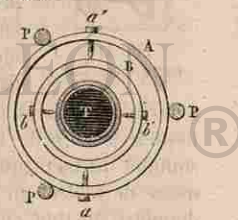


Fig. 111

128. **Baromètre fixe.** — Pour les observations à poste fixe, on emploie la disposition suivante, avec laquelle on obtient toute la précision nécessaire aux recherches scientifiques.



Fig. 112.  
Baromètre fixe.

La cuvette MN (fig. 112) est en fonte et porte une pièce coudée à angle droit, que traverse une vis verticale  $ab$  terminée par deux points. Le tube a un diamètre d'environ 5 centimètres, et est supporté, ainsi que la cuvette, par une planche fixée au mur. — Pour faire une observation, on fait d'abord mouvoir la vis  $ab$  jusqu'à ce que sa pointe inférieure  $a$  vienne toucher la surface du mercure. Il suffit alors de déterminer, au cathétomètre : 1<sup>o</sup> la distance du sommet du ménisque  $C$  à la pointe supérieure  $b$ ; 2<sup>o</sup> la distance des deux pointes; et d'ajouter ces deux distances.

129. **Corrections barométriques.** — Les hauteurs barométriques observées doivent subir, pour devenir comparables entre elles, diverses corrections.

Et d'abord l'action capillaire, qui s'exerce au sommet de la colonne dont le ménisque est convexe (95), a pour effet de diminuer la hauteur que devrait avoir le mercure. On doit donc ajouter, à la hauteur observée, un terme de correction (\*). — Pour obtenir la valeur de ce terme, il est nécessaire de tenir compte, non seulement du diamètre du tube, mais aussi de la forme du ménisque qui peut être variable, dans un même tube, soit à cause des impuretés du mercure, soit en raison des mouvements du sommet de la colonne barométrique. Dans chaque observation, si l'on opère avec un baromètre de Fortin par exemple, on

détermine la hauteur  $mn$  de la flèche du ménisque (fig. 115), en amenant le bord  $h$  de la fenêtre successivement dans le plan tangent au sommet du ménisque et dans le plan du cercle de contact. On fait alors usage de tables qui donnent la correction de capillarité, au moyen du diamètre du tube et de la flèche du ménisque.

On doit, en outre, faire subir aux hauteurs observées une correction de température, en raison des variations qu'éprouve la densité du mercure avec la température elle-même. — On verra plus loin

(\*) La correction de capillarité est négligeable dans les baromètres fixes, dont les tubes ont généralement un diamètre assez considérable. Elle n'est jamais négligeable dans le baromètre de Fortin.

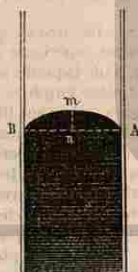


Fig. 115.

(livre II, chapitre IV) comment on calcule ce terme de correction.

Enfin, quand on veut rendre comparables les observations barométriques faites en divers lieux, on doit, en outre, tenir compte de ce que l'intensité de la pesanteur, qui sollicite les colonnes mercurielles, varie d'un lieu à un autre. — C'est là un genre de correction dont le développement excéderait les limites du cadre de cet ouvrage.

150. **Baromètre à siphon.** — Le baromètre à siphon consiste en un tube recourbé ABD (fig. 114), formé de deux branches inégales; la plus grande AB est fermée à la partie supérieure, la plus petite BD est ouverte. On emplit d'abord de mercure la grande branche, en inclinant le tube à diverses reprises; on chasse, par l'ébullition, l'humidité et les bulles d'air restées adhérentes au tube; puis on redresse l'instrument, et on l'amène dans une position verticale. — Le mercure s'abaisse dans la grande branche jusqu'en C, et s'élève dans la petite jusqu'en  $m$ . La distance verticale de ces deux points mesure la pression atmosphérique; en effet, menons par le point  $m$  un plan horizontal  $mn$ ; le liquide  $mbn$  serait en équilibre, si la colonne de mercure BC était supprimée et que les deux branches de tube fussent en communication avec l'atmosphère (76); or, il est encore en équilibre dans le cas actuel, où il supporte en  $m$  la pression de l'atmosphère et en  $n$  la pression de la colonne mercurielle  $nC$ ; ces deux pressions sont donc équivalentes.



Fig. 114.

Pour mesurer la distance verticale des deux niveaux C et  $m$ , on installe entre les deux branches, une échelle divisée en millimètres: le zéro est placé vers le milieu de cette échelle; une graduation ascendante donne la distance  $h$  du zéro au niveau C; une graduation descendante donne la distance  $h'$  du même zéro au niveau  $m$ . La somme  $h + h'$  est la hauteur barométrique cherchée.

L'action capillaire s'exerçant en sens contraire aux deux extrémités  $m$  et C de la colonne mercurielle, Gay-Lussac avait pensé que, si les deux branches du tube avaient le même diamètre, on pourrait négliger l'influence de la capillarité. Mais, d'une part, l'égalité rigoureuse des deux diamètres est difficile à réaliser; d'autre part, il n'arrive presque jamais que les deux ménisques aient la même flèche. — On aurait donc tort de croire que l'emploi de ce baromètre comporte une précision plus grande que celui du baromètre à cuvette.

151. **Baromètre de Gay-Lussac.** — **Perfectionnement de Buntzen.** — On doit à Gay-Lussac un baromètre à siphon, d'un transport facile, et d'un prix moins élevé que celui du baromètre de Fortin. Les deux branches A et E (fig. 115) sont réunies par un tube capillaire D;

une ouverture très fine, pratiquée en *o*, permet à la pression atmosphérique de se transmettre au niveau *m* du mercure. — L'instrument tout entier est enfermé dans une gaine de laiton, qui porte la graduation : deux fentes longitudinales opposées laissent apercevoir les deux ménisques; enfin deux curseurs, semblables à celui du baromètre de Fortin, servent à mesurer les distances *h* et *h'* du zéro aux niveaux du mercure dans les deux branches.

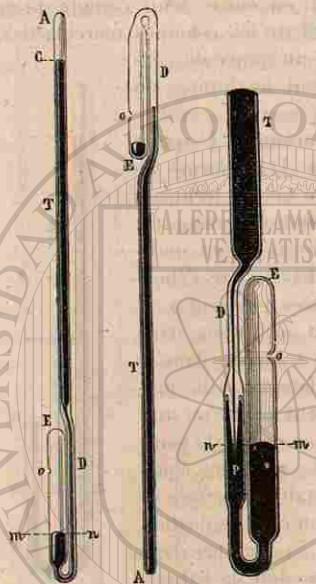


Fig. 115. Fig. 116. Fig. 117.

Pour transporter ce baromètre, on l'amène, en le retournant avec précaution, dans la position de la figure 116, de manière que la grande branche arrive à être entièrement pleine de mercure. Lorsqu'on veut faire une observation, on rétablit le tube dans sa première position. — Dans ces mouvements, la capillarité du tube *D* empêche l'air de diviser la colonne liquide et de s'introduire dans la chambre barométrique.

Pour plus de sûreté encore, le constructeur Buntén, au lieu de souder directement l'extrémité du tube capillaire *D* à la petite branche *E* du baromètre, a imaginé de la terminer en une pointe effilée *P* (fig. 117), et de l'envelopper d'un renflement soufflé dans le tube de verre lui-même. Il est alors impossible qu'une bulle d'air, alors même qu'elle aurait pénétré dans le tube capillaire inférieur, s'introduise par cette pointe et gagne la chambre barométrique; elle va se loger à la partie supérieure du renflement où sa présence n'a aucun inconvénient.

**152. Baromètre à cadran.** — Le baromètre à cadran (fig. 118) est un baromètre à siphon dans lequel, au lieu d'observer sur une échelle divisée les mouvements des niveaux du mercure, on les amplifie par une disposition particulière. — Sur le mercure de la petite branche repose un poids *p*, suspendu par un fil qui passe en *M* sur une poulie et supporte, à son autre extrémité, un contrepoids *p'* un peu moindre que *p*. Une aiguille est fixée sur l'axe de la poulie. Si le mercure baisse en *m*, l'aiguille tourne dans un sens, entraînée par le poids *p*, qui suit le mercure : elle marche en sens contraire quand le niveau en *m* remonte. — Le tube barométrique est masqué par la planche qui porte le cadran : l'axe de la poulie traverse le cadran en son centre, et l'ai-

guille est fixée à l'extrémité antérieure de cet axe. On marque, sur le cadran, en face des positions diverses de l'aiguille, les hauteurs correspondantes de la colonne barométrique. — Cet instrument est très peu sensible, en raison des frottements qui se produisent toujours entre l'axe de la poulie et ses supports.

**153. Baromètres métalliques.** — On construit enfin des baromètres, que l'on désigne sous le nom de *baromètres métalliques*, et dont le jeu est fondé sur l'élasticité des métaux. — La figure 119 représente l'un de ceux qui sont le plus répandus.

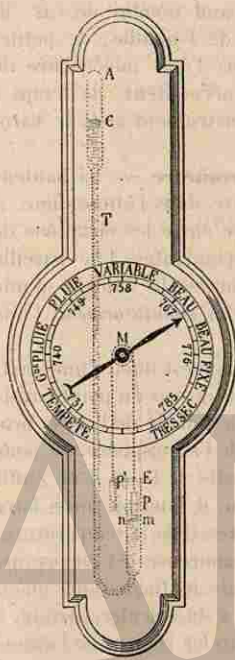


Fig. 118.  
Baromètre à cadran.

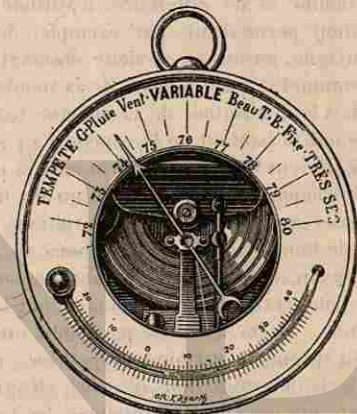


Fig. 119. — Baromètre métallique.

La partie principale de cet instrument est une petite boîte ronde, dont le dessus est formé par une lame métallique mince, qui présente des plis circulaires destinés à augmenter sa flexibilité (on distingue, sur la figure, à peu près la moitié de cette boîte). On a fait le vide dans la boîte, et on l'a fermée ensuite hermétiquement. La pression atmosphérique fait fléchir la lame, comme la membrane dans l'expérience du *creve-vessie* (125), mais ici la lame est assez résistante pour ne pas se briser. — Quand la pression atmosphérique augmente, la lame s'infléchit davantage; elle tend à se redresser quand la pression atmosphérique diminue. Ces mouvements sont transmis à un système d'engrenages, de manière à imprimer des déplacements beaucoup plus grands à une aiguille mobile sur un cadran. — Le constructeur, en comparant les indications de cet instrument avec celles d'un baromètre à mercure, inscrit sur le cadran les hauteurs de la colonne de mercure qui

correspondent aux diverses positions de l'aiguille. — Les baromètres métalliques ont l'avantage d'être peu volumineux et facilement transportables. Cet avantage, joint à leur prix peu élevé, les fait préférer aux baromètres à mercure, dans un grand nombre de cas. Ils accusent, par des mouvements appréciables de l'aiguille, de petites variations de la pression atmosphérique; mais l'état moléculaire du métal éprouve des modifications lentes, qui nécessitent, de temps à autre, une nouvelle comparaison de chaque instrument avec le baromètre à mercure, et un nouveau réglage.

154. **Mesure des hauteurs par le baromètre.** — La hauteur barométrique diminuant à mesure qu'on s'élève dans l'atmosphère, il serait intéressant d'obtenir une relation précise entre les variations de la colonne et les différences d'altitude correspondantes. Une pareille relation permettrait, par exemple, de déterminer la hauteur d'une montagne, au moyen de deux observations faites *simultanément*, l'une au sommet, l'autre au pied de la montagne.

Mais la diminution de la colonne barométrique est due, d'une part, à ce que la hauteur de la couche d'air située au-dessus du point considéré devient moindre; d'autre part, à ce que la densité de l'air va progressivement en décroissant jusqu'aux limites de l'atmosphère. Or, pour calculer avec exactitude les variations de densité de l'air, il ne suffit pas de tenir compte des variations de pression, il faudrait aussi faire intervenir, dans le calcul, un abaissement progressif de la température, que l'observation constate, mais dont la loi rigoureuse est encore inconnue. — On n'a donc pu établir une formule mathématique qu'en ayant recours à certaines hypothèses, et l'on a dû calculer ensuite, à l'aide de déterminations directes, effectuées dans les régions de l'atmosphère qui nous sont accessibles, les valeurs des coefficients que cette formule contient.

La formule la plus précise est celle qui est due à Laplace :

$$X = 18595^m (1 + 0,002837 \cos 2\lambda) \left[ 1 + \frac{2(T+t)}{1000} \right] \log \frac{H}{h};$$

X représente la hauteur cherchée,  $\lambda$  la latitude du lieu, T et H la température et la pression au pied de la montagne, t et h la température et la pression au sommet.

Quand la hauteur X ne dépasse pas 1000 ou 1200 mètres, on peut employer la formule plus simple, donnée par Babinet :

$$X = 16000^m \left[ 1 + \frac{2(T+t)}{1000} \right] \frac{H-h}{H+h} (*).$$

(\*) Voir, à la fin du volume (livre VI, *Météorologie*), ce qui concerne les variations barométriques en un même lieu ou aux divers points du globe.

## CHAPITRE V

### FORCE ÉLASTIQUE DES GAZ

#### I. — LOI DE MARIOTTE.

155. — La force élastique d'un gaz augmente à mesure que son volume diminue: c'est ce que montre l'expérience du *briquet à air* (29). Mais cet appareil ne permet d'évaluer, ni les volumes successifs du gaz, ni les pressions qu'il supporte. On a dû recourir à d'autres expériences, pour obtenir une relation précise entre ces quantités.

Remarquons d'abord que, lorsque le volume d'une masse gazeuse demeure constant, la force élastique de ce gaz est égale à la pression qu'il supporte: les deux expressions *force élastique du gaz* et *pression supportée par le gaz* peuvent donc être prises l'une pour l'autre.

156. **Loi de Mariotte.** — *A une même température, les volumes d'une même masse gazeuse sont inversement proportionnels aux pressions qu'elle supporte (\*).*

Nous allons vérifier cette loi, au moins approximativement, pour l'air en particulier, au moyen de deux séries d'expériences.

1° Le *tube de Mariotte* est un tube de verre (fig. 120) formé de deux branches inégales; la plus grande B est ouverte, la plus petite A est fermée à sa partie supérieure. — On verse du mercure dans le tube, de manière à enfermer dans la branche A une certaine quantité d'air, et on commence par faire en sorte que les surfaces du mercure M et M' dans les deux branches soient dans un même plan horizontal, comme le représente la figure 121 (c'est ce à quoi on parvient facilement, en

(\*) Cette loi a été énoncée simultanément, vers 1670, en France par l'abbé Mariotte, et en Angleterre par Boyle.

correspondent aux diverses positions de l'aiguille. — Les baromètres métalliques ont l'avantage d'être peu volumineux et facilement transportables. Cet avantage, joint à leur prix peu élevé, les fait préférer aux baromètres à mercure, dans un grand nombre de cas. Ils accusent, par des mouvements appréciables de l'aiguille, de petites variations de la pression atmosphérique; mais l'état moléculaire du métal éprouve des modifications lentes, qui nécessitent, de temps à autre, une nouvelle comparaison de chaque instrument avec le baromètre à mercure, et un nouveau réglage.

154. **Mesure des hauteurs par le baromètre.** — La hauteur barométrique diminuant à mesure qu'on s'élève dans l'atmosphère, il serait intéressant d'obtenir une relation précise entre les variations de la colonne et les différences d'altitude correspondantes. Une pareille relation permettrait, par exemple, de déterminer la hauteur d'une montagne, au moyen de deux observations faites *simultanément*, l'une au sommet, l'autre au pied de la montagne.

Mais la diminution de la colonne barométrique est due, d'une part, à ce que la hauteur de la couche d'air située au-dessus du point considéré devient moindre; d'autre part, à ce que la densité de l'air va progressivement en décroissant jusqu'aux limites de l'atmosphère. Or, pour calculer avec exactitude les variations de densité de l'air, il ne suffit pas de tenir compte des variations de pression, il faudrait aussi faire intervenir, dans le calcul, un abaissement progressif de la température, que l'observation constate, mais dont la loi rigoureuse est encore inconnue. — On n'a donc pu établir une formule mathématique qu'en ayant recours à certaines hypothèses, et l'on a dû calculer ensuite, à l'aide de déterminations directes, effectuées dans les régions de l'atmosphère qui nous sont accessibles, les valeurs des coefficients que cette formule contient.

La formule la plus précise est celle qui est due à Laplace :

$$X = 18595^m (1 + 0,002837 \cos 2\lambda) \left[ 1 + \frac{2(T+t)}{1000} \right] \log \frac{H}{h};$$

X représente la hauteur cherchée,  $\lambda$  la latitude du lieu, T et H la température et la pression au pied de la montagne, t et h la température et la pression au sommet.

Quand la hauteur X ne dépasse pas 1000 ou 1200 mètres, on peut employer la formule plus simple, donnée par Babinet :

$$X = 16000^m \left[ 1 + \frac{2(T+t)}{1000} \right] \frac{H-h}{H+h} (*).$$

(\*) Voir, à la fin du volume (livre VI, *Météorologie*), ce qui concerne les variations barométriques en un même lieu ou aux divers points du globe.

## CHAPITRE V

### FORCE ÉLASTIQUE DES GAZ

#### I. — LOI DE MARIOTTE.

155. — La force élastique d'un gaz augmente à mesure que son volume diminue: c'est ce que montre l'expérience du *briquet à air* (29). Mais cet appareil ne permet d'évaluer, ni les volumes successifs du gaz, ni les pressions qu'il supporte. On a dû recourir à d'autres expériences, pour obtenir une relation précise entre ces quantités.

Remarquons d'abord que, lorsque le volume d'une masse gazeuse demeure constant, la force élastique de ce gaz est égale à la pression qu'il supporte: les deux expressions *force élastique du gaz* et *pression supportée par le gaz* peuvent donc être prises l'une pour l'autre.

156. **Loi de Mariotte.** — *A une même température, les volumes d'une même masse gazeuse sont inversement proportionnels aux pressions qu'elle supporte (\*).*

Nous allons vérifier cette loi, au moins approximativement, pour l'air en particulier, au moyen de deux séries d'expériences.

1° Le *tube de Mariotte* est un tube de verre (fig. 120) formé de deux branches inégales; la plus grande B est ouverte, la plus petite A est fermée à sa partie supérieure. — On verse du mercure dans le tube, de manière à enfermer dans la branche A une certaine quantité d'air, et on commence par faire en sorte que les surfaces du mercure M et M' dans les deux branches soient dans un même plan horizontal, comme le représente la figure 121 (c'est ce à quoi on parvient facilement, en

(\*) Cette loi a été énoncée simultanément, vers 1670, en France par l'abbé Mariotte, et en Angleterre par Boyle.

inclinant le tube de manière à laisser sortir un peu de l'air que contenait la petite branche). Lorsque ce résultat est obtenu, le volume de l'air AM peut se mesurer au moyen de divisions marquées sur la planche qui soutient le tube : supposons que ce volume corresponde, par exem-



Fig. 120. — Tube de Mariotte.

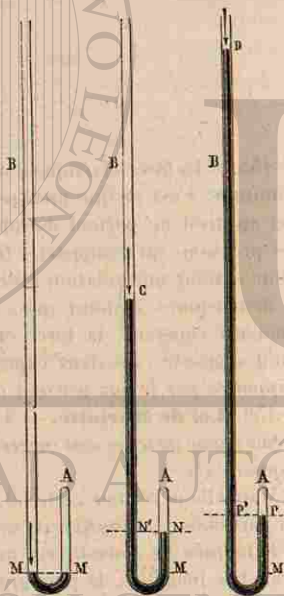


Fig. 121.

Fig. 122.

Fig. 125.

ple, à 20 divisions. Quant à la force élastique de l'air, elle est égale à la pression atmosphérique, qui s'exerce en M dans le même plan horizontal. — On ajoute alors du mercure dans la branche B, de façon que le liquide, en s'élevant en A, comprime l'air et réduise son volume à moitié (fig. 122), c'est-à-dire à 10 divisions. Si la loi de Mariotte est

vraie, la force élastique de cet air doit alors être égale au double de la pression atmosphérique; or, cette force élastique, qui s'exerce en N, fait équilibre à la pression qui s'exerce en N' sur le même plan horizontal, c'est-à-dire à la pression de la colonne de mercure N'C, plus la pression atmosphérique exercée en C; donc la colonne N'C doit avoir une hauteur égale à la hauteur barométrique, c'est-à-dire à environ 76 centimètres; c'est ce que l'observation vérifie. — Si le tube B a une longueur suffisante, on pourra réduire le volume de l'air au tiers AP du volume initial (fig. 125), et constater que sa force élastique devient alors triple de la pression atmosphérique, c'est-à-dire que la hauteur P'D du mercure au-dessus du niveau P est égale à deux fois la hauteur barométrique; et ainsi de suite.

2° Une autre disposition, due également à Mariotte, permet encore de vérifier la loi, en enfermant de l'air sous la pression atmosphérique et augmentant son volume. — On prend un tube de verre cylindrique P (fig. 124), semblable à un tube de baromètre, et, au lieu de l'emplir complètement de mercure, on y laisse un certain espace plein d'air; on bouche avec le doigt l'extrémité ouverte, et on la plonge dans une cuvette profonde à mercure M, formée d'une cuvette de verre fixée à la partie supérieure d'un tube de fer vertical. — On enfonce d'abord le tube (fig. 125), de manière que les surfaces du mercure dans ce tube et dans la cuvette soient dans un même plan horizontal. On mesure le volume de l'air, en mesurant la longueur AM qu'il occupe dans le tube; quant à sa force élastique, elle est égale à la pression

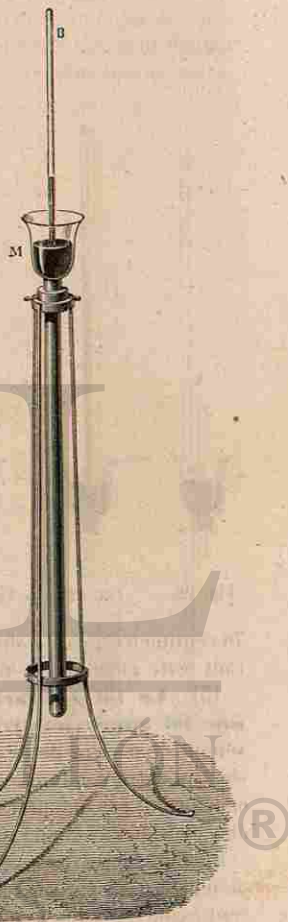


Fig. 124.

atmosphérique. — On soulève ensuite le tube, jusqu'à ce que le volume occupé par l'air devienne *double* de ce qu'il était; en même temps, on voit le mercure s'élever dans le tube (fig. 126). Or, si la loi de Mariotte est exacte, la force élastique de cet air doit alors être égale à la moitié de la pression atmosphérique; mais cette force élastique, ajoutée à la pression de la colonne de mercure soulevée MN, doit exercer, au niveau M du mercure extérieur, une pression égale à la pression atmosphérique; donc la colonne soulevée MN doit être égale à la moitié de 76 centimètres environ, ou à 38 centimètres. C'est ce qu'on vérifie en mesurant cette colonne. — On soulève encore le tube, jusqu'à ce que le volume AP de l'air devienne *triple* du volume initial (fig. 127). Si la loi de Mariotte est exacte, sa force élastique doit être alors le tiers de la pression atmosphérique; cette force élastique, ajoutée à la pression de la colonne soulevée MP, doit produire, au niveau du mercure extérieur M, une pression égale à la pression atmosphérique: la colonne soulevée MP doit donc avoir une hauteur égale aux deux tiers de

Fig. 125. Fig. 126. Fig. 127.

76 centimètres, c'est-à-dire 50,7. C'est ce qu'on vérifie encore en mesurant cette colonne; et ainsi de suite.

137. **La loi de Mariotte ne doit être considérée que comme une loi approximative.** — Les expériences comme celles que nous venons de décrire ne permettent de faire varier le volume et la pression qu'entre des limites très restreintes. En outre, les mesures ne comportent pas une précision suffisante pour que les résultats puissent être considérés comme une vérification *rigoureuse* de la loi de Mariotte.

En 1825, des expériences de Faraday, effectuées spécialement en vue de liquéfier les gaz sous l'influence de pressions considérables, amenèrent à concevoir des doutes sur l'exactitude absolue de la loi de Mariotte. — Quelques années après, les expériences d'Erstedt à Copenhague, et celles de Despretz et de Pouillet à Paris, montrèrent que des gaz de natures diverses, placés dans des tubes disposés à côté les uns des autres, et soumis simultanément aux mêmes variations de pression, éprouvent des variations de volume sensiblement différentes. — La loi

de Mariotte ne pouvait donc pas être exacte pour tous les gaz; il était même possible qu'elle ne fût rigoureusement applicable à aucun d'eux.

Dès lors, il devenait nécessaire de reprendre la question, par des expériences permettant des mesures précises.

158. **Principe de la méthode de Dulong et Arago.** — Les expériences de Dulong et Arago portèrent exclusivement sur la loi de compressibilité *de l'air*. — Leur appareil, dont la figure 128 peut donner une idée, n'était autre qu'un tube de Mariotte, de dimensions colossales, afin de pouvoir opérer sur des pressions considérables.

La grande branche NS était formée par une suite de treize tubes de cristal, de 2 mètres chacun, qui étaient appliqués sur des poutres dressées dans la vieille tour carrée du lycée Henri IV; la petite branche AT était formée par un seul tube, fermé à son extrémité supérieure, et environné d'un manchon parcouru incessamment par un courant d'eau froide, pour maintenir constante la température de l'air qu'il contenait, malgré la chaleur dégagée par la compression. Ces deux branches verticales étaient mastiquées dans un conduit horizontal de fonte MN. Au lieu d'introduire le mercure par la partie supérieure de la grande branche, ce qui aurait produit des ébranlements capables de compromettre la solidité de l'appareil, on avait disposé, entre les deux branches, un réservoir R contenant une quantité de mercure assez considérable: lorsqu'on voulait faire varier la pression, on refoulait progressivement ce liquide en comprimant, à sa surface *ab*, de l'eau que la petite pompe P puisait, par le tube *t*, dans un réservoir voisin.

Il est aisé de voir que le défaut principal de cette méthode était de présenter, dans la mesure des volumes successifs de l'air, une *sensibilité décroissante*. — En effet, soit TA le volume occupé par l'air sous la pression atmosphérique; supposons, pour plus de simplicité, que le

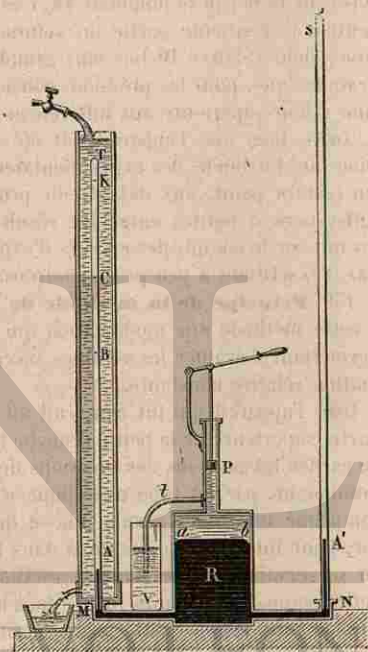


Fig. 128. — Appareil de Dulong et Arago.



tube soit rigoureusement cylindrique, et qu'il ait une longueur de 2 mètres au-dessus du point A. La loi de Mariotte étant au moins une loi approchée, lorsque la pression acquiert des valeurs successives de 2, 5, 5, 10, 20 atmosphères, le gaz doit occuper des longueurs de tube représentées approximativement par  $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{1}{5}$ ,  $\frac{1}{5}$ ,  $\frac{1}{10}$ ,  $\frac{1}{20}$  de AT. Or, dans l'évaluation de la première longueur BT, égale à environ 1 mètre, une erreur de lecture d'un millimètre représente seulement un millième du volume du gaz; la même erreur absolue d'un millimètre, commise sur la dernière longueur TK, c'est-à-dire sur un décimètre, représentera la centième partie du volume actuel du gaz; elle aura donc une valeur relative 10 fois plus grande que la précédente, et il est à craindre que, pour les pressions considérables, ces erreurs n'atteignent une valeur supérieure aux différences qu'on devrait constater.

Aussi, bien que l'appareil eût été construit avec un soin extrême, bien que l'habileté des expérimentateurs pût même suppléer, jusqu'à un certain point, aux défauts du procédé, on trouva, pour l'air, des différences si petites entre les résultats obtenus et la théorie, qu'on les mit sur le compte des erreurs d'expériences, et l'on admit, pour ce gaz, l'exactitude à peu près rigoureuse de la loi de Mariotte.

159. **Principe de la méthode de Regnault.** — Regnault apporta à cette méthode une modification qui en fit une méthode nouvelle, en permettant d'évaluer les volumes successifs du gaz avec une approximation relative constante.

Dans l'appareil qui fut construit au Collège de France (fig. 129), la partie supérieure de la petite branche fut munie d'un robinet *r*, capable de garder les gaz sous des pressions de plusieurs atmosphères, et communiquant, par un tube métallique *o'* avec un réservoir où l'on avait comprimé une assez grande masse du gaz sur lequel on devait opérer. Pour introduire le mercure dans les deux branches de l'appareil, on se servait, comme dans la méthode de Dulong et Arago, d'une petite pompe P, qui comprimait, dans le cylindre C, l'eau qu'elle puisait dans le vase V; mais cette pompe était placée sur le côté de l'appareil; aussitôt qu'on l'avait fait fonctionner, on fermait le gros robinet R, afin d'intercepter la communication et de maintenir les niveaux bien constants dans les deux tubes pendant l'observation.

Voici maintenant en quoi consiste surtout la supériorité de la méthode. Deux traits *a* et *b* étaient marqués sur la petite branche; le volume intérieur compris entre eux avait été exactement mesuré; il était sensiblement égal à la moitié du volume compris entre le trait *a* et le robinet *r*. Pour faire une expérience, on introduisait d'abord du gaz par le robinet *r*, jusqu'à ce que le niveau du mercure descendit au point *a*, et on mesurait la pression de ce gaz, au moyen de la différence de hauteur du mercure dans les deux branches, et de la hauteur barométrique au moment de l'observation. On ouvrait alors le robinet

inférieur R, on faisait fonctionner la pompe à eau P, de manière à refouler le mercure dans la petite branche jusqu'en *b*, c'est-à-dire à réduire le volume à moitié; on fermait R, et on déterminait la nouvelle pression. S'il y avait une différence entre la pression ainsi mesurée et celle qu'aurait donnée la loi de Mariotte, on en connaissait le sens et la grandeur. — Pour opérer sous une pression plus grande, on ouvrait le robinet *r*, et on laissait entrer dans le tube une nouvelle quantité de gaz, de façon que le niveau du mercure revint en *a*: après avoir déterminé la pression, on ouvrait R et l'on comprimait encore le gaz jusqu'à ce que le niveau revint en *b*; on mesurait la nouvelle pression acquise par cette masse de gaz, et on la comparait encore avec celle qu'aurait fournie la loi de Mariotte. On continua ainsi jusqu'aux pressions les plus considérables que permit d'atteindre la longueur de la grande branche. — On voit que, dans chacune des expériences, la masse gazeuse introduite dans le tube éprouvait toujours une même réduction de volume, et la mesure des pressions permettait de soumettre la loi de Mariotte à une série de vérifications dont la précision restait constante (\*).

Les expériences effectuées avec cet appareil conduisirent Regnault à cette conclusion, que, jusqu'à 50 atmosphères, l'air, l'azote et l'acide carbonique s'écartent de la loi de Mariotte dans le même sens: sous des pressions croissantes, leur volume éprouve des *diminutions plus grandes* que cette loi ne l'in-

(\*) Il eût été difficile de ramener toujours *exactement*, dans les expériences successives, les niveaux du mercure aux traits *a* ou *b*. On avait marqué sur le tube, au voisinage de chacun d'eux, un certain nombre de traits successifs, et l'on avait déterminé, par un jaugeage au mercure, les volumes intérieurs correspondants aux intervalles des traits consécutifs. On pouvait donc se contenter d'amener le mercure au voisinage des traits *a* ou *b*; on connaissait toujours, avec une exactitude sensiblement constante, le volume occupé par le gaz à chaque nouvelle détermination.

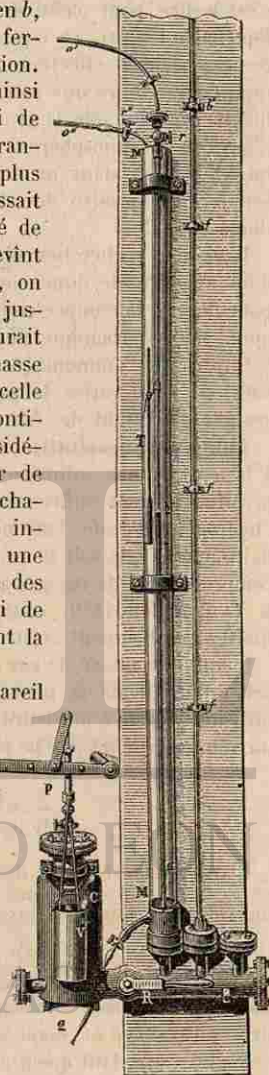


Fig. 129. — Appareil de Regnault.

dique (\*). L'écart est surtout considérable pour l'acide carbonique, c'est-à-dire pour celui de ces trois gaz qui est le plus facilement liquéfiable : ainsi, en combinant entre eux les résultats obtenus dans des expériences effectuées sous des pressions croissantes, on trouve que, pour réduire une même masse d'acide carbonique à  $\frac{1}{10}$  du volume qu'elle occupait sous la pression atmosphérique, il suffit d'une pression d'environ 15 atmosphères. — Au contraire, l'hydrogène s'écarte de la loi de Mariotte dans un sens opposé; pour des pressions croissantes, son volume éprouve des diminutions un peu moindres que ne l'indique la loi.

Dans des recherches ultérieures, Regnault a même pu faire usage d'un appareil de dimensions beaucoup moindres que le précédent, pour étudier la compressibilité de certains gaz, beaucoup plus voisins que l'acide carbonique de leur point de liquéfaction, comme l'acide sulfhydrique, l'ammoniaque, l'acide sulfureux, etc. Il a constaté qu'il suffit de faire varier la pression entre 1 et 2 atmosphères, pour que ces gaz présentent des écarts sensibles par rapport à la loi de Mariotte.

**140. Compressibilité des gaz sous de fortes pressions.** — A la température ordinaire, la plupart des gaz se liquéfient lorsque la pression devient suffisamment grande. Seuls, quelques gaz tels que l'hydrogène, l'azote, l'air ne se liquéfient pas à la température ordinaire, quelle que soit la pression qu'on leur fasse supporter. La loi de compressibilité de ces gaz a été étudiée par Natterer en 1850, puis par M. Cailletet en 1870, sous des pressions dépassant de beaucoup les limites que Regnault avait pu atteindre.

Quand une masse de gaz occupe un volume  $v_0$  sous une pression  $p_0$  peu différente de la pression atmosphérique, si on le soumet à une pression  $p$  égale à plusieurs atmosphères, la loi de Mariotte lui assigne un volume  $v$  défini par la relation :

$$\frac{v}{v_0} \frac{p_0}{p}, \quad \text{ou} \quad v = \frac{v_0 p_0}{p}.$$

L'hydrogène, soumis à des pressions  $p$  de plus en plus grandes, prend un volume  $v$  toujours plus grand que le volume théorique  $\frac{v_0 p_0}{p}$ ; c'est-

à-dire que l'expression  $\frac{vp}{v_0 p_0}$  est plus grande que l'unité; on constate même qu'elle croît à mesure que  $p$  augmente. On peut dire que l'hydrogène *résiste à la compression*, et y résiste de plus en plus.

Pour l'azote, tant que  $p$  croît depuis 1 atmosphère jusqu'à 75 atmosphères, le volume réel est plus petit que le volume théorique : l'expres-

(\*) On n'opéra pas sur l'oxygène pur, parce que ce gaz est absorbé par le mercure dès que la pression devient un peu considérable.

sion  $\frac{vp}{v_0 p_0}$ , plus petite que l'unité, va en diminuant; à partir de 75 atmosphères elle augmente, repasse par l'unité pour une pression de 125 atmosphères (c'est-à-dire que, sous cette pression, le gaz prend un volume conforme à la loi de Mariotte); elle acquiert ensuite des valeurs supérieures à l'unité et assez rapidement croissantes. — Donc jusqu'à 75 atmosphères, l'azote se comporte comme un gaz liquéfiable, il est *de plus en plus compressible*; mais à partir de 75 atmosphères, il *résiste à la compression*: on constate même que, pour des pressions de 1500 atmosphères, il résiste plus que l'hydrogène.

**141. Autre énoncé de la loi de Mariotte.** — Si l'on fait abstraction des cas exceptionnels que nous venons d'indiquer, on peut dire que la loi reste, en général, *suffisamment approchée* pour permettre de calculer les variations de volume que doit éprouver un gaz sous des variations de pression peu considérables, à la condition que ce gaz reste suffisamment éloigné de son point de liquéfaction.

Si  $V$  est le volume d'une masse de gaz sous la pression  $P$ , et  $V'$  le volume correspondant à une autre pression  $P'$ , la loi de Mariotte s'exprime par la formule

$$\frac{V}{V'} = \frac{P'}{P},$$

formule qui peut s'écrire, en chassant les dénominateurs,

$$(1) \quad VP = V'P'.$$

Or,  $P'$  désignant ici une pression quelconque, il est clair que si  $P''$  est une troisième pression et  $V''$  le volume correspondant, on aura encore  $VP = V''P''$ , et ainsi de suite; en sorte qu'on peut écrire :

$$VP = V'P' = V''P'' = \dots$$

c'est-à-dire que, à une même température, le produit du volume d'une masse gazeuse par la pression correspondante est constant.

**142. Évaluation du volume d'une masse gazeuse sous la pression normale.** — Lorsque, pour comparer entre elles diverses quantités de gaz, on mesure les volumes qu'elles occupent, les résultats ne sont évidemment comparables qu'autant que les mesures ont été effectuées *sous la même pression*, pour chacun de ces gaz. — Or dans la plupart des cas, on ne peut pas disposer à volonté des pressions; mais, si les pressions des divers gaz sont connues, on peut calculer, en appliquant la loi de Mariotte, le volume que chacun d'eux occuperait sous la pression de 76 centimètres, qu'on désigne sous le nom de *pression normale*.

Soit, par exemple, un gaz contenu dans une éprouvette graduée

en parties d'égales capacités, et placée sur le mercure; supposons d'abord que le niveau du mercure dans l'éprouvette soit le même qu'à l'extérieur. La graduation donnera le volume  $V$  du gaz, sous la pression de l'atmosphère  $H$ , fournie par l'observation du baromètre au même instant. Dès lors le volume  $V'$  que le gaz occuperait sous la pression normale sera donné par la formule

$$V' = V \frac{H}{76}$$



Fig. 130.

Supposons maintenant que le niveau dans l'éprouvette soit au-dessus du niveau extérieur (fig. 130); la force élastique du gaz est égale à la hauteur barométrique  $H$ , diminuée de la différence  $h$  des niveaux. Connaissant donc, au moyen de la graduation de l'éprouvette, le volume  $V$  du gaz sous la pression  $H - h$ , on en déduira son volume  $V'$  sous la pression normale, au moyen de la formule

$$V' = V \frac{H - h}{76}$$

Ces exemples suffisent pour faire concevoir la manière d'opérer, dans les divers cas qui pourront se présenter.

## II. — MESURE DE LA FORCE ÉLASTIQUE DES GAZ. — MANOMÈTRES.

145. **Manomètres en général.** — On donne le nom général de *manomètres*, à des instruments destinés à mesurer les forces élastiques des gaz ou des vapeurs, contenus dans des espaces quelconques. — Les uns sont destinés aux usages industriels, et ne doivent fournir que des évaluations approximatives, comme celles qui peuvent permettre au chauffeur d'une chaudière de pousser ou de ralentir le feu, de manière que la force élastique de la vapeur se maintienne toujours entre des limites déterminées. — Les autres sont destinés à des expériences précises.

D'après ce que nous avons vu (121), quand la hauteur barométrique est  $75^{\text{cm}},5$ , la pression de l'atmosphère sur 1 centimètre carré est égale à 1 kilogramme; pour des hauteurs barométriques peu différentes, on peut considérer encore la pression, par centimètre carré, comme exprimée approximativement par 1 kilogramme. — Les manomètres destinés aux usages industriels sont gradués de façon à indiquer les pressions en kilogrammes. Lorsqu'un manomètre, adapté à une chaudière à vapeur, marque 10 kilogrammes, cela signifie que chaque centimètre carré de la paroi supporte une pression de 10 kilogrammes, de dedans en dehors;

si l'on remarque que la paroi supporte extérieurement la pression de l'atmosphère, équivalente à 1 kilogramme environ, on voit que la force résultante, celle qui tendrait à produire la rupture, est alors de 9 kilogrammes par centimètre carré. La résistance de chaque chaudière a été évaluée par des essais préliminaires: l'observation du manomètre permet de faire en sorte que la pression reste toujours inférieure à celle qui a été atteinte dans ces essais.

144. **Manomètre à air libre.** — Le manomètre à air libre le plus simple consiste en un tube de verre MN (fig. 131), ouvert à ses deux extrémités et plongeant dans une cuvette à mercure A, placée dans un cylindre métallique B; le tube est mastiqué solidement en C: la vapeur, arrivant dans le cylindre par le robinet B, fait monter le mercure dans le tube. Cet appareil n'étant pas destiné à des évaluations précises, on suppose le niveau du mercure invariable dans la cuvette. — Si le niveau dans le tube est sur le même plan horizontal que dans la cuvette, la pression dans la chaudière est égale à la pression atmosphérique, ou à 1 kilogramme environ par centimètre carré; lorsque la pression dans la chaudière devient 2 kilogrammes, le mercure monte de  $75^{\text{cm}},5$  dans le tube; si la pression devient 3 kilogrammes, la hauteur du mercure devient égale à  $75^{\text{cm}},5 \times 2$ ; et ainsi de suite. On peut donc marquer 2, 3, ... kilogrammes, sur la planche qui supporte le tube, à des distances du niveau du mercure dans la cuvette égales à  $75^{\text{cm}},5$ , à  $75^{\text{cm}},5 \times 2$ .... En subdivisant ensuite chacun de ces intervalles, on peut évaluer les fractions du kilogramme.

Fig. 131.  
Manomètre à air libre.Fig. 132.  
Manomètre à air comprimé.

145. **Manomètres à air comprimé.** — Le manomètre à air comprimé (fig. 132) diffère du précédent en ce que le tube de verre est plus court, et fermé à sa partie supérieure M. L'air enfermé dans ce tube se comprime quand le mercure monte: pour évaluer la pression qui s'exerce en A, il faut ajouter, à la pression de la colonne de mercure, la force élastique de cet air, qui varie en raison inverse de son volume. On voit donc que la pression de 2 atmosphères doit être indiquée à une distance du sommet M un peu plus grande que la moitié de MA; celle de

5 atmosphères, à une distance un peu plus grande que le tiers de MA, et ainsi de suite. Les constructeurs déterminent généralement la position des points de division en comparant les indications de l'instrument à celles d'un manomètre à air libre (\*).

Le principal avantage de cet instrument est de n'avoir qu'une petite hauteur, et d'être, par suite, plus facilement transportable que le manomètre à air libre. Mais les chiffres qui marquent les pressions un peu grandes, 8, 9, 10..., arrivent à être tellement voisins les uns des autres, qu'une petite erreur dans l'observation du niveau du mercure correspond à une erreur considérable dans l'évaluation de la pression. — En outre, l'oxydation du mercure, qui se produit au contact de l'air comprimé, a pour effet de salir le tube et de rendre les indications peu précises.

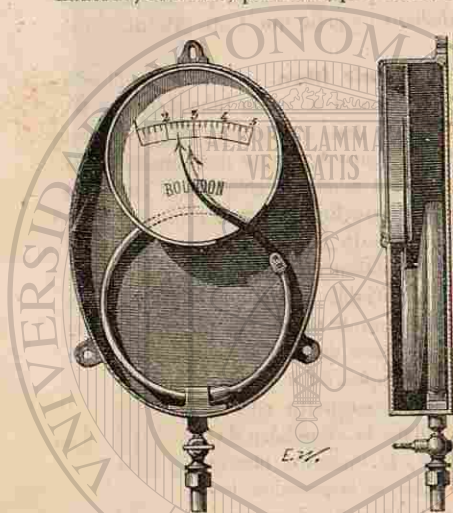


Fig. 153. — Manomètre métallique.

Fig. 154.

à haute pression, des manomètres dont le jeu repose sur l'élasticité des métaux.

Le manomètre de Bourdon (fig. 153 et 154) se compose d'un tube

(\*) Les points de division peuvent être déterminés par le calcul, en supposant que le tube soit bien cylindrique à l'intérieur, de sorte qu'on puisse représenter les volumes de l'air par les longueurs qu'il occupe. — Soit  $l$  la longueur du tube, depuis le sommet M jusqu'au niveau du mercure dans la cuvette, niveau que nous supposons invariable; soit  $x$  la longueur du tube qui est occupée par l'air, pour une valeur  $H$  de la pression. Cet air occupait un volume représenté par  $l$  sous la pression atmosphérique  $h$ ; il occupe un volume représenté par  $x$  sous la pression  $H - (l - x)$ ; on a donc, d'après la loi de Mariotte :

$$\frac{x}{l} = \frac{h}{H - l + x},$$

ce qui donne l'équation

$$x^2 + x(H - l) - lh = 0$$

$$x = -\frac{H - l}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{H - l}{2}\right)^2 + lh}.$$

Ces deux valeurs de  $x$  sont réelles, mais celle qui correspond au signe — du radical

métallique à paroi mince et à section elliptique. Ce tube est enroulé en spirale, comme le montre la figure 154 : l'une de ses extrémités communique avec la chaudière, au moyen d'un robinet; son autre extrémité est libre, et fermée par une pièce métallique qui porte une aiguille, comme le montre la figure 153. Lorsque la pression intérieure augmente, la spirale tend à s'ouvrir, et l'extrémité libre du tube entraîne l'aiguille sur un cadran divisé, où les pressions sont marquées en kilogrammes. La graduation est faite par comparaison avec un manomètre déjà construit.

147. **Manomètres de Regnault.** — On doit à Regnault diverses dispositions qui permettent de mesurer les pressions des gaz, dans les recherches précises, avec une grande exactitude.

Nous rappellerons d'abord l'emploi du grand tube ouvert L (fig. 129) dans l'étude de la loi de Mariotte; il a permis, comme on l'a vu, de mesurer, avec une précision constante, des pressions qui ont atteint 50 atmosphères. — Pour mesurer des pressions comprises entre 1 et 5 atmosphères, Regnault a fréquemment employé le manomètre à air libre représenté par la figure 155. Le tube CA est mis en communication avec l'enceinte qui contient le gaz ou la vapeur soumis à l'expérience; le tube DF s'ouvre dans l'atmosphère. La différence  $h$  des niveaux du mercure dans les deux tubes,

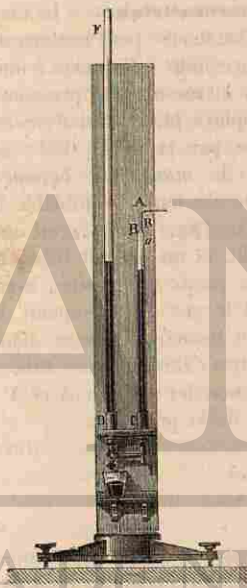


Fig. 155.

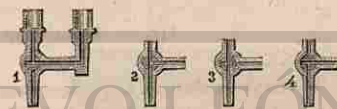


Fig. 156.

mesurée au cathétomètre, donne, avec l'observation de la hauteur barométrique  $H$ , la pression  $H + h$  dans l'enceinte.

Pour la commodité des manipulations, la pièce de fer dans laquelle est négative, et ne peut pas convenir; le signe + doit donc seul être conservé. En prenant successivement pour valeurs de  $H$  les multiples de 75<sup>mm</sup>, on saura à quelles distances de M on devra marquer les pressions successives, en kilogrammes.

On pourrait encore tenir compte de l'abaissement du mercure dans la cuvette, étant donné le rapport du diamètre de la cuvette à celui du tube; nous laisserons au lecteur le soin de résoudre cette question, qui n'offre aucune difficulté, et qui conduit, en prenant la même inconnue, à une équation semblable.

Les deux tubes sont mastiqués présente un robinet à trois voies, qui, par les quatre positions indiquées par la figure 156 permet, à volonté, d'établir la communication entre les deux tubes (position 1), ou de faire écouler le mercure des deux tubes à la fois (position 2), ou de le faire écouler seulement du tube de gauche ou du tube de droite (position 3 ou position 4). — On voit enfin que, si ce robinet est tourné à 45 degrés de l'une de ces quatre positions, les trois voies sont fermées, et il intercepte toute communication.



Fig. 137.

Manomètre barométrique.

effectuée au cathétomètre, donne la valeur de la pression.

## III. — MÉLANGES DES GAZ.

**149. Diffusion des gaz.** — Les divers liquides ne peuvent pas toujours se mélanger entre eux. Si l'alcool et l'eau, par exemple, tendent à se mêler intimement, l'eau et le mercure ne peuvent se pénétrer de la même façon : lorsqu'on cherche à effectuer le mélange par l'agitation, le mercure suspendu d'abord en gouttelettes au milieu de l'eau, se rassemble par le repos à la partie inférieure, de manière que la surface de séparation des deux liquides arrive toujours à être nettement déterminée. — Il n'en est pas de même des gaz. Deux gaz, mis en présence l'un de l'autre, tendent toujours à se mélanger, alors même qu'ils seraient, à l'origine, superposés de façon que leur différence de densité tendit à les maintenir séparés.

C'est ce que montre l'expérience suivante, qui est due à Berthollet. — On plaça dans les caves de l'Observatoire, c'est-à-dire dans un lieu

à température constante, deux ballons à robinet (fig. 158), vissés l'un au-dessus de l'autre : le ballon supérieur contenait de l'hydrogène; le ballon inférieur, de l'acide carbonique, dont la densité est vingt-deux fois plus grande; chacun des gaz avait été introduit sous une pression exactement égale à la pression atmosphérique. Les robinets ayant été ouverts, le mélange s'effectua de façon que, au bout d'un temps suffisant, chacun des deux ballons contient les deux gaz en proportions sensiblement égales. — Donc, quand deux gaz sont mis en présence, la force élastique de chacun d'eux a toujours pour résultat de lui faire occuper la capacité totale de l'enveloppe, sans que la présence de l'autre gaz soit un obstacle à cette expansion. Cette pénétration des gaz les uns par les autres a reçu le nom de *diffusion* (\*).

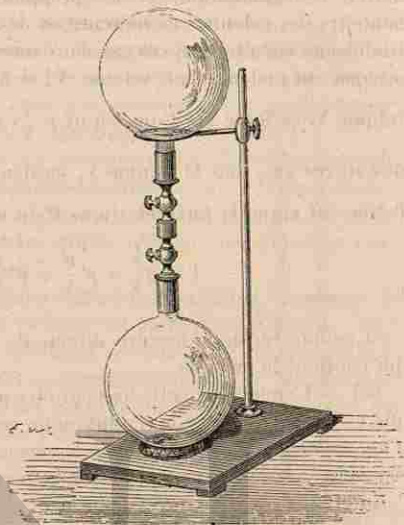


Fig. 158. — Expérience de Berthollet.

Ces phénomènes expliquent comment les odeurs dues à des gaz ou à des vapeurs se répandent dans l'air avec tant de rapidité. — Ils permettent aussi de concevoir comment les vapeurs d'un liquide volatil peuvent se former dans un espace occupé déjà par un gaz, à peu près comme elles le feraient dans un espace vide.

**150. Loi du mélange des gaz.** — Dans un mélange de plusieurs gaz, la force élastique est égale à la somme des forces élastiques de tous les gaz, considérés chacun comme occupant le volume du mélange tout entier. — Cette loi, énoncée vers 1805 par Dalton, peut se démontrer de la manière suivante :

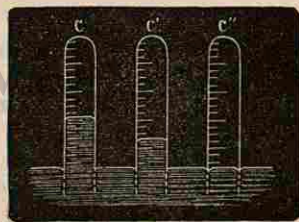


Fig. 159.

Plaçons sur le mercure plusieurs éprouvettes C, C', C''... (fig. 159),

(\*) Il va sans dire que, si les gaz sont superposés de façon que le plus dense soit à la partie supérieure, la diffusion se fait plus vite; mais la seule différence est dans la rapidité avec laquelle la pénétration a lieu, et non dans le résultat définitif.

graduées en parties d'égaies capacités, et contenant différents gaz : observons, dans chacune d'elles, les volumes des gaz  $v, v', v'', \dots$ , au moyen des graduations et les pressions  $p, p', p'', \dots$ , au moyen des hauteurs des colonnes de mercure et de la pression barométrique. Introduisons ensuite tous ces gaz dans une même éprouvette, et faisons occuper au mélange un volume  $V$ ; si le premier gaz occupait seul le

volume  $V$ , sa force élastique serait  $p \frac{v}{V}$ , de même les forces élastiques des autres gaz, sous le volume  $V$ , seraient  $p' \frac{v'}{V}, p'' \frac{v''}{V}, \dots$ . Si la loi de Dalton est vraie, la force élastique  $P$  du mélange doit donc être

$$P = p \frac{v}{V} + p' \frac{v'}{V} + p'' \frac{v''}{V} + \dots;$$

c'est ce que vérifie la mesure directe de la pression, dans l'éprouvette qui contient le mélange.

151. — L'énoncé de cette loi peut être présenté sous une autre forme, qui est commode pour la résolution de certaines questions : *Le volume d'un mélange de gaz est égal à la somme des volumes de tous les gaz, considérés chacun comme soumis à la pression totale du mélange.*

En effet, l'équation précédente peut s'écrire

$$PV = pv + p'v' + p''v'' + \dots;$$

d'où l'on tire

$$V = v \frac{p}{P} + v' \frac{p'}{P} + v'' \frac{p''}{P} + \dots,$$

formule qui est la traduction du dernier énoncé.

#### IV. — MÉLANGES DES LIQUIDES ET DES GAZ.

152. **Dissolution des gaz dans les liquides.** — L'eau, mise en présence d'une atmosphère d'un gaz pur, d'oxygène par exemple, en absorbe une quantité déterminée, quantité qui augmente avec la pression du gaz; le gaz absorbé se dégage lorsqu'on vient à faire le vide à la surface du liquide, et il reste de l'eau pure. — Ce phénomène ne présente aucun des caractères des actions chimiques : les molécules du gaz semblent simplement pénétrer entre celles de l'eau; la force élastique du gaz reste même encore manifeste, puisqu'il abandonne le liquide, ou y pénètre de nouveau, selon que la pression du gaz extérieur diminue ou augmente. — C'est aux phénomènes présentant ce caractère que nous donnerons le nom de *dissolution des gaz*.

153. **Première loi de Dalton : dissolution d'un gaz dans un liquide.** — **Coefficient de solubilité.** — *Les quantités d'un gaz dissoutes par l'unité de volume d'un liquide sont proportionnelles à la pression que ce gaz exerce sur la surface du liquide.*

On appelle *coefficient de solubilité* d'un gaz dans un liquide, à une température déterminée  $t$ , le nombre qui exprime le volume de gaz, ramené à 0° et 76 centimètres, que peut dissoudre, à la température  $t$  et sous la pression normale, l'unité de volume du liquide (\*).

Les coefficients de solubilité des divers gaz, dans l'eau par exemple, offrent entre eux des différences considérables; ainsi, 1 litre d'eau à la température de 15 degrés absorbe, sous la pression normale, 0<sup>m</sup>,050 d'oxygène, 0<sup>m</sup>,015 d'azote, 1 litre d'acide carbonique, et environ 670 litres de gaz ammoniac.

154. **Deuxième loi de Dalton : dissolution d'un mélange de plusieurs gaz.** — *Lorsqu'un mélange de plusieurs gaz est en contact avec un liquide, chacun d'eux se dissout avec son coefficient de solubilité propre, et proportionnellement à la pression qui doit lui être attribuée dans le mélange.* C'est ce qu'on exprime quelquefois en disant que chacun des gaz se dissout comme s'il était seul.

Cette loi a été vérifiée dans des circonstances très diverses. — Nous nous contenterons d'indiquer la vérification qui consiste à en déduire, *a priori*, les proportions relatives d'oxygène et d'azote qui doivent se dissoudre dans l'eau au contact de l'air atmosphérique.

Un volume quelconque d'air atmosphérique, mesuré sous une pression quelconque  $H$ , contient environ  $\frac{1}{5}$  d'oxygène et  $\frac{2}{5}$  d'azote, mesurés sous la même pression. Chacun de ces gaz étant considéré comme occupant le volume tout entier, la force élastique partielle de chacun d'eux est représentée, pour le premier, par  $\frac{1}{5} H$ ; pour le second, par  $\frac{2}{5} H$ .

(\*) La loi de Dalton et la définition du coefficient de solubilité peuvent être énoncées d'une manière un peu différente. — Soit  $a$  le coefficient de solubilité, défini comme on vient de le faire, et  $v$  le volume de gaz ramené à 0° et 76 centimètres, qui se dissout dans l'unité de volume du liquide, sous une pression  $h$ . On aura, comme on vient de le voir :

$$v = a \cdot \frac{h}{76};$$

on en déduit

$$\frac{v \cdot 76}{h} = a.$$

Or, le premier membre exprime le volume que prendrait, sous la pression  $h$ , la quantité de gaz absorbée par l'unité de volume du liquide; on voit que ce volume est toujours représenté par la constante  $a$ . — On peut donc énoncer la loi de la dissolution, en disant que *l'unité de volume du liquide absorbe, sous une pression quelconque  $h$ , un volume constant du gaz, ce volume étant toujours évalué sous la pression  $h$ .* La valeur de ce volume constant n'est autre que le *coefficient de solubilité*.

Il est aisé de voir qu'on peut encore définir le *coefficient de solubilité* comme étant le rapport de la force élastique du gaz dissous, considéré comme occupant le volume du liquide tout entier, à la force élastique du gaz qui presse sur la surface du liquide.

Leurs coefficients de solubilité, à la température de 15° par exemple, étant 0,050 et 0,015, un litre d'eau doit dissoudre, sous la pression totale H, des quantités de chaque gaz qui, mesurées sous la pression de 760 millimètres, seraient représentées par

$$0^{\text{m}},050 \times \frac{H}{76} \text{ d'oxygène,}$$

$$0^{\text{m}},015 \times \frac{H}{76} \text{ d'azote.}$$

Le rapport de ces deux volumes est indépendant de H; la composition du mélange gazeux extrait de l'eau doit donc être indépendante de la pression sous laquelle la dissolution s'est effectuée. — Ce rapport est égal à  $\frac{0,050}{0,015}$  ou  $\frac{1}{3}$ . L'analyse du mélange gazeux extrait de l'eau montre, en effet, que, après l'élimination de l'acide carbonique que l'eau tient en dissolution, ce mélange est formé de  $\frac{1}{3}$  d'oxygène et  $\frac{2}{3}$  d'azote. Il est donc relativement plus riche en oxygène que l'air.

Quant à la quantité absolue de gaz dissoute dans un litre d'eau, elle varie proportionnellement à la pression H. Sous une pression de 76 centimètres, en particulier, les expressions précédentes fournissent 0<sup>m</sup>,006 d'oxygène et 0<sup>m</sup>,012 d'azote. Donc, en tout, 18 centimètres cubes de gaz. — C'est là, en effet, le résultat que fournissent les eaux pures et bien aérées, recueillies dans les pays de plaines, quand on en extrait les gaz par l'ébullition, comme on l'indique dans les Cours de chimie.

**155. Applications.** — Les lois précédentes expliquent comment les eaux des lacs ou des sources dissolvent les gaz de l'air en quantités variables, selon la pression de l'atmosphère. Au sommet des montagnes, les eaux sont beaucoup moins aérées que dans les pays de plaines : il est probable, d'après M. Boussingault, que l'usage de ces eaux peu aérées est l'une des causes de la production du goitre.

Certaines sources d'eaux minérales laissent dégager des gaz, et en particulier des bulles d'acide carbonique, qui les rendent effervescentes : ces gaz s'échappent quand l'eau arrive au contact de l'air, qui n'en contient que des traces. — Les eaux gazeuses artificielles s'obtiennent en comprimant de l'acide carbonique dans de l'eau, au moyen de pompes, jusqu'à une pression d'environ 5 atmosphères. Les vins mousseux, la bière, le cidre, contiennent également en dissolution de l'acide carbonique, produit par la fermentation qui s'est continuée dans les bouteilles après qu'elles ont été bouchées. Quand on les débouche, la plus grande partie du gaz dissous se dégage progressivement, en produisant une mousse qui est due à la viscosité du liquide (\*).

(\*) On remarque cependant qu'un liquide chargé d'une grande quantité de gaz dissous ne laisse pas dégager immédiatement tout l'excès de gaz, au moment où ce

**156. Actions des solutions salines sur les gaz.** — Quand on met les gaz en présence des solutions salines, les quantités de gaz absorbées semblent le plus souvent se soustraire au lois de la dissolution. — Ces actions ont été étudiées par M. É. Fernet, dans divers cas particuliers. Voici quelques-uns des résultats obtenus.

Dans la plupart des cas, l'action des solutions salines sur les gaz est un phénomène complexe, dépendant à la fois de la dissolution simple et de la combinaison chimique ; le volume de gaz absorbé se compose de deux termes, dont l'un varie proportionnellement à la pression, l'autre est indépendant de la pression et est proportionnel à la quantité de sel dissoute. Le coefficient de solubilité propre, qui entre dans le premier de ces deux termes, est toujours moindre que celui de l'eau pure pour le même gaz, et diminue à mesure que la quantité de sel augmente.

De là résulte : 1° que, pour les gaz qui ne peuvent pas se combiner chimiquement avec le sel dissous, l'absorption totale est toujours moindre que dans l'eau, et suit d'ailleurs la loi de la dissolution (153). Tel est le cas des solutions de chlorure de sodium (sel marin), mises en présence de l'oxygène ou de l'air : la présence de ce sel peut donc être considérée comme diminuant l'absorption de ces gaz par l'eau. — 2° Au contraire, si le gaz peut se combiner avec le sel, en proportion un peu considérable, l'influence de la pression sur le phénomène devient relativement presque insensible, et ne peut être observée que par des méthodes assez délicates. Tel est le cas des solutions de phosphate de soude ou de carbonate de soude, mises en présence de l'acide carbonique ; bien que ces sels diminuent la solubilité propre du gaz, leur présence a pour effet d'augmenter considérablement le pouvoir absorbant total du liquide, et de rendre l'absorption presque indépendante de la pression.

Ces résultats fournissent l'explication d'un grand nombre de phénomènes naturels. — Les eaux des sources, des rivières, des lacs, des mers, tiennent en dissolution un certain nombre de sels, dont l'influence s'ajoute à celle de l'altitude (155), pour faire varier les quantités d'air qu'elles absorbent, et leurs qualités comme boisson. — De là résulte aussi que ces diverses eaux ne sont pas également propres à fournir les gaz nécessaires à la respiration des animaux aquatiques.

Enfin, ces principes trouvent une application immédiate dans la théorie même de la respiration. En effet, la partie liquide du sang, qui vient, dans les organes respiratoires, absorber les gaz de l'air pour les transmettre aux globules, ou qui rend à l'air l'acide carbonique abandonné par les globules, ne se comporte pas à l'égard de ces gaz comme le ferait l'eau pure : parmi

liquide se trouve au contact de l'air : on dit alors qu'il reste sursaturé. — Mais si l'on vient à agiter vivement, le dégagement de gaz recommence, et la sursaturation tend à se détruire. Il en est de même quand on y introduit un corps solide : chacun a pu observer, par exemple, l'effervescence que l'on produit dans de l'eau de Seltz ou dans du vin de Champagne, quand on y plonge un biscuit ou même un grain de raisin. — M. Gernez a montré que, dans tous les phénomènes de ce genre, l'influence du corps solide est due à l'air qui est condensé à sa surface, et qui forme une sorte d'atmosphère intérieure dans laquelle le gaz peut se dégager. Ainsi, un fil de platine peut produire un effet semblable ; mais il cesse de produire cet effet si on l'a chauffé préalablement au rouge, puis refroidi brusquement dans l'eau, de manière à empêcher l'air de se condenser à sa surface.

les sels qui s'y trouvent en dissolution, les uns augmentent le pouvoir absorbant de l'eau pour les gaz de la respiration, les autres le diminuent. On s'explique ainsi comment, si certains de ces sels viennent à s'écarter des proportions normales, ces variations coïncident avec une suractivité ou un ralentissement de la fonction respiratoire.

V. — EXTENSION DU PRINCIPE D'ARCHIMÈDE AUX GAZ.  
AÉROSTATS.

157. **Poussée éprouvée par les corps plongés dans les gaz.**

— La démonstration du principe d'Archimède, donnée pour les corps plongés dans les liquides (88), s'applique aux corps plongés dans les gaz. — *Tout corps plongé dans un gaz éprouve une poussée de bas en haut, égale en grandeur au poids du gaz déplacé.*

Ce principe est applicable, en particulier, aux corps plongés dans l'air. — Il en résulte que tout corps dont le poids surpasse celui de l'air déplacé doit être considéré comme sollicité par une force dirigée de haut en bas, son *poids apparent dans l'air*, qui est l'excès de son poids réel sur le poids du gaz déplacé. Ce cas est celui des corps solides ou liquides. — On dit encore quelquefois que le corps plongé dans l'air *perd une partie de son poids*, égale au poids de l'air déplacé.

Au contraire, si le poids du corps est plus petit que celui de l'air déplacé, le corps s'élève comme s'il était sollicité, de bas en haut, par une force égale à la différence entre la poussée et son poids. Tel est le cas des bulles de savon gonflées avec de l'hydrogène.

158. **Vérification expérimentale.** — La poussée de l'air sur les corps qui y sont plongés peut être constatée par l'expérience suivante :

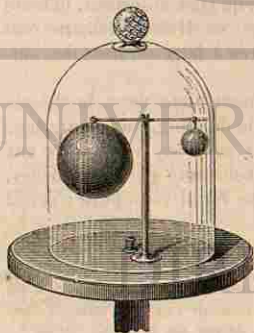


Fig. 140. — Baroscope.

Aux deux extrémités d'un petit fléau de balance (fig. 140) sont suspendues deux sphères métalliques creuses, dont les volumes sont très inégaux, mais dont les poids sont peu différents. La virole qui soutient la petite sphère peut se mouvoir sur un pas de vis, pratiqué sur le fléau : on règle la distance de la virole au point de suspension, de façon que le fléau se tienne horizontal lorsque l'appareil est placé dans l'air. On place alors l'instrument sous une cloche, dans laquelle on fait le vide au moyen de la machine pneumatique : à mesure que l'air se raréfie, on voit le fléau s'incliner du côté de la grosse sphère : il redevient horizontal quand on laisse rentrer l'air. — C'est bien là le résultat que l'on pouvait prévoir ; en effet, en enlevant l'air de la cloche, on

supprime les poussées qu'il exerçait sur les deux sphères, et qui intervenaient dans l'équilibre horizontal du fléau ; or, la poussée étant plus grande pour la sphère qui a le plus grand volume, l'équilibre ne peut subsister dans le vide, et le fléau doit s'incliner du côté de la grosse sphère.

Cet appareil, connu sous le nom de *baroscope*, avait été imaginé par Otto de Guericke pour constater, par les variations d'inclinaison du fléau, les variations de la pression atmosphérique. — Il faudrait, pour qu'il pût servir à cet usage, lui donner une grande sensibilité.

159. **Corrections des pesées effectuées dans l'air.** — Tout corps plongé dans l'air éprouvant une poussée de bas en haut, les pesées qu'on effectue dans l'air doivent, pour fournir des résultats exacts, subir une correction.

Désignons par  $x$  la masse du corps qui a été soumis à la pesée ; soit  $M$  la somme des marques des masses échantillonnées qu'on a employées pour établir l'équilibre. La pesée ayant eu lieu dans l'air, nous allons écrire que les *poids apparents* du corps et des masses échantillonnées sont égaux. Soit  $D$  la densité du corps,  $\Delta$  celle du métal dont sont faits les poids marqués et  $a$  la masse du centimètre cube d'air. Le volume du corps est  $\frac{x}{D}$ , la masse d'air déplacée est  $\frac{x}{D}a$  ; le poids du corps dans le vide est  $xg$ , la poussée qu'il éprouve de la part de l'air est  $\frac{x}{D}ag$  ; son poids apparent est donc  $x\left(1 - \frac{a}{D}\right)g$ . De même, le poids apparent des masses échantillonnées est  $M\left(1 - \frac{a}{\Delta}\right)g$ . — On a donc :

$$x\left(1 - \frac{a}{D}\right)g = M\left(1 - \frac{a}{\Delta}\right)g;$$

on en tire :

$$x = M \frac{1 - \frac{a}{\Delta}}{1 - \frac{a}{D}}.$$

Les densités  $D$  et  $\Delta$  sont supposées connues. — Lorsqu'il s'agit de pesées effectuées sur des corps *solides* ou *liquides*, on peut remplacer la densité  $a$  de l'air extérieur par le nombre 0,0015, qui est la densité de l'air sous la pression de 76 centimètres et à la température de 0° ; en effet, dans ce cas, les *variations* que peut éprouver la poussée due à l'air, quand la pression et à la température s'écartent un peu de ces valeurs, sont négligeables à côté du poids de la masse  $x$ .

Au contraire, si le corps à peser était un *gaz*, la poussée serait du



même ordre de grandeur que le poids : alors, les plus petites variations dans la densité de l'air extérieur ayant une influence appréciable. L'approximation qui précède ne serait plus suffisante, et on devrait remplacer  $a$  par la valeur de la densité de l'air *au moment de l'expérience*. — Mais, dans ce cas, il est préférable d'éviter cette correction, en employant une *tare compensée*, comme nous l'indiquerons à propos de la détermination de la densité des gaz (livre II, chap. III).

Nous verrons également plus loin comment on tient compte de la poussée de l'air pour déterminer, d'une manière rigoureuse, les poids spécifiques des corps solides ou liquides (livre II, chap. IV).

**160. Aérostats.** — On donne le nom général d'*aérostats* à des appareils formés d'une enveloppe mince, contenant un gaz moins dense que l'air : si le poids total du gaz, de l'enveloppe et des divers accessoires est moindre que le poids de l'air déplacé, la poussée l'emporte sur le poids et l'appareil tend à s'élever dans l'atmosphère.

Les *montgolfières* sont des aérostats gonflés avec de l'air chaud. — Les premiers appareils de ce genre furent construits en 1780, par les frères Montgolfier (Joseph et Étienne), fabricants de papier à Annonay.

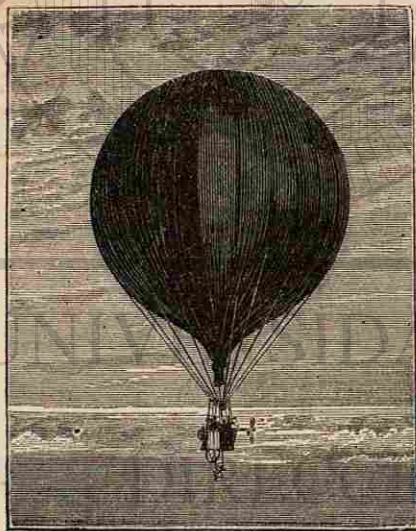


Fig. 141. — Ballon.

**161. Ballons.** — Les ballons sont des aérostats gonflés avec de l'hydrogène, ou avec le gaz d'éclairage. — C'est avec des globes de

C'étaient des globes de toile, doublés de papier, et ayant une douzaine de mètres de diamètre. On allumait un grand feu au-dessous d'une large ouverture pratiquée à la partie inférieure ; on y suspendait ensuite un panier en fils de fer, rempli de matières en combustion, pour entretenir la température de l'air intérieur. — Ces appareils ont le grand inconvénient d'être trop dangereux pour que des aéronautes puissent s'aventurer dans des ascensions de ce genre. Malgré ces dangers, de semblables ascensions furent entreprises un certain nombre de fois, et quelques-unes coûtèrent la vie aux voyageurs.

papier remplis d'hydrogène qu'avaient été faites les premières expériences des frères Montgolfier. Peu de temps après, et sans connaître le gaz employé par eux, le physicien Charles enleva dans les airs, au Champ de Mars, à Paris, un ballon gonflé avec de l'hydrogène : l'enveloppe avait 4 mètres de diamètre.

Les ballons que l'on construit aujourd'hui (fig. 141) ont des dimensions beaucoup plus considérables ; l'enveloppe est formée soit de taffetas verni, soit de feuilles de caoutchouc et de taffetas superposées. Le ballon est couvert d'un filet, qui supporte une nacelle destinée à recevoir les aéronautes, le lest et tous les objets nécessaires au voyage. — Pour gonfler le ballon, on commence par l'aplatir pour en chasser l'air, et on y fait arriver le gaz par une ouverture qu'il présente à sa partie inférieure.

**162. Force ascensionnelle, au départ.** — On nomme *force ascensionnelle* d'un aérostat, à un instant déterminé, la différence entre la poussée due à l'air qui l'environne et son poids total.

Pour que l'ascension se fasse dans les conditions convenables, il est bon que cette force ascensionnelle, mesurée avant le départ à l'aide d'un dynamomètre, ne représente qu'une force de quelques kilogrammes. — Il faut remarquer enfin que l'enveloppe doit toujours être assez vaste pour que le ballon puisse s'élever avant d'être complètement distendu : en effet, si le volume du ballon ne pouvait plus s'accroître dans des régions de l'atmosphère où la pression est moindre, la pression intérieure pourrait amener la déchirure de l'enveloppe.

**163. Variations de la force ascensionnelle pendant l'ascension.** — Si l'enveloppe est assez vaste pour continuer toujours à se distendre, à mesure que le ballon s'élève, son volume varie en raison inverse de la pression extérieure ; mais, comme la densité de l'air qu'il déplace varie proportionnellement à la pression, il en résulte que la poussée, c'est-à-dire le produit du volume de cet air par sa densité, ne change pas. On voit donc qu'un ballon n'emportant aucun accessoire, et formé seulement d'une enveloppe parfaitement imperméable, conserverait une force ascensionnelle sensiblement constante. — Pour un ballon muni de ses accessoires, la diminution de force ascensionnelle, pendant qu'il s'élève, devrait être attribuée uniquement à la diminution de la poussée éprouvée, dans un milieu plus rare, par les corps non gazeux du système : l'aérostat conserverait donc encore une force ascensionnelle presque égale à celle qu'il aurait reçue au départ.

Mais l'hypothèse de l'imperméabilité de l'enveloppe est loin d'être réalisée, au moins dans la plupart des cas. L'expérience a montré qu'une partie de l'hydrogène s'échappe dans l'atmosphère, et est remplacée par de l'air. Or, d'après les lois suivant lesquelles s'effectue cet échange de gaz, l'air qui pénètre dans le ballon a, à la fois, un volume moindre et un poids plus grand que l'hydrogène qui s'échappe. De là,

une diminution de poussée et un accroissement de poids, c'est-à-dire une diminution rapide dans la force ascensionnelle.

Les aéronautes, une fois qu'ils sont parvenus à une certaine hauteur, n'ont plus aucun point fixe qui leur permette de constater si le ballon continue à monter, ou s'il cesse de monter : ils ont recours à l'observation du baromètre qui leur permet d'évaluer approximativement, à chaque instant, la hauteur à laquelle ils se trouvent (154). — Quand ils veulent accélérer le mouvement d'ascension, ils jettent une partie du sable qui sert de lest. — Quand ils veulent descendre, ils laissent échapper du gaz, en ouvrant, à l'aide d'une corde, une soupape disposée à la partie supérieure du ballon : alors, le volume du ballon devenant progressivement moindre, la poussée diminue et la descente commence.

C'est en réglant ainsi les mouvements d'ascension et de descente qu'on arrive à maintenir le ballon dans l'air jusqu'à ce qu'il se trouve au-dessus d'un lieu où l'on puisse toucher terre sans danger.

164. **Calcul de la force ascensionnelle.** — La force ascensionnelle peut être déterminée *a priori* par le calcul.

Supposons, par exemple, qu'il s'agisse d'un ballon gonflé avec de l'hydrogène. Prenons comme unité de force le kilogramme. Le poids d'un mètre cube d'air, à 0° et sous la pression de 76 centimètres, est d'environ  $1^{\text{kg}},5$ ; le poids d'un mètre cube d'hydrogène, dans les mêmes conditions, est  $1^{\text{kg}},5 \times 0,0692$ . Soit  $V$  le volume du gaz introduit, exprimé en mètres cubes, sous la pression  $H$  de l'air environnant; soit  $v$  le volume, en mètres cubes, de tous les corps non gazeux du système, et  $P$  leur poids. Admettons, pour plus de simplicité, que la température soit partout de 0°. Pour calculer le poids du gaz intérieur, ramenons son volume à la pression de 76 centimètres; il deviendra  $\frac{VH}{76}$ ; son poids est donc  $1^{\text{kg}},5 \times 0,0692 \times V \frac{H}{76}$ . Le poids de l'air déplacé

par l'enveloppe est de même  $1^{\text{kg}},5 \times V \frac{H}{76}$ . Enfin, le poids de l'air déplacé par les corps non gazeux est  $1^{\text{kg}},5 \times v \frac{H}{76}$ . La force ascensionnelle est donc :

$$1^{\text{kg}},5(1-0,0692)V \frac{H}{76} + 1^{\text{kg}},5 \times v \frac{H}{76} - P.$$

En général, on considère comme déterminés à l'avance les objets que le ballon doit enlever, en sorte que  $P$  est connu, ainsi que  $v$ . On égale donc l'expression précédente à la force ascensionnelle  $A$  que l'on veut obtenir, et l'on a ainsi une équation d'où l'on peut tirer la valeur de  $V$ , c'est-à-dire du nombre de mètres cubes de gaz qu'il faudra introduire dans le ballon. — Quant au volume à donner au ballon lui-

même, supposé *distendu*, il doit être plus considérable, comme nous l'avons montré (162) : on fait en sorte que ce volume surpasse, d'un tiers environ, la valeur de  $V$  qui est fournie par le calcul, c'est-à-dire qu'on donne à l'enveloppe une capacité au moins égale à  $\frac{4}{3}V$ .

Si le gaz employé est le gaz d'éclairage, dont le mètre cube pèse environ  $1^{\text{kg}},5 \times 0,55$ , la force ascensionnelle est donnée de même par l'expression :

$$1^{\text{kg}},5(1-0,55)V \frac{H}{76} + 1^{\text{kg}},5 \times v \frac{H}{76} - P.$$

La quantité entre parenthèses a une valeur beaucoup moindre que dans l'expression précédente; en sorte que, avec les mêmes valeurs de  $P$  et de  $v$ , on est obligé de donner au volume  $V$  une valeur beaucoup plus grande. Le prix de l'enveloppe est, par cela même, plus considérable; mais, en revanche, le prix du gaz est beaucoup moindre, et c'est là surtout ce qui est à considérer quand un même ballon doit être employé pour un certain nombre d'ascensions. — On ne fait guère usage de l'hydrogène que pour les ascensions destinées à atteindre une grande hauteur, ou bien encore lorsqu'on veut y faire participer un grand nombre de personnes à la fois (\*).

165. — Comme question théorique, on peut encore se proposer de construire l'aérostat de façon qu'il arrive en équilibre à une hauteur déterminée dans l'atmosphère, sans que rien ait été changé à son poids. — Soit  $H'$  la pression, approximativement connue à cette hauteur (154), et  $V'$  le volume de l'air correspondant, c'est-à-dire le volume que doit atteindre le ballon dans sa distension maximum. La force ascensionnelle devant être nulle à ce moment, on aura, pour un ballon gonflé avec de l'hydrogène :

$$1^{\text{kg}},5(1-0,0692)V' \frac{H'}{76} + 1^{\text{kg}},5 \times v \frac{H'}{76} - P = 0,$$

équation qui donnera le volume  $V'$  du ballon *distendu*. — Il sera facile d'en déduire le volume de gaz qu'il faut y introduire, sous la pression  $H$ , à la surface du sol, au moment du départ.

(\*) Le grand ballon captif qui a fonctionné à Paris en 1878, pendant l'Exposition universelle, avait un volume de 23 000 mètres cubes. Il était gonflé avec de l'hydrogène; la nacelle pouvait recevoir, à la fois, une cinquantaine de personnes.

## CHAPITRE VI

### POMPES A GAZ ET A LIQUIDES. — SIPHON

#### I. — MACHINES SERVANT A RARÉFIER OU A COMPRIMER LES GAZ.

166. **Machine pneumatique.** — C'est à Otto de Guericke, bourgmestre de Magdebourg, que paraît due la première réalisation, en 1654, d'un instrument destiné à extraire l'air des appareils, ou d'une *pompe à gaz*. On a fait subir, à l'appareil qu'il avait imaginé, un grand nombre de modifications. Nous décrirons d'abord la machine qui est le plus fréquemment employée.

Deux corps de pompe en cristal, C et C' (fig. 142), travaillés avec soin pour que l'intérieur soit bien cylindrique, et contenant chacun un piston, communiquent par leur partie inférieure avec un seul et même conduit en fonte A, qui vient s'ouvrir en O au centre d'un plateau p, ou *platine*; la platine est formée d'un disque de cristal, dressé à l'émeri, sur lequel on applique les cloches dans lesquelles on veut faire le vide. Un pas de vis, pratiqué à l'extrémité O du conduit, permet également d'y adapter les appareils dont on veut enlever les gaz. Nous appellerons *réceptif* l'espace dans lequel la machine doit opérer la raréfaction.

Les deux corps de pompe étant semblables, il nous suffira de décrire l'un deux. Le piston est formé de rondelles de cuir, pressées entre deux plaques métalliques dd', ee' (fig. 145), qu'on a serrées l'une contre l'autre, au moyen d'un pas de vis, pour forcer le cuir à s'appliquer sur la paroi intérieure du corps de pompe. La pièce métallique qui forme le noyau du piston est creusée, suivant l'axe, d'un canal qui la traverse entièrement : ce canal contient un petit disque de métal g, qui est maintenu faiblement appliqué sur les bords de l'ouverture a, par un petit ressort à boudin. Le piston est traversé par une tige métallique hh, qui y passe à frottement dur; cette tige porte à sa partie inférieure un bouchon conique de métal, qui peut s'engager dans l'entrée b du conduit; à sa partie supérieure, cette même tige porte un arrêt i, qui viendra buter contre la base supérieure du corps de

pompe, dès que le piston, en s'élevant, aura entraîné le bouchon conique à une petite distance au-dessus de l'ouverture b.

Des tiges à crémaillère T, T', articulées avec les pistons, engrenent avec une même roue dentée, qu'on mettra en mouvement alternativement dans un sens ou dans l'autre, à l'aide de la manivelle M, M'

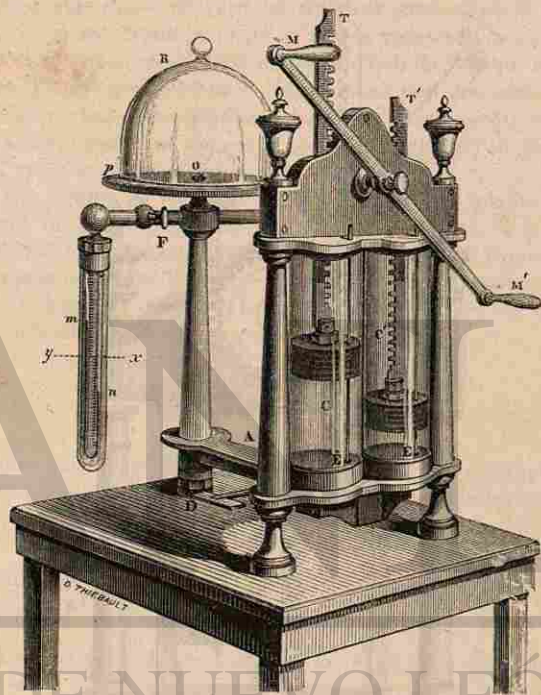


Fig. 142. — Machine pneumatique.

(fig. 142) : dans chacun de ces mouvements, l'un des pistons s'abaissera pendant que l'autre sera soulevé, et réciproquement.

167. **Jeu de la machine.** — Supposons que l'un des pistons, d'abord appliqué sur le fond du corps de pompe, vienne à être soulevé (c'est le mouvement qu'indique la figure 145 pour le piston de gauche P). Le bouchon conique est soulevé un peu au-dessus de l'ouverture b; mais bientôt la tige vient buter, par son arrêt i, contre la base supérieure du corps de pompe, et le piston continue seul à monter; l'air contenu dans le réceptif acquiert, en se répandant dans le corps de pompe, un volume toujours croissant et par suite une force élastique

décroissante. Pendant tout ce temps, le disque  $g$  reste appliqué sur l'ouverture  $a$ , puisqu'il supporte en dessus la pression atmosphérique, qui est supérieure à la pression actuelle de l'air dans le récipient. — Supposons maintenant que le piston, arrivé au haut de sa course, soit abaissé : la tige  $hh$  sera entraînée et le cône inférieur viendra presque

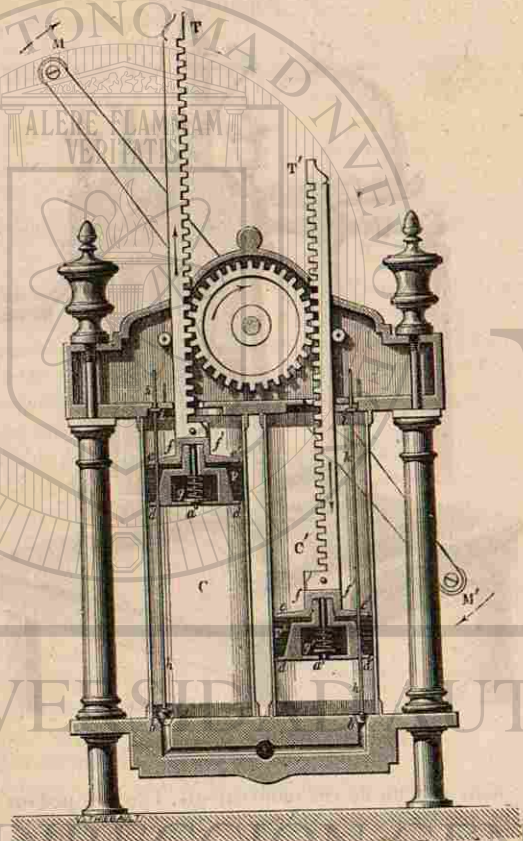


Fig. 145. — Coupe verticale des corps de pompe et des pistons.

immédiatement s'appliquer dans l'ouverture  $b$  et interrompre la communication entre le récipient et le corps de pompe : l'air enfermé dans le corps de pompe, et comprimé par le piston, soulèvera le disque  $g$  quand sa force élastique sera devenue supérieure à la pression atmosphérique, et il continuera à s'échapper par l'ouverture  $a$  jusqu'à

ce que le piston soit au bas de sa course (c'est le mouvement que suppose la figure pour le piston de droite  $P'$ ). — Les mêmes phénomènes se reproduiront chaque fois qu'on fera successivement monter et descendre l'un des pistons, c'est-à-dire à chaque *coup de piston*.

**168. Loi de décroissement de la force élastique, en supposant la machine parfaite.** — Chaque fois que l'on fait monter l'un des pistons, une partie de l'air du récipient passe dans le corps de pompe, et en est expulsée quand le piston redescend : on n'enlève donc, à chaque coup de piston, qu'une fraction de l'air qui était resté au coup de piston précédent. — Donc, même avec une machine parfaite, il serait impossible d'enlever tout l'air du récipient. — Examinons d'ailleurs comment décroît la force élastique de l'air dans le récipient, après les coups de piston successifs.

Soit  $V$  le volume du récipient et des conduits,  $v$  le volume du corps de pompe quand le piston est au haut de sa course,  $H$  la pression atmosphérique. Quand on soulève pour la première fois le piston, l'air, qui occupait le volume  $V$  sous la pression  $H$ , occupe le volume  $V + v$  ; si donc on désigne par  $h_1$  sa pression à ce moment, elle doit satisfaire, d'après la loi de Mariotte, à la relation

$$\frac{h_1}{H} = \frac{V}{V+v}, \quad \text{d'où} \quad h_1 = H \frac{V}{V+v}.$$

C'est-à-dire que, pour obtenir la force élastique après le premier coup de piston, il suffit de multiplier la force élastique que possédait l'air, avant ce coup de piston, par la fraction  $\frac{V}{V+v}$ . De même, pour obtenir la pression  $h_2$  après le deuxième coup de piston, il suffit de multiplier cette valeur de  $h_1$  par  $\frac{V}{V+v}$ , ce qui donne  $H \left(\frac{V}{V+v}\right)^2$ , et ainsi de suite. Donc, en général, en désignant par  $h_n$  la force élastique de l'air après  $n$  coups de piston, on a

$$(1) \quad h_n = H \left(\frac{V}{V+v}\right)^n.$$

La fraction  $\frac{V}{V+v}$  étant plus petite que l'unité, les valeurs de  $h_n$  vont en décroissant à mesure que  $n$  augmente, et en faisant  $n$  suffisamment grand, on peut donner à  $h_n$  une valeur aussi petite que l'on voudra. — Donc, avec une machine parfaite, il y aurait toujours avantage à donner un plus grand nombre de coups de piston, et la force élastique, sans devenir jamais nulle, pourrait devenir aussi petite qu'on voudrait.

**169. Influence de l'espace nuisible.** — Quelque soin que l'on ait apporté dans l'ajustement des pistons et des cônes qui bouchent les

conduits de la machine, il reste inévitablement, sous les pistons, quand ils sont appliqués sur le fond de leur corps de pompe, de petites cavités qu'on désigne sous le nom d'*espace nuisible*.

Or, admettons, pour un instant, qu'il soit possible de réduire la force élastique à une valeur telle, que le gaz répandu dans le corps de pompe, au moment où l'un des pistons est en haut de sa course, puisse être ensuite réduit au volume de l'espace nuisible sans acquérir une force élastique supérieure à la pression atmosphérique : il est clair que, s'il en était ainsi, la descente du piston ne déterminerait plus l'ouverture de la soupape intérieure *g*, et l'air cesserait de s'échapper dans l'atmosphère. Donc, pour toute machine présentant un espace nuisible, il y a une *force élastique minimum*, au-dessous de laquelle il serait impossible de descendre. — Pour en déterminer la valeur, désignons par *u* le volume de l'espace nuisible; l'air qui occuperait le volume *v* du corps de pompe sous la force élastique minimum *f* atteindrait une force élastique égale à la pression atmosphérique *H* lorsqu'il serait réduit au volume *u*; on aurait donc, d'après la loi de Mariotte,

$$\frac{f}{H} = \frac{u}{v}, \quad \text{d'où} \quad f = H \frac{u}{v},$$

expression qui est d'autant plus petite que le rapport du volume de l'espace nuisible au volume du corps de pompe est moindre.

La théorie montre que cette limite ne peut même jamais être atteinte. Lorsqu'on tient compte de cette imperfection de la machine, la loi de décroissement de la force élastique après les coups de piston successifs est représentée par une expression plus compliquée que l'expression (1), et la discussion montre que la pression ne prend la valeur *f* que pour un nombre infini de coups de piston. — Cependant si la machine ne présentait aucun autre défaut, cette même expression montre que, sans atteindre jamais la limite, on en approcherait de plus en plus, à mesure que le nombre des coups de piston deviendrait plus grand (\*).

(\*) *Perfectionnement de Babinet.* — Pour reculer encore davantage la limite de raréfaction, on adapte à un grand nombre de machines une pièce particulière, dont l'idée est due à Babinet; c'est un robinet placé au point où les conduits des deux corps de pompe se réunissent, et dont on a indiqué (fig. 144 et 145) la section perpendiculaire à l'axe : la figure montre les diverses voies qui y sont pratiquées, soit dans le plan même de la figure, soit en arrière de ce plan, et en outre, l'ouverture d'une voie longitudinale, partant du point *D* et se continuant en arrière avec le conduit de la platine. Quand ce robinet est dans la position indiquée par la figure 144, tout se passe comme s'il n'existait pas. — Lorsqu'on est arrivé assez près de la limite de raréfaction pour que les soupapes des pistons n'expulsent que des quantités d'air inappréciables, on tourne ce robinet d'un quart de circonférence, de manière à l'amener dans la position de la figure 145 : la base du corps de pompe *C* se trouve mise en communication permanente avec le conduit qui aboutit au corps de pompe *C'*, par le petit canal accessoire *rst*, qui est alors ouvert; on voit en outre que, des deux corps de pompe, *C* communique seul avec le récipient. Dès lors, quand on élève le piston de *C*, l'air du récipient passe dans ce corps de pompe, et quand on l'abaisse, une fraction de cet air

170. *Influence des rentrées d'air.* — Dans le plus grand nombre des machines, l'imperfection la plus grave consiste dans l'existence de petits interstices livrant passage, à l'air, particulièrement autour des soupapes intérieures des pistons. L'air extérieur pénètre par ces interstices, avec une vitesse d'autant plus grande que la pression intérieure est plus faible : on conçoit donc qu'il arrive un moment où la quantité d'air qui rentre dans la machine devient égale à la quantité qu'on en expulse, quelle que soit la rapidité avec laquelle on fasse succéder les coups de piston. Il n'y a plus alors *aucun avantage à continuer de faire fonctionner la machine*. — En outre, si l'on veut arrêter l'opération et conserver le vide dans le récipient, il est nécessaire de fermer la communication entre le récipient et les corps de pompe. C'est ce que permet de faire la *clef*, comme nous le verrons plus loin (175).

171. *Avantages de l'emploi de deux corps de pompe.* — Dans une machine à un seul corps de pompe, on aurait à vaincre, chaque fois qu'on soulèverait le piston, une résistance égale à la différence des pressions exercées, d'une part sur la face supérieure du piston par l'atmosphère, d'autre part sur la face inférieure par le gaz raréfié : le second terme de cette différence devenant rapidement assez faible, l'opération deviendrait bientôt très pénible. — Dans la disposition actuelle, les deux pistons *P* et *P'* supportent sur leurs faces supérieures la pression de l'atmosphère : pour les faire mouvoir en sens contraire, on n'a donc à vaincre que la différence des pressions exercées sur leurs faces inférieures, laquelle résulte à chaque instant de la différence des forces élastiques de l'air dans les deux corps de pompe (\*).

Enfin, l'effort de l'opérateur, s'exerçant sur les poignées *M, M'* (fig. 142),

est chassée en *C'*; quand on abaisse le piston de *C'*, cette fraction *y* reste enfermée. Il en est de même aux coups de piston suivants, en sorte que le gaz qui est ainsi refoulé en *C'* acquiert bientôt, dans l'espace nuisible, une force élastique suffisante pour soulever la soupape. La machine continue donc de fonctionner quelque temps;

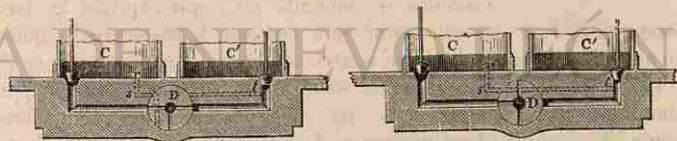


Fig. 144.

Fig. 145.

mais bientôt, le disque ne se soulevant plus qu'après un nombre de coups de piston de plus en plus considérable, on cesse encore de faire des progrès sensibles. — Avec les machines bien construites, on peut amener l'air à n'avoir plus qu'une force élastique de 1 ou 2 millimètres de mercure.

(\*) Quand on a déjà donné un grand nombre de coups de piston, si l'on considère le moment où l'un des pistons arrive vers le bas de sa course, on voit que la différence de ces pressions devient encore presque égale à une atmosphère, mais le chemin qui reste à parcourir est très petit, et, par suite, le travail à développer (20) est très peu considérable.

développe sur la tige, au point où celle-ci engrène avec la roue dentée, une force qui a pour mesure cet effort lui-même multiplié par le rapport de la longueur du bras du levier au rayon de la roue.

Pour ces diverses raisons, on peut donner aux corps de pompe une section assez considérable, sans que la manœuvre de la machine soit trop pénible.

**172. Manomètre de la machine.** — Les machines pneumatiques portent toujours un manomètre destiné à faire connaître, à chaque instant, la pression de l'air qui reste dans le récipient. Le plus ordinairement, c'est un tube de verre à deux branches M, N (fig. 146) dont l'une M est fermée, et qu'on nomme *baromètre tronqué*. Le tube est fixé sur une plaque de métal, et contenu dans une cloche de verre ou *épreuve*, qui est mise en communication avec le conduit par une douille métallique qui est fixée soit à sa partie inférieure (fig. 146), soit à sa partie supérieure (fig. 142).

On a procédé, pour l'introduction du mercure dans le tube, comme pour la construction d'un baromètre à siphon; mais, les branches n'ayant guère que deux décimètres environ, quand la pression de l'atmosphère s'exerce dans la branche ouverte, le liquide reste appliqué contre le sommet de la branche fermée. — Quand la pression dans le récipient de la machine est devenue suffisamment petite, le mercure commence à descendre dans la branche MQ et à s'élever dans l'autre; si la pression devenait nulle, les deux niveaux se placeraient sur un même plan horizontal *xy*. Nous avons vu qu'il n'en peut jamais être ainsi: on mesure la colonne de mercure *mn'*, qui exprime la force

élastique de l'air restant, comme on le fait pour le baromètre à siphon, au moyen de deux échelles dont le zéro commun est dans le plan *xy* (\*).

**173. Clef de la machine.** — Nous avons vu que, lorsqu'on veut maintenir la rarefaction sans être obligé de continuer à faire fonctionner la machine, il est nécessaire de fermer la communication entre le récipient et les corps de pompe (170). D'autre part, la pression atmosphérique tendant à faire passer entre les pistons et les corps de pompe une certaine quantité d'huile, qui pourrait obstruer les conduits, il est utile de pouvoir alors laisser rentrer l'air dans les corps de pompe.

(\*) La figure montre, sur la branche fermée, un étranglement *l* près de son extrémité: il est destiné à ralentir l'ascension du mercure, au moment où on laisse rentrer l'air dans les conduits; sans cette précaution, le sommet de la colonne de mercure viendrait frapper sur le verre un coup sec, qui pourrait en déterminer la rupture.



Fig. 146.

Enfin, quand l'expérience est terminée, il faut pouvoir rendre l'air au récipient. — Ces diverses opérations s'effectuent au moyen de la *clef*.

La clef est un robinet D, placé sur le conduit A de la figure 142; on y a pratiqué d'abord la voie ordinaire, qui établit la communication entre le récipient et les corps de pompe quand le robinet est ouvert (fig. 147). Il présente, en outre, un petit conduit longitudinal *m*,

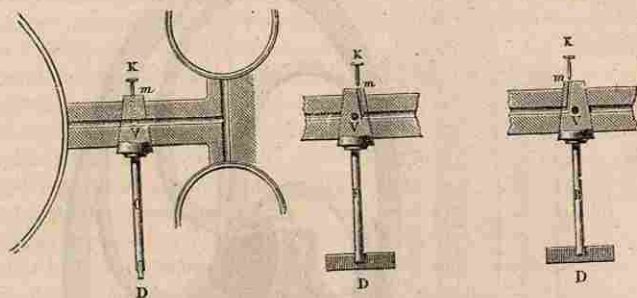


Fig. 147.

Fig. 148.

Fig. 149.

courbé à angle droit, comme le montrent les figures 148 et 149, et destiné à servir seulement quand le robinet est fermé: on peut alors, en enlevant la cheville K, laisser rentrer l'air, soit dans les corps de pompe (fig. 148), soit dans le récipient (fig. 149), selon la façon dont le robinet est tourné. — Pour amener la clef dans l'une de ces trois positions, l'expérimentateur la fait tourner de manière à lire, en dessus, l'une des trois lettres suivantes, gravées sur le métal:

- O — Conduit ouvert.
- F — Conduit fermé (on peut rendre l'air dans les corps de pompe).
- R — Rentrée de l'air dans le récipient.

Dans les machines qui sont munies du robinet de Babinet, cette pièce est, en général, disposée de manière à faire fonction de clef.

**174. Machine pneumatique de Bianchi.** — La machine pneumatique de Bianchi (fig. 150), bien qu'à un seul cylindre, offre les avantages des machines à deux corps de pompe. Le piston est mis en mouvement par la rotation du volant V, qui se transmet aux roues dentées *r* et *R*, et imprime un mouvement de va-et-vient à la tige T, par l'intermédiaire de la manivelle B; en même temps, le cylindre oscille autour de l'axe MN, et accompagne l'extrémité de la tige B, qui est maintenue entre des glissières.

Le cylindre est mis en communication avec les appareils dans lesquels on veut raréfier l'air, au moyen d'un tube de caoutchouc épais qu'on adapte sur l'extrémité N du canal pratiqué dans l'axe MN. —

L'air du récipient arrive dans le cylindre, soit par *a*, soit par *a'* (fig. 151), et chacune de ces ouvertures est alternativement bouchée par l'un ou l'autre des cônes qui terminent la tige glissante *aa'*; enfin, on voit en *b* et *b'* deux soupapes semblables aux soupapes inté-

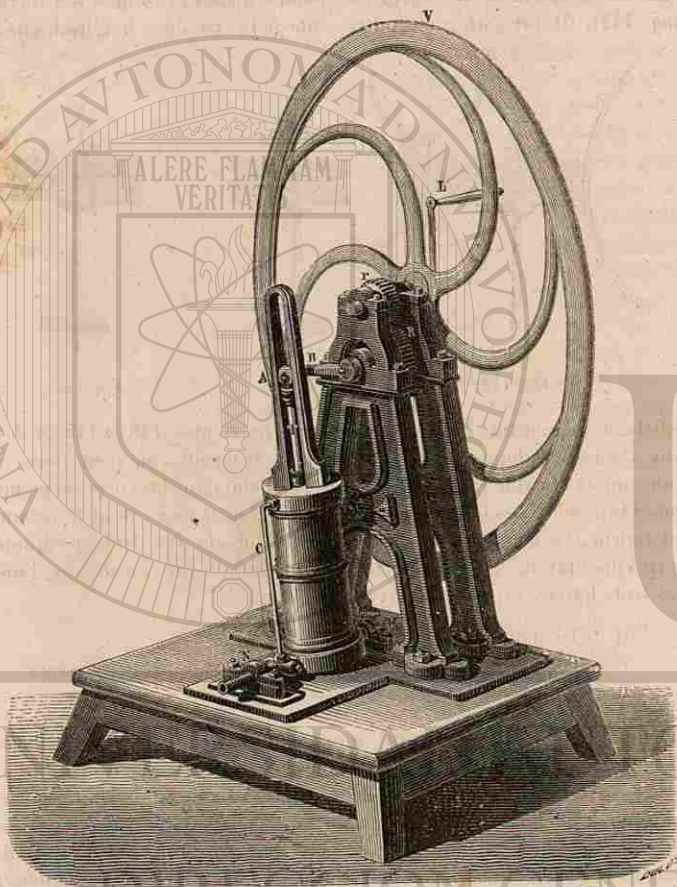


Fig. 150. — Machine pneumatique de Bianchi.

rieures des pistons de la machine ordinaire. — La figure 151 suppose que le piston descend : l'air du récipient arrive alors à la partie supérieure par le tube *C* et par l'ouverture *a'*; en même temps, l'air qui se trouve au-dessous du piston est chassé par la soupape *b* et s'échappe par la capacité intérieure de la tige *T* comme l'indique la flèche. —

Au contraire, quand le piston monte, *a'* se ferme, et l'air emprisonné au-dessus du piston est chassé par la soupape *b'*; en même temps l'air du récipient arrive à la partie inférieure par l'ouverture *a*, tandis que la soupape *b* est maintenue fermée par la pression atmosphérique.

On voit donc que les deux parties du cylindre séparées par le piston fonctionnent, simultanément et en sens inverse, comme le feraient les deux corps de pompe d'une machine pneumatique ordinaire. — Le cylindre étant en fonte, on peut lui donner des dimensions assez grandes pour faire rapidement le vide dans de vastes appareils.

175. **Machine pneumatique à mercure.** — La machine pneumatique à mercure, construite d'abord par M. Geissler, et perfectionnée en France par M. Alvergnyat, est destinée à obtenir une raréfaction beaucoup plus parfaite que ne peut le faire la machine ordinaire.

Le tube *T* (fig. 152), renflé à sa partie supérieure *A*, doit fonctionner comme une sorte de tube barométrique, dont la chambre sera représentée par la capacité *A*; il est mis en communication, par un gros tube de caoutchouc *B*, avec une cuvette *C* s'ouvrant à l'air libre. Ce tube *T* occupe une position fixe sur la planche verticale qui le supporte; la cuvette *C* peut, au contraire, être amenée à volonté, au moyen de la chaîne métallique *PQ* et des roues dentées que commande le volant *V*, soit à la partie supérieure soit à la partie inférieure de l'appareil. Le robinet *R* est un robinet à trois voies qui occupera, pendant la manœuvre, deux positions différentes, *R<sub>1</sub>* et *R<sub>2</sub>* (fig. 153) : lorsqu'il est dans la position *R<sub>2</sub>*, il établit la communication entre la capacité *A* et le système de tubes qui est à la partie supérieure; dans la position *R<sub>1</sub>*, il intercepte cette communication, mais il fait communiquer la capacité *A* avec le tube latéral, qui se termine par une petite cuvette pleine de mercure *G*.

Pour mettre en jeu la machine, on commence par chasser l'air que

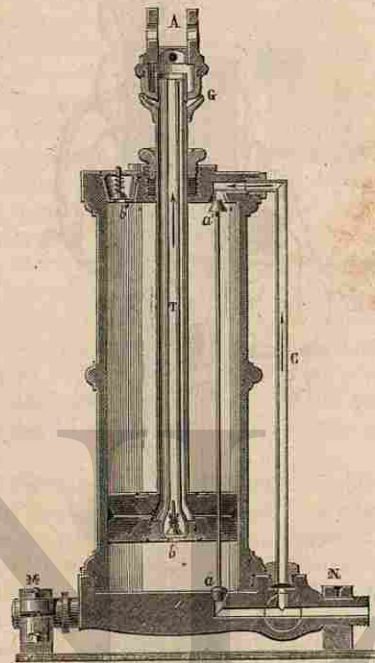


Fig. 151.

contient le tube barométrique. Pour cela, on met le robinet R dans la position  $R_1$ , et on amène la cuvette C à la partie supérieure de sa course : le mercure s'écoulant de C vers A comprime cet air, et, quand la masse liquide est arrivée à l'équilibre, le gaz compris entre la surface du mercure et le robinet S est à une pression supérieure à la pression atmosphérique (\*). On ouvre alors doucement le robinet S, de manière à livrer passage à cet air, qui s'échappe en traversant la cuvette G; le mercure du système CBA arrive ainsi à remplir complètement la capacité A jusqu'au robinet S. On ferme S, et, en faisant descendre la cuvette C jusqu'au bas de sa course, on détermine l'écoulement du mercure en sens inverse, c'est-à-dire de A vers C, ce qui produit un vide barométrique dans toute la partie supérieure de A, et la machine est prête à fonctionner.

Les appareils dans lesquels on se propose de raréfier l'air avec cette machine ont été, en général, soumis d'abord à l'action de la machine pneumatique ordinaire; on les met ensuite en communication avec le tube a (\*\*). La manœuvre con-

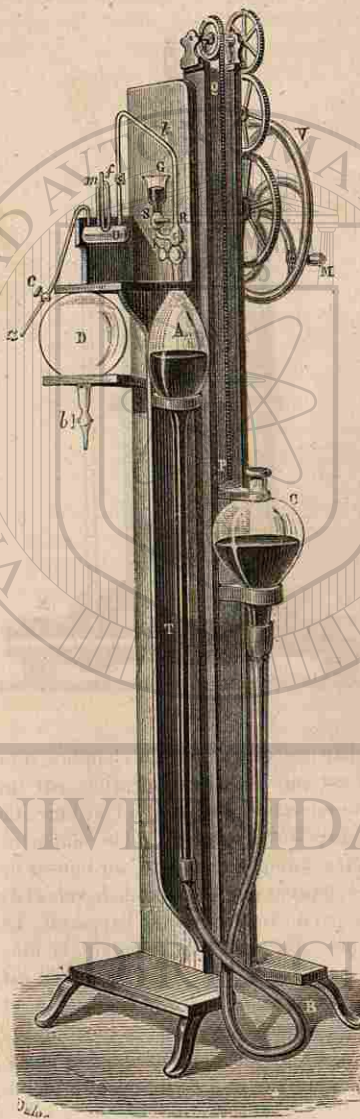


Fig. 152. — Machine pneumatique à mercure.

(\*) Le robinet R, qui est représenté sur la figure 152 entre la capacité A et le robinet S, sert à fermer la capacité A lorsque, la machine ayant fonctionné pendant un certain temps, on veut enlever le robinet R pour en renouveler le graissage, sans laisser rentrer de l'air humide dans l'appareil.

(\*\*) L'emploi préalable de la machine pneumatique ordinaire est seu-

siste alors dans la série suivante d'opérations. — On met le robinet R dans la position  $R_2$  (fig. 153), et, en ouvrant les robinets f et c, on détermine le passage d'une partie du gaz des appareils dans la chambre barométrique : l'arrivée de ce gaz dans la chambre a pour effet de faire descendre le niveau du mercure dans le tube barométrique et d'accroître ainsi l'espace dans lequel le gaz est aspiré. Lorsque le mercure a pris un nouvel équilibre dans le système de tubes ABC, on remet le robinet R dans la position  $R_1$ , on ramène la cuvette C à la partie supérieure de sa course, pour comprimer le gaz qui s'est rendu dans la capacité A, et enfin on fait échapper ce gaz dans l'atmosphère en ouvrant le robinet S. — En répétant cette manœuvre, on fait passer, à chaque fois, une certaine partie du gaz des appareils dans la machine, et de la machine dans l'atmosphère. On arrive ainsi à obtenir une pression tellement faible, que le baromètre tronqué m n'indique plus qu'une différence inappréciable entre les niveaux du mercure dans ses deux branches (\*).

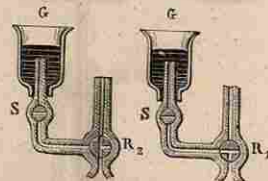


Fig. 153.

176. **Pompe à main.** — La pompe à main est un appareil d'une construction très simple, que l'on emploie pour obtenir une raréfaction assez grossière dans des espaces de dimensions peu considérables.

Elle se compose d'un corps de pompe MN (fig. 154) contenant un piston plein P, qu'on met en mouvement à l'aide d'une tige T munie d'une poignée. A la partie inférieure du corps de pompe sont deux tubes latéraux A, C, contenant chacun une soupape formée d'un petit tronc de cône métallique, qui pénètre dans une cavité pratiquée dans l'axe du tube; un petit ressort spiral sert à maintenir chacun d'eux faiblement appliqué dans cette cavité. La figure montre que ces soupapes sont placées de façon à pouvoir s'ouvrir, l'une a sous l'action d'un excès de pression à l'intérieur du corps de pompe, l'autre c sous l'action d'un excès de pression à l'extérieur.

lement destiné à rendre l'opération plus rapide, en mettant, dès le commencement, la machine à mercure en communication avec un espace où le gaz est déjà raréfié.

(\*) Le réservoir U, interposé entre la machine et les appareils, contient de l'acide sulfurique concentré, pour dessécher les gaz qui pénètrent dans la machine, de manière qu'elle reste toujours parfaitement sèche. — Tous les robinets sont en verre, et travaillés d'une manière assez parfaite pour tenir indéfiniment le vide, à la condition qu'on ait le soin de les maintenir enduits d'une légère couche de matière grasse. — Le ballon D, qui est figuré à gauche de l'appareil et dont il n'a pas été question dans la description, ne sert que dans des circonstances spéciales, celles où l'on veut faire le vide dans des appareils contenant un gaz qui attaquerait le mercure de la machine : ce ballon est alors utilisé comme une sorte de récipient intermédiaire, contenant de l'air raréfié jusqu'à la limite d'action de la machine, et dans lequel on aspire les gaz des appareils soumis à l'expérience.



Si le tube C est mis en communication avec un récipient quelconque, les mouvements alternatifs imprimés au piston produisent dans ce récipient une raréfaction successive, l'air s'échappant par A, et la pompe fonctionne comme une machine pneumatique. Mais l'appareil n'ayant qu'un seul corps de pompe, et l'effort nécessaire pour soulever le piston s'exerçant directement sur la tige, la manœuvre n'est possible, avec la force d'un homme, qu'à la condition de donner au piston une section beaucoup plus petite que dans la machine pneumatique ordinaire (171). — L'espace nuisible a d'ailleurs, par la construction même, une valeur assez grande, en sorte que la pompe à main ne peut être employée que pour obtenir un degré de raréfaction peu éloigné (\*).

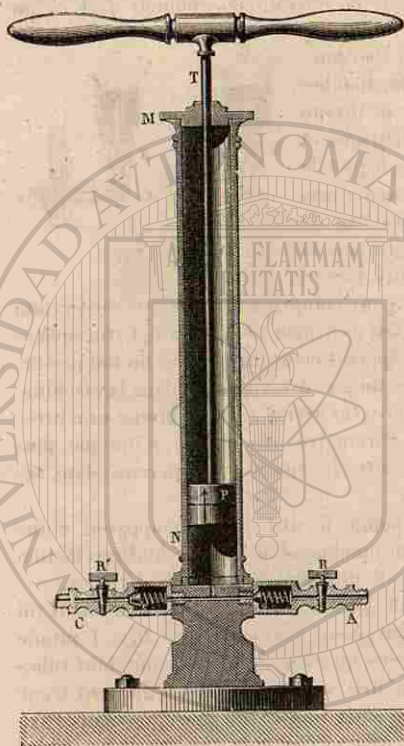


Fig. 154. — Pompe à main.

comprimer dans un récipient soit de l'air, soit un gaz quelconque. Il suffit de mettre le tube A en communication avec ce récipient et de faire

(\*) Le robinet R' peut servir, quand on arrête l'opération, soit à intercepter la communication entre la pompe et le récipient où l'on a fait le vide, soit à laisser rentrer l'air. Pour cela, on a fixé perpendiculairement au tube C un tube horizontal D, comme le montre la projection horizontale de cette partie de l'appareil (fig. 155); le robinet est un robinet à trois voies, disposées comme les deux traits noirs tracés ci-contre, sur sa clef; s'il est placé dans la position de la figure 155, la communication avec le récipient est interrompue, mais l'air peut rentrer dans la pompe; si, partant de cette position, on tourne ce robinet d'un quart de circonférence dans le sens du mouvement des aiguilles d'une montre, l'air rentre dans le récipient et dans la pompe; enfin, si on lui fait décrire encore une demi-circonférence, la communication entre le récipient et la pompe est établie comme par un robinet ordinaire.

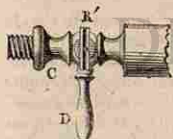


Fig. 155.

177. **Emploi de la pompe à main comme pompe de compression.** — La pompe qui vient d'être décrite peut également être employée pour

communiquer le tube C soit avec l'atmosphère, soit avec un réservoir à gaz. — Quand on soulève le piston, la soupape c s'ouvre, et laisse arriver l'air ou le gaz dans le corps de pompe; quand on fait descendre le piston, la soupape a s'ouvre dès que la force élastique intérieure surpasse celle qui s'exerce du côté A, et le gaz est refoulé dans le récipient.

En combinant plusieurs pompes semblables, et les faisant manœuvrer à l'aide d'une petite machine à vapeur, Regnault a pu comprimer certains gaz jusqu'à 50 atmosphères.

178. **Loi d'accroissement de la force élastique, dans la manœuvre de la pompe de compression.** — Proposons-nous de déterminer la loi suivant laquelle augmente la force élastique du gaz, dans le récipient où il est refoulé par une pompe de compression. — Nous supposerons d'abord la pompe parfaite, comme nous l'avons fait pour la machine pneumatique (168).

Soit H la force élastique, supposée invariable, dans l'espace où la pompe puise le gaz; H<sub>0</sub> la force élastique initiale dans le récipient où elle le comprime; V le volume de récipient, et v celui du corps de pompe. — Chaque fois que le piston s'élève, le volume v s'emplit de gaz à la pression H; quand il s'abaisse, ce gaz est refoulé dans le récipient et prend alors, sous le volume V, une force élastique H  $\frac{v}{V}$ , qui s'ajoute à la précédente (150). Donc, si l'on désigne par H<sub>1</sub>, H<sub>2</sub>, ..., H<sub>n</sub>, les forces élastiques dans le récipient après 1, 2, ..., n coups de pistons, on aura :

$$H_1 = H_0 + H \frac{v}{V},$$

$$H_2 = H_0 + 2H \frac{v}{V},$$

$$\dots \dots \dots$$

$$(1) \quad H_n = H_0 + nH \frac{v}{V}.$$

Si l'on considère, en particulier, le cas plus simple où la pompe puise de l'air dans l'atmosphère, et le refoule dans un appareil contenant d'abord de l'air à la pression atmosphérique, on a H<sub>0</sub> = H; la force élastique, après n coups de piston, devient alors

$$(2) \quad H_n = H \left( 1 + \frac{nv}{V} \right).$$

L'une ou l'autre des formules (1) et (2) montre que la force élastique augmente toujours d'une quantité proportionnelle au nombre n; donc, théoriquement, et avec une pompe parfaite, la force élastique H<sub>n</sub> pourrait

devenir aussi grande qu'on voudrait, en donnant un nombre suffisamment grand de coups de piston.

Si maintenant on tient compte du volume  $u$  de l'espace nuisible, on trouve, en raisonnant comme précédemment (169), que la force élastique ne peut dépasser une limite  $f$ , qui est ici

$$f = \Pi \frac{v}{u}.$$

Enfin, dans la plupart des cas, les fuites qui se produisent dans l'appareil, et qui arrivent à laisser échapper une quantité de gaz égale à celle que la pompe refoule, font que la pression cesse de s'accroître avant d'atteindre des valeurs voisines de cette limite. Il faut alors cesser de faire fonctionner la pompe, et fermer le récipient.

**179. Expériences fondées sur la raréfaction ou la compression des gaz.** — La machine pneumatique est

d'un usage continu dans les laboratoires : nous avons indiqué déjà, à diverses occasions, quelques-unes des expériences qu'elle permet de réaliser. — Citons encore l'expérience suivante :

On emplit d'eau à moitié un petit flacon, et on introduit dans le col un bouchon, traversé par un tube de verre qui est effilé à sa partie supérieure et qui plonge dans l'eau par son autre extrémité. On place le flacon sur la platine, on le couvre d'une cloche (fig. 156), et on raréfie l'air dans la cloche. La force élastique de l'air qui est enfermé dans le flacon fait monter l'eau dans le tube, et on voit le liquide jaillir par l'extrémité effilée : c'est l'expérience connue sous le nom de *jet d'eau dans le vide*.

Fig. 156.  
Jet d'eau dans le vide.

Voici une expérience analogue, que l'on réalise en employant la pompe à main comme *pompe de compression*. — On prend un réservoir métallique, à parois très résistantes (fig. 157), dans l'axe duquel est assujéti un tube pénétrant presque jusqu'au fond, et muni d'un robinet à son extrémité supérieure. On introduit d'abord de l'eau dans l'appareil (à peu près jusqu'au trait ponctué); puis, au moyen d'une pompe à main, on refoule de l'air par le tube central : le gaz comprimé vient s'accumuler dans l'espace qui surmonte la surface du liquide. On ferme le robinet, et on adapte sur le tube un ajutage étroit. Si l'on ouvre alors le robinet, on voit l'eau jaillir à une grande hauteur, en raison de l'excès de la pression intérieure sur la pression atmosphérique. — Cet appareil est connu sous le nom de *fontaine de compression*.

**180. Applications industrielles.** — La raréfaction ou la compression des gaz donne lieu, dans l'industrie, à de nombreuses applications.

Pour faire bouillir à de basses températures les sirops dont on extrait le sucre, et empêcher ainsi l'altération de ces liquides par la chaleur, on fait continuellement le vide dans les chaudières, au moyen de machines pneumatiques plus ou moins modifiées : l'ébullition se produit alors, comme nous le verrons plus loin, à une température beaucoup plus basse que sous la pression atmosphérique.

On a longtemps employé, pour faire graver aux trains la pente qui termine le chemin de fer de Paris à Saint-Germain, un système consistant en un gros tube de fonte, placé sur la voie, entre les deux rails, et contenant un piston auquel le train était attaché. Une machine pneumatique puissante, placée à l'extrémité de la ligne, faisait le vide dans ce tube : la pression atmosphérique, s'exerçant sur le piston de l'autre côté, l'entraînait progressivement, avec le train, jusqu'au sommet de la côte (\*).

Le *télégraphe pneumatique*, qui sert à l'envoi de dépêches manuscrites dans les divers quartiers d'une ville, se compose d'une série de tubes souterrains et se rendant d'une station à une autre : une sorte de piston creux, contenant les dépêches dans son intérieur, est introduit dans le tube, à la station de départ; on le fait parvenir à la station suivante, en injectant dans le tube de l'air comprimé.

Les *cloches à plongeur*, dans lesquelles se placent les ouvriers pour les travaux à effectuer sous l'eau, sont de grands cylindres métalliques, ouverts par leur partie inférieure, et dans lesquels des pompes de compression, placées sur le rivage, refoulent continuellement de l'air; de cette façon, l'eau ne peut pas pénétrer dans la cloche, et l'air se renouvelle sans cesse, en s'échappant par le pourtour de la cloche.

Les *machines perforatrices*, comme celles qui ont servi à pratiquer les trous de mine pour le percement des tunnels du mont Cenis ou du Saint-Gothard, comprennent, comme partie essentielle, des espèces de *fleurcets*, supportés par des pistons et destinés à creuser progressivement la roche, par des chocs répétés. Le mouvement est produit par une injection brusque d'air comprimé, à une pression considérable;

(\*) Ce système, appliqué aussi en Irlande et en divers points de l'Angleterre, a été abandonné depuis l'invention des *locomotives de montagnes*, qui permettent également de graver les pentes, et dont l'emploi est beaucoup moins coûteux.



Fig. 157. — Fontaine de compression.

quant à la compression préalable de l'air dans les réservoirs, elle est le plus souvent produite par des chutes d'eau, que l'on trouve en abondance dans les pays de montagnes.

Les freins que l'on emploie sur la plupart des lignes de chemins de fer, pour arrêter les trains en quelques secondes, sont commandés par des pistons, placés dans des cylindres installés sous chaque wagon. Une petite machine à vapeur, installée sur la locomotive, sert à entretenir une provision d'air comprimé, dans un réservoir à parois très résistantes. Il suffit de faire arriver cet air dans les cylindres, sur l'une des faces des pistons, pour que tous les freins entrent en jeu à la fois. — Dans d'autres systèmes (freins à vide), on fait communiquer les cylindres avec un réservoir vide d'air : c'est alors la pression atmosphérique qui met en mouvement les pistons des freins.

## II. — POMPES A LIQUIDES.

181. **Diverses espèces de pompes à liquides.** — Longtemps avant d'être appliquées à la raréfaction ou à la compression des gaz, les pompes avaient été employées à élever l'eau.

Les pompes à eau peuvent être rapportées à trois types principaux : la pompe aspirante, la pompe foulante, et la pompe aspirante et foulante.

182. **Pompe aspirante.** — La pompe aspirante (fig. 138) se compose d'un corps de pompe CC' dans lequel se meut un piston P, et qui présente, à sa partie inférieure, un tuyau d'aspiration T plongeant dans le puisard mn dont on veut enlever l'eau; à sa partie supérieure se trouve un tuyau de déversement D. A la jonction du corps de pompe et du tuyau d'aspiration est une soupape ou clapet S, qui consiste en une plaque métallique, garnie de cuir en dessous et mobile autour d'une charnière. Le piston est traversé, parallèlement à son axe, par deux ouvertures munies de clapets s, s' (fig. 139); il est garni d'étoupes sur son contour. La tige du piston s'articule avec un levier, au moyen duquel



Fig. 138.  
Pompe aspirante.

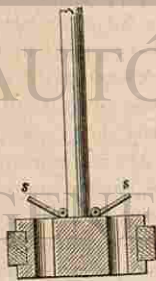


Fig. 139.

on lui imprime les mouvements d'ascension et de descente. Supposons que, la pompe n'ayant pas encore fonctionné, on soulève

pour la première fois le piston. Ce mouvement tendant à produire une raréfaction de l'air au-dessous du piston, la soupape S se soulève : elle laisse passer une partie de l'air qui était dans le tuyau d'aspiration, et qui acquiert ainsi une pression moindre que la pression atmosphérique; par suite, l'eau du puisard s'élève dans le tuyau T, jusqu'à ce que la pression de la colonne d'eau, augmentée de la force élastique de l'air intérieur, produise une pression totale égale à la pression atmosphérique qui s'exerce extérieurement sur mn. — Supposons que l'eau n'atteigne pas encore le point S, au moment où le piston arrive au haut de sa course : l'équilibre de force élastique étant établi au-dessus et au-dessous du clapet S, ce clapet retombe par son propre poids. Quand le piston redescend, il comprime l'air contenu dans le corps de pompe; il lui fait bientôt acquérir une force élastique suffisante pour que les soupapes s et s' se soulèvent, et laissent échapper cet air au dehors. — Quand le piston est soulevé de nouveau, l'eau s'élève un peu plus encore dans le tuyau d'aspiration, et ainsi de suite, jusqu'au moment où l'eau franchit la soupape S : la pompe est alors amorcée. Ce résultat pourra toujours être obtenu, à la condition que le tuyau d'aspiration n'ait pas une hauteur supérieure à 10 mètres environ, au-dessus du niveau mn (\*).

La pompe une fois amorcée, on continue à faire fonctionner le piston. Chaque fois qu'il descend, l'eau enfermée dans le corps de pompe franchit les soupapes s, s'. Chaque fois qu'il remonte, il soulève l'eau que supporte sa face supérieure, et la fait écouler par le tuyau de déversement D; en même temps, il fait pénétrer une nouvelle quantité d'eau du puisard dans le tuyau d'aspiration et dans le corps de pompe.

185. **Effort à développer pour mettre la pompe en mouvement.** — Quand le piston descend, les clapets s et s' étant ouverts, il y a communication entre le liquide qui est au-dessus de lui et celui qui est au-dessous; les pressions que supportent ses deux faces sont donc sensiblement égales. L'effort qu'il faut exercer, pour faire descendre le piston, est donc seulement employé à vaincre les frottements.

Voyons maintenant quel est l'effort à développer pour faire monter le piston. — Représentons par H la pression atmosphérique, évaluée en colonne d'eau; soit, à un moment quelconque, h la hauteur du piston au-dessus du niveau de l'eau mn, et h' la hauteur de l'eau au-dessus du piston, jusqu'au tuyau de déversement D. — La pression que le piston supporte de haut en bas, sur sa face supérieure, est exprimée, pour l'unité de surface, par  $H + h'$ ; la pression qu'il supporte de bas en

(\*) L'expérience montre que, dans la pratique, l'eau ne peut même pas atteindre cette hauteur, à cause des rentrées d'air qui se produisent entre le piston et le corps de pompe, et aussi à cause de l'espace nuisible qui reste toujours au-dessous du piston quand il est au bas de sa course. Aussi, ne donne-t-on guère aux tuyaux d'aspiration plus de 7 à 8 mètres.

haut, sur sa face inférieure, est exprimée, pour l'unité de surface, par  $H - h$ . La résultante de ces deux pressions, rapportée toujours à l'unité de surface, est exprimée par la différence  $(H + h) - (H - h)$ , ou  $h + h$ . Dès lors, si  $S$  est la surface du piston, la pression qui le sollicite, de haut en bas, est  $S(h + h)$ . — On voit donc que l'effort à développer, pour soulever le piston, est représenté par le poids d'une colonne d'eau ayant pour base le piston, et pour hauteur la distance verticale du tuyau de déversement au niveau de l'eau dans le puisard. Cette force est, en général, assez considérable : il est donc avantageux de l'exercer par l'intermédiaire d'un levier (\*).

**184. Travail, par coup de piston.** — Soit  $s$  la surface du piston, exprimée en centimètres carrés, et  $h$  la distance du tuyau de déversement au niveau du puisard, exprimée en centimètres. Pour soulever le piston d'un mouvement uniforme, la force nécessaire est égale (185) au poids d'une colonne d'eau dont le volume en centimètres cubes serait  $sh$ ; c'est donc une force de  $shg$  dynes. Si maintenant on désigne par  $l$  la longueur du corps de pompe en centimètres, le travail, pour chaque coup de piston, est égal à  $shg \times l$  ergs.

Enfin, en remarquant que  $slg$  est le poids de l'eau élevée par coup de piston, et que  $h$  est la hauteur à laquelle cette masse a été élevée, on voit que le produit  $slg \times h$  est l'accroissement de son énergie potentielle (51).

Le travail dépensé par coup de piston  $shg \times l$  est donc égal à l'accroissement d'énergie potentielle  $slg \times h$  de la masse d'eau soulevée.

**185. Pompe foulante.** — La pompe foulante (fig. 160) se compose d'un corps de pompe  $CC'$  entièrement immergé dans l'eau du puisard  $mn$ , d'un piston  $P$ , et d'un tuyau de refoulement  $R$  qui prend naissance à la partie inférieure du corps de pompe. A la base du corps de pompe, est une ouverture, avec un clapet  $S$  qui s'ouvre de dehors en dedans; à la jonction du corps de pompe et du tuyau de refoulement, est une seconde soupape  $s$  qui s'ouvre de dedans en dehors.

Quand on soulève le piston, l'eau pénètre dans le cylindre, en franchissant la soupape  $S$ , pour remplir le vide qui tendrait à se former dans le corps de pompe. Quand on fait descendre le piston, la soupape  $S$  se ferme : la pression qu'on exerce sur l'eau ouvre la soupape  $s$ , et chasse l'eau du corps de pompe dans le tuyau de refoulement. — Dès que le liquide a atteint l'extrémité supérieure du tuyau de refoulement, la pompe débite, à chaque coup de piston, un volume d'eau égal à la capacité du corps de pompe. Mais l'écoulement du liquide se



Fig. 160.  
Pompe foulante.

(\*) Quant au levier lui-même, on peut remarquer que, dans la pompe aspirante,

produit pendant la descente du piston : c'est le contraire de ce qui avait lieu dans la pompe aspirante.

**186. Effort à développer.** — On verra, en raisonnant comme dans le cas précédent : 1° que l'effort à développer pour faire monter le piston est ici à peu près insignifiant; 2° que, pour le faire descendre, il faut lui appliquer une force au moins égale au poids d'une colonne d'eau ayant pour base le piston, et pour hauteur la distance verticale de l'orifice d'écoulement au niveau de l'eau dans le puisard (\*).

Mais les deux systèmes de pompes que nous venons d'étudier présentent, en outre, cette différence essentielle, que la pompe aspirante ne peut élever l'eau que jusqu'à une hauteur limitée (182), tandis que la pompe foulante, théoriquement du moins, peut l'élever à une hauteur quelconque, pourvu qu'on applique au piston une force suffisante. — Dans la pratique, il y a toujours, pour chaque pompe, une limite de hauteur, qui dépend de la résistance des parois et de l'adaptation plus ou moins parfaite de ses diverses pièces mobiles.

**187. Travail, par coup de piston.** — On démontrerait, comme pour la pompe aspirante (184), que le travail par coup de piston est égal à  $shg \times l$  ergs,  $s^{\text{cont}}$  désignant la surface du piston,  $l^{\text{cont}}$  la course du piston, et  $h^{\text{cont}}$  la distance du niveau du puisard à l'extrémité supérieure du tuyau de refoulement.

L'accroissement d'énergie potentielle de la masse d'eau élevée est  $slg \times h$  ergs; elle est égale au travail mécanique dépensé.

**188. Pompe à incendie.** — La pompe à incendie (fig. 161) est une pompe foulante. Elle présente, comme la machine pneumatique ordinaire, un système de deux corps de pompes accouplés; ils sont établis l'un à côté de l'autre dans une même auge, qui sera maintenue constamment pleine d'eau pendant la manœuvre. Les pistons  $a, a$ , sont mis en mouvement au moyen d'un levier  $OO$ , mobile autour d'un axe horizontal qui passe par son milieu; tandis que l'un des pistons s'élève, l'autre s'abaisse, et inversement. Au lieu de faire pénétrer l'eau directement dans le tuyau de refoulement, ils la font passer dans un réservoir  $e$  qui contient de l'air; le tuyau de refoulement  $dd$  prend naissance vers la partie inférieure de ce réservoir. Quand le piston de gauche

c'est un levier du premier genre (fig. 163), c'est-à-dire dont le point fixe est placé entre le point d'application de la résistance à vaincre et le point sur lequel s'exerce l'effort du bras qui le manœuvre. Il en résulte que l'effort à développer, pour faire monter le piston, se produit en appuyant sur l'extrémité du levier, ce qui est, en raison de la conformation de nos organes, la disposition la moins fatigante.

(\*) Le levier, dans la pompe foulante, est un levier du second genre, c'est-à-dire dans lequel le point fixe est à l'une des extrémités du levier; l'effort s'exerce à l'autre extrémité, et la résistance est appliquée entre ces deux points. C'est donc encore en appuyant sur le levier qu'on triomphe de la résistance, ce qui est, comme nous l'avons fait remarquer (note précédente), la disposition la plus favorable, eu égard à la conformation de nos organes.

descend, le clapet *b* qui lui correspond se ferme, l'eau soulève le clapet *c*, et pénètre dans le réservoir *e*, dont elle comprime l'air; c'est

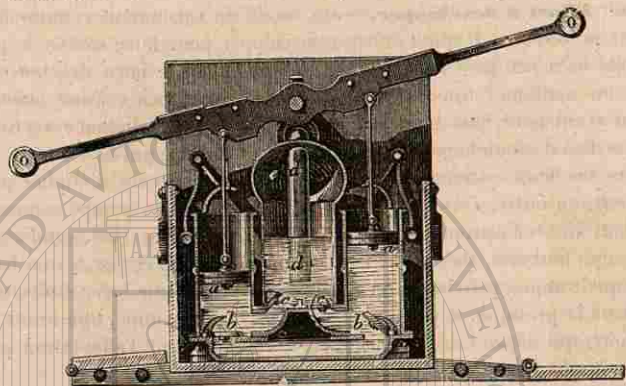


Fig. 161. — Pompe à incendie.

alors la force élastique de cet air qui fait monter l'eau dans le tuyau de refoulement. Quand le piston de gauche remonte, c'est le piston de droite qui chasse l'eau dans le réservoir, et qui produit un effet semblable. L'air étant sans cesse comprimé dans le réservoir *e*, même aux instants où le mouvement des pistons change de sens, il en résulte un jet sensiblement régulier, par le tube de cuivre ou *lance*, qui termine le tuyau de refoulement. — Pour manœuvrer la pompe, deux groupes d'hommes appuient alternativement sur des barres de bois qui traversent les deux extrémités du levier.



[Fig. 162.

été dit dans les cas précédents.

Nous ferons remarquer enfin que, pour peu que le tuyau de refoulement *R* présente une assez grande hauteur, l'eau exerce sur la face

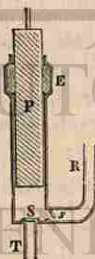


Fig. 163.  
Piston plongeur.

inférieure du piston une pression qui tend à chasser le liquide entre le piston et la paroi du corps de pompe. — On parvient à réaliser une fermeture plus exacte au moyen d'un *piston plongeur* (fig. 163) : c'est un cylindre métallique *P*, dont la hauteur est à peu près égale à celle du corps de pompe; il ne touche pas la paroi du cylindre, mais il traverse une garniture d'étoupes *E*, installée



Fig. 164.

à demeure à la partie supérieure du corps de pompe. Le piston prend ainsi, en descendant, la place de l'eau qu'il chasse dans le tuyau de refoulement.

#### 190. Pompe aspirante et élévatoire.

— On modifie quelquefois la construction de la pompe *aspirante*, de manière à la rendre capable d'élever l'eau à une hauteur plus ou moins grande dans un *tuyau d'ascension* *E* (fig. 164).

On ferme alors le corps de pompe à sa partie supérieure, et l'on fait passer la tige du piston dans une garniture d'étoupes fixe. A chaque ascension, en même temps que le piston aspire l'eau du puisard, il élève dans le tuyau *E* l'eau qui est au-dessus de lui. Lorsque le piston redescend, le clapet *S* se ferme, et le liquide traverse les orifices des clapets *s* et *s'*, tandis que son niveau demeure immobile dans le tuyau d'ascension. — Cette disposition a reçu le nom de pompe *aspirante et élévatoire*. — On reconnaîtra facilement que, dans cette pompe, l'effort à développer, pour élever l'eau jusqu'au sommet du tuyau d'ascension, est égal au poids d'une colonne liquide ayant pour base le piston et pour hauteur la

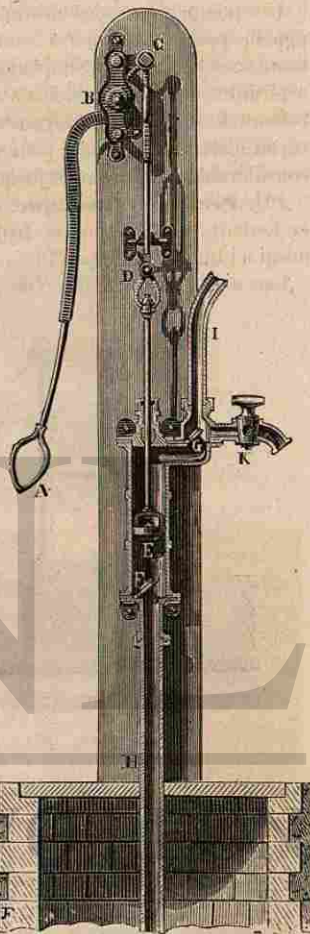


Fig. 165. — Pompe ménagère.

distance verticale de l'orifice d'écoulement au niveau de l'eau dans le puisard.

Les pompes qui sont destinées aux usages domestiques, et qu'on appelle *pompes ménagères*, sont souvent disposées pour servir, à volonté, comme pompes simplement aspirantes, ou bien comme pompes aspirantes et élévatoires. Dans celle que représente la figure 165, si le robinet K du tuyau de déversement est fermé, l'eau pénètre dans le tuyau d'ascension I: elle peut s'y élever à une hauteur plus ou moins considérable, par exemple jusqu'aux étages supérieurs d'un édifice (\*).

191. **Presse hydraulique.** — Nous retrouvons la pompe aspirante et foulante dans la presse hydraulique, dont nous n'avons indiqué jusqu'ici que le principe (70).

Une petite pompe F (fig. 166), à piston plongeur, puise l'eau dans un

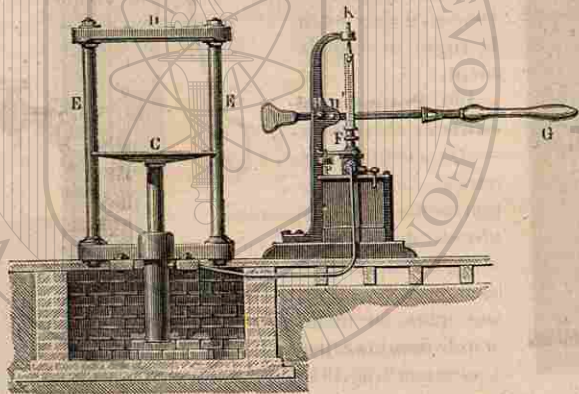


Fig. 166. — Presse hydraulique.

réservoir placé au-dessous, et la refoule, par un tuyau que l'on voit en avant de la figure, dans un gros cylindre qui contient aussi un piston plongeur, surmonté d'un plateau C; au-dessus de ce plateau, est une plate-forme fixe D, invariablement reliée au cylindre par des colonnes

(\*) Pour extraire des mines les eaux qui s'y accumulent, on emploie en général un système de pompes élévatoires, établies à différentes hauteurs dans un puits vertical; chacune d'elles élève l'eau dans une bêche, d'où elle est reprise par la pompe placée immédiatement au-dessus. Les tiges de tous les pistons sont fixées à une même tige verticale, qui s'étend dans toute la hauteur du puits (*maitresse tige*), et qui reçoit son mouvement d'une machine.

Cette disposition rend inutile l'emploi des pistons plongeurs, auxquels il faudrait recourir si l'on voulait élever l'eau, d'un seul jet, à une grande hauteur, au moyen d'une pompe foulante unique; elle permet aussi de n'employer à ce genre de service que des pompes assez grossières, puisque chacune d'elles ne doit élever l'eau qu'à une hauteur peu considérable.

de fonte E, E. Les objets qu'on veut soumettre à l'action de la presse sont placés entre les deux plateaux. — Chaque fois que le piston de la petite pompe descend, l'eau qui est refoulée dans le gros cylindre fait monter le gros piston d'une petite quantité, en sorte que les corps placés entre C et D éprouvent une compression progressive. — La tige du piston de la pompe F se manœuvre au moyen du levier GH, mobile autour du point fixe H; elle est guidée dans son mouvement par l'anneau K. Un homme, en appuyant sur l'extrémité G, produit sur le piston une pression qui est égale à sa propre force multipliée par le rapport du grand bras de levier au petit: la pression développée sur

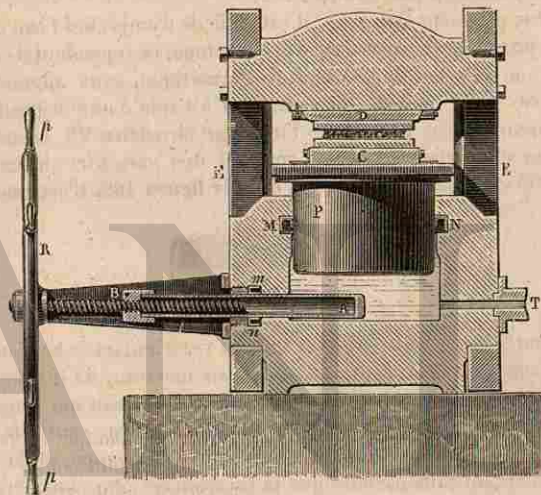


Fig. 167. — Presse hydraulique.

les corps comprimés s'obtient en multipliant encore cette expression par le rapport de la section du gros piston à la section du petit. On conçoit qu'on puisse arriver ainsi à des pressions considérables (\*).

Une modification récente, due à M. Desgoffe, permet d'atteindre des pressions bien plus considérables encore qu'avec les anciens appareils. Cette modification consiste dans l'addition, à la base du gros corps de pompe, d'un cylindre d'acier A (fig. 167), que l'on peut y faire péné-

(\*) Il faut remarquer cependant que l'avantage de cette machine est essentiellement de permettre de vaincre, avec une force motrice relativement petite, une résistance considérable; mais, comme dans toutes les machines qu'on étudie en Mécanique, ce qu'on gagne en force, on le dépense en *chemin parcouru*. En effet, si la section du gros piston est égale à 100 fois celle du petit, la quantité dont s'élève le gros piston, pour chaque mouvement de descente du petit, est 100 fois moindre; le *travail résistant* est donc égal au *travail moteur*.

trer au moyen d'une vis; cette vis elle-même est mise en mouvement par la roue R, que l'on manœuvre à l'aide de poignées *p.p.* Le cylindre A est creux, et porte un écrou B dans lequel s'engage le pas de la vis. — Tant qu'on fait fonctionner la petite pompe, qui refoule l'eau dans le gros corps de pompe par le tuyau T, on laisse le cylindre A dans une position telle qu'il pénètre à peine dans ce corps de pompe. Lorsque la pression a acquis une valeur telle que la pompe foulante ne puisse plus fonctionner, on manœuvre la vis V de façon à faire pénétrer le cylindre A autant que possible: le piston P continue encore à s'élever, et on parvient ainsi à exercer, entre les plateaux C et D, des pressions beaucoup plus grandes.

Sous ces pressions énormes, il est difficile d'empêcher l'eau de filtrer entre le piston et la paroi du corps de pompe, et cependant il est indispensable de réaliser une fermeture hermétique, sans augmenter les frottements outre mesure. On y parvient à l'aide d'une disposition due à l'ingénieur anglais Bramah. — Une gorge circulaire MN, creusée dans l'épaisseur du corps de pompe, contient une garniture de cuir, dont une moitié est représentée à part dans la figure 168. C'est une plaque



Fig. 168.

de cuir, en forme d'anneau, dont le bord extérieur et le bord intérieur ont été *emboutis*, c'est-à-dire repoussés au marteau, de manière à lui donner la forme d'une sorte de rigole renversée. L'eau qui presse dans la concavité de cette rigole applique son bord interne contre le piston, son bord externe contre la paroi du corps de pompe, et la fermeture est d'autant plus parfaite que la pression est plus considérable (\*).

La presse hydraulique reçoit de nombreuses applications dans l'industrie. Elle est employée pour extraire les huiles de diverses graines; pour exprimer le suc de la betterave; on l'emploie également dans la fabrication des bougies, du papier, du vermicelle, etc.

(\*) Pour éviter de dépasser la limite de pression compatible avec la résistance de l'appareil, on dispose, près de la pompe F (fig. 166), une soupape de sûreté, représentée à part dans la figure 169. Un petit bouchon métallique O, de forme conique, placé au-dessus du canal par lequel l'eau se rend au corps de pompe, intercepte un canal latéral (figuré à gauche), par lequel l'eau pourrait s'écouler au dehors: il supporte, sur sa tête, la pression produite par un levier chargé d'un poids P à son extrémité. La grandeur de ce poids et sa position sur le levier sont calculées de manière que la soupape Q cède à la pression du liquide, lorsque cette pression atteint une limite déterminée.

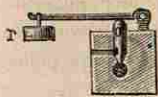


Fig. 169.

## III. — SIPHON, VASE DE MARIOTTE.

192. **Siphon.** — Le siphon est un tube formé de deux branches d'inégales longueurs, et destiné au transvasement des liquides.

Pour qu'un siphon puisse fonctionner, il faut d'abord qu'il soit *amorcé*, c'est-à-dire que le tube *ABB'A'* (fig. 170), plongeant par ses extrémités dans deux vases *MN, M'N'* remplis d'un même liquide, soit lui-même rempli de ce liquide. — Admettons, pour un instant, qu'il existe en *mn* une cloison solide fixée aux parois du tube, à une distance *z* de *MN*.

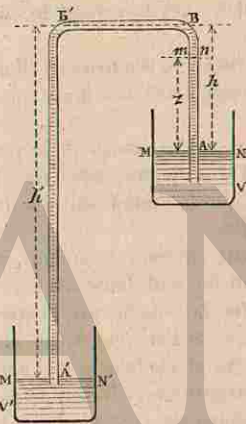


Fig. 170.

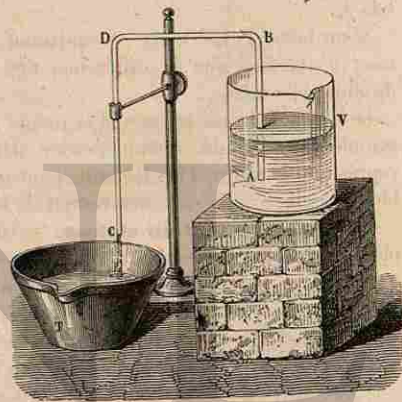


Fig. 171.

à une distance  $z'$  de  $MN$ . Nous pourrions assimiler les deux branches du siphon à deux éprouvettes  $Amm, A'B'mn$ , remplies du même liquide, et retournées sur deux cuvettes  $V$  et  $V'$ . Pour que le liquide reste suspendu dans les éprouvettes, il faut que les distances verticales  $z$  et  $z'$  soient l'une et l'autre moindres que la hauteur  $H$  du liquide qui ferait équilibre à la pression atmosphérique. S'il en était autrement, le liquide descendrait dans les deux branches et resterait suspendu dans chaque branche à une hauteur  $H$  au-dessus du niveau de la cuvette. — Or les plus grandes valeurs de  $z$  et de  $z'$  sont  $h$  et  $h'$ , distances verticales des deux surfaces libres  $MN$  et  $M'N'$  au point le plus élevé du tube. Pour que le siphon *reste amorcé*, il faut donc que les hauteurs verticales des deux branches soient plus petites que la hauteur  $H$  de la colonne du liquide à transvaser, qui ferait équilibre à la pression atmosphérique. Cette condition étant supposée remplie, la pression que supporte la

cloison  $mn$  de bas en haut, eu égard à la pression atmosphérique qui s'exerce en  $MN$ , sera exprimée par  $H - z$ ; la pression que supporte la cloison de haut en bas est plus petite; eu égard à la pression atmosphérique qui s'exerce en  $M'N'$ , elle est exprimée par  $H - z'$ ; et la différence de ces pressions est  $z' - z = h' - h$ .

Les valeurs de ces pressions ne sont pas modifiées, si la cloison n'est pas adhérente aux parois du tube; la cloison est donc sollicitée à se mouvoir, de  $A$  en  $A'$ , par une force proportionnelle à la différence des niveaux dans les deux vases  $V$  et  $V'$ . Ce résultat étant indépendant de la valeur de  $z$ , toutes les tranches sont sollicitées à se mouvoir dans le même sens, par des pressions dont la valeur est la même. Donc l'équilibre ne peut exister; l'expérience montre, en effet, que le liquide se met en mouvement du niveau le plus haut  $A$  vers le niveau le plus bas  $A'$ .

Si on laisse l'expérience se continuer, la vitesse d'écoulement diminue, à mesure que la différence des niveaux dans les deux vases diminue elle-même.

Le liquide s'écoule encore de la même façon, si l'extrémité de la plus grande branche du siphon s'ouvre dans l'atmosphère, ainsi que le représente la figure 171. Il suffit, pour cela, que le siphon soit préalablement amorcé, c'est-à-dire rempli de liquide.

195. **Amorçement du siphon.** — On peut amorcer le siphon, en plongeant la petite branche dans le vase dont on veut faire écouler le liquide, et aspirant avec la bouche par l'extrémité de l'autre branche. — Si l'on veut éviter que le liquide puisse arriver jusqu'à la bouche de l'opérateur, on emploie la disposition représentée par la figure 172. Au voisinage de l'extrémité de la grande branche, est soudé un tube ascendant  $am$ : on plonge l'extrémité  $A$  dans le liquide, et l'on aspire par l'ouverture  $m$ , en bouchant avec le doigt l'extrémité  $C$ . Dès que le liquide arrive en  $a$ , on retire le doigt et l'on cesse d'aspirer. Tout se passe alors comme si la branche  $BC$  se terminait

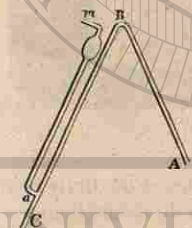


Fig. 172.

en  $a$ , puisque la pression de l'atmosphère s'exerce en ce point par le tube  $ma$ .

La disposition suivante peut encore être employée. Un siphon  $ABC$  (fig. 175) passe au travers d'un bouchon, qui ferme hermétiquement le vase contenant le liquide. Un tube  $T$  pénètre également au travers du bouchon et vient s'ouvrir à la partie supérieure du vase. — On comprime avec la bouche, par le tube  $T$ , l'air qui presse sur la surface libre  $MN$ , jusqu'à ce que le liquide, s'élevant dans la petite branche du siphon, descende ensuite dans la grande branche jusqu'au-dessous du plan horizontal mené par  $MN$ : on peut alors retirer la bouche, et

l'écoulement continue sous l'action de la pression atmosphérique. — Pour arrêter l'écoulement, il suffit d'aspirer par le tube  $T$  jusqu'à ce que le liquide remonte, dans la grande branche, au-dessus du plan horizontal mené par  $MN$ . — Cette disposition permet donc de produire ou d'arrêter à volonté l'écoulement, en laissant le siphon installé jusqu'à ce que le vase soit vide.

194. **Vase de Tantale.** — Le siphon permet d'obtenir un écoulement intermittent, en employant la disposition connue sous le nom de vase de Tantale. — Un vase (fig. 174), percé d'une ouverture à sa partie inférieure, contient un siphon, dont la grande branche est assujettie dans un bouchon qui ferme cette ouverture. Lorsqu'on verse

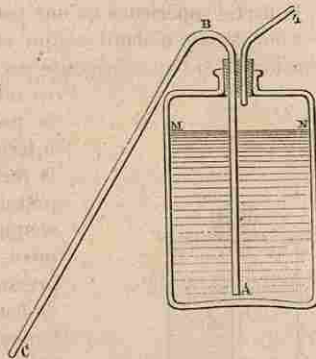
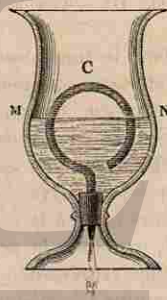


Fig. 175.

de l'eau dans le vase, elle pénètre successivement dans la branche de droite, où son niveau est d'abord dans le même plan horizontal qu'à l'extérieur; puis, au moment où le niveau dans le vase atteint le sommet  $C$  de la courbure, l'eau passe dans la branche de gauche, qu'elle remplit dans toute sa longueur: l'écoulement continue, jusqu'à ce que le niveau  $MN$  de l'eau se soit abaissé au-dessous de l'extrémité de la petite branche. — Si le vase est alimenté, à sa partie supérieure, par un robinet ayant un débit continu, mais moindre que celui du siphon, on obtiendra un écoulement intermittent et périodique, le vase ne se remplissant jamais plus haut que la courbure  $C$  du siphon.

Fig. 174.  
Vase de Tantale.

195. **Vase de Mariotte.** — En général, quand un liquide s'écoule par une ouverture pratiquée dans un vase, la vitesse d'écoulement diminue d'une manière progressive, parce que la pression du liquide, au niveau de l'ouverture, va en diminuant avec la hauteur de sa surface libre au-dessus de ce point. — On donne le nom de Vase de Mariotte à une disposition qui est destinée à rendre la vitesse d'écoulement constante.

Soit un flacon  $C$  (fig. 175), percé vers sa partie inférieure d'une ouverture  $A$  assez petite pour ne laisser passage qu'à un mince filet de liquide: le col du flacon est fermé par un bouchon, traversé par un tube  $T$  dont l'extrémité inférieure  $B$  est à une certaine distance verticale  $b$  au-dessus de l'ouverture  $A$ . Supposons que, l'ouverture  $A$  étant



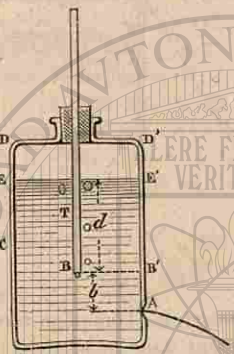
fermée, on ait rempli le vase presque complètement d'eau, jusqu'à une hauteur  $d$  au-dessus de l'extrémité B du tube, de manière à ne laisser à la partie supérieure qu'une petite quantité d'air.

Considérons d'abord ce qui se passe au moment où l'on débouche l'orifice A. Si l'on représente par  $H$  la pression atmosphérique évaluée en colonne d'eau, on voit que, au point A, la pression extérieure est  $H$ ; la pression intérieure est représentée par la somme de la force élastique de l'air intérieur et de la pression du liquide au-dessus de A : cette somme est  $H + d + b$ . Dès lors, à ce moment, l'eau s'écoule par l'orifice, sous une pression représentée par une colonne d'eau de hauteur  $d + b$ . — Mais, dès que cet écoulement se produit, le volume de l'air enfermé dans le flacon augmente; par suite, sa force élastique diminue, et l'on voit le niveau de l'eau s'abaisser rapidement à l'intérieur du tube T, sous l'action de la pression atmosphérique qui s'exerce dans ce tube. Il arrive, très promptement, que le niveau du liquide

Fig. 175. — Vase de Mariotte.

dans le tube descend jusqu'à l'extrémité inférieure B, et alors l'air extérieur commence à pénétrer par cette extrémité, sous forme de bulles qui se rendent à la partie supérieure du flacon. — A partir de ce moment, la vitesse d'écoulement par l'orifice A devient constante. En effet, quel que soit l'abaissement progressif de la surface libre EE', la pression exercée sur les divers points du plan horizontal BB' reste toujours égale à la pression atmosphérique  $H$ , qui s'exerce directement en B; par suite la pression intérieure, au niveau de l'orifice A, est toujours représentée par  $H + b$ . En d'autres termes, la pression qui détermine l'écoulement est toujours représentée par une colonne d'eau de hauteur  $b$ .

Il en est ainsi tant que le niveau EE' de la surface libre dans le flacon n'est pas descendu au-dessous de l'extrémité B du tube; et en effet, si l'on observe la distance à laquelle arrive le jet sur un plan horizontal, on constate qu'elle reste constante. — C'est cette période de l'écoulement qu'on utilise dans les applications.



## LIVRE DEUXIÈME

### CHALEUR

#### CHAPITRE PREMIER

##### DILATATION

###### I. — DILATATION DES CORPS PAR LA CHALEUR.

196. **Accroissement de longueur des barres solides sous l'action de la chaleur.** — Tous les corps, sauf quelques rares exceptions, éprouvent, quand on les chauffe, un accroissement dans leurs diverses dimensions. C'est le phénomène désigné sous le nom général de *dilatation*. — Nous allons constater d'abord que les corps solides, pris sous la forme de barres, s'allongent quand on les chauffe.

Le *pyromètre à talon*, tel que le représente la figure 176, comprend deux barres métalliques dont la longueur est telle, que, à la température ordinaire, elles pénètrent exactement dans des encoches qui sont pratiquées dans des talons de métal T, T', fixés sur une planche MN. Lorsqu'on chauffe une de ces barres sur un fourneau, et qu'on la replace sur l'appareil, on constate que sa longueur est devenue trop grande pour qu'elle puisse pénétrer dans les encoches. — Elle y retombe d'elle-même, quand on la laisse refroidir jusqu'à la température ordinaire.



Fig. 176. — Pyromètre à talon.

Le *pyromètre à levier* (fig. 177) permet d'apprécier mieux encore les variations progressives de longueur qu'éprouve une tige, lorsqu'on fait varier sa température. — Une tige métallique AB traverse deux colonnes C et C'; elle est fixée en A au moyen d'une vis, passe librement dans

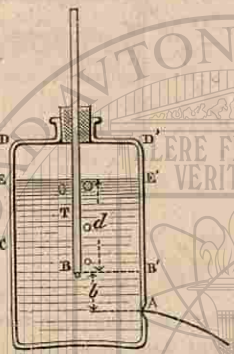
fermée, on ait rempli le vase presque complètement d'eau, jusqu'à une hauteur  $d$  au-dessus de l'extrémité B du tube, de manière à ne laisser à la partie supérieure qu'une petite quantité d'air.

Considérons d'abord ce qui se passe au moment où l'on débouche l'orifice A. Si l'on représente par  $H$  la pression atmosphérique évaluée en colonne d'eau, on voit que, au point A, la pression extérieure est  $H$ ; la pression intérieure est représentée par la somme de la force élastique de l'air intérieur et de la pression du liquide au-dessus de A : cette somme est  $H + d + b$ . Dès lors, à ce moment, l'eau s'écoule par l'orifice, sous une pression représentée par une colonne d'eau de hauteur  $d + b$ . — Mais, dès que cet écoulement se produit, le volume de l'air enfermé dans le flacon augmente; par suite, sa force élastique diminue, et l'on voit le niveau de l'eau s'abaisser rapidement à l'intérieur du tube T, sous l'action de la pression atmosphérique qui s'exerce dans ce tube. Il arrive, très promptement, que le niveau du liquide

Fig. 175. — Vase de Mariotte.

dans le tube descend jusqu'à l'extrémité inférieure B, et alors l'air extérieur commence à pénétrer par cette extrémité, sous forme de bulles qui se rendent à la partie supérieure du flacon. — A partir de ce moment, la vitesse d'écoulement par l'orifice A devient constante. En effet, quel que soit l'abaissement progressif de la surface libre EE', la pression exercée sur les divers points du plan horizontal BB' reste toujours égale à la pression atmosphérique  $H$ , qui s'exerce directement en B; par suite la pression intérieure, au niveau de l'orifice A, est toujours représentée par  $H + b$ . En d'autres termes, la pression qui détermine l'écoulement est toujours représentée par une colonne d'eau de hauteur  $b$ .

Il en est ainsi tant que le niveau EE' de la surface libre dans le flacon n'est pas descendu au-dessous de l'extrémité B du tube; et en effet, si l'on observe la distance à laquelle arrive le jet sur un plan horizontal, on constate qu'elle reste constante. — C'est cette période de l'écoulement qu'on utilise dans les applications.



## LIVRE DEUXIÈME

### CHALEUR

#### CHAPITRE PREMIER

##### DILATATION

###### I. — DILATATION DES CORPS PAR LA CHALEUR.

196. **Accroissement de longueur des barres solides sous l'action de la chaleur.** — Tous les corps, sauf quelques rares exceptions, éprouvent, quand on les chauffe, un accroissement dans leurs diverses dimensions. C'est le phénomène désigné sous le nom général de *dilatation*. — Nous allons constater d'abord que les corps solides, pris sous la forme de barres, s'allongent quand on les chauffe.

Le *pyromètre à talon*, tel que le représente la figure 176, comprend deux barres métalliques dont la longueur est telle, que, à la température ordinaire, elles pénètrent exactement dans des encoches qui sont pratiquées dans des talons de métal T, T', fixés sur une planche MN. Lorsqu'on chauffe une de ces barres sur un fourneau, et qu'on la replace sur l'appareil, on constate que sa longueur est devenue trop grande pour qu'elle puisse pénétrer dans les encoches. — Elle y retombe d'elle-même, quand on la laisse refroidir jusqu'à la température ordinaire.



Fig. 176. — Pyromètre à talon.

Le *pyromètre à levier* (fig. 177) permet d'apprécier mieux encore les variations progressives de longueur qu'éprouve une tige, lorsqu'on fait varier sa température. — Une tige métallique AB traverse deux colonnes C et C'; elle est fixée en A au moyen d'une vis, passe librement dans

la colonne C, et vient appuyer en B contre la petite branche d'un levier coudé BDE, mobile autour du point D. La grande branche DE de ce levier a la forme d'une aiguille, dont l'extrémité peut parcourir un cadran divisé FF'. — Quand on chauffe la tige, en enflammant de l'alcool placé dans le réservoir GG', la tige s'allonge: comme son extrémité A est fixe, l'autre extrémité se déplace et pousse la branche DB du levier,

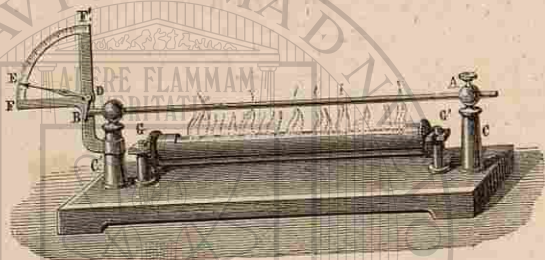
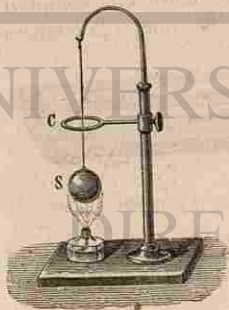


Fig. 177. — Pyromètre à levier.

en la faisant tourner autour du point D. Si DE est, par exemple, égal à dix fois DB, l'arc décrit par l'extrémité E a une longueur égale à dix fois celle de l'arc décrit par l'extrémité B de la petite branche, lequel se confond sensiblement avec le déplacement de l'extrémité de la tige. On voit donc que l'emploi du levier coudé permet d'amplifier la dilatation de la tige, et de la rendre ainsi facile à constater. — Si on laisse refroidir la tige, l'aiguille DE revient à sa position primitive.

197. **Accroissement de volume des corps solides sous l'action de la chaleur.** — L'anneau de S'Gravesande permet de constater l'augmentation de volume des corps solides qu'on échauffe. A froid, la sphère de cuivre S (fig. 178) passe exactement à travers l'anneau de cuivre C: lorsqu'on vient à chauffer la sphère à l'aide d'une lampe à alcool, sans chauffer l'anneau, on constate que la sphère ne traverse plus l'anneau, dans quelque sens qu'on la présente; elle a donc éprouvé un accroissement de volume. Quand on la laisse refroidir, ses dimensions redeviennent ce qu'elles étaient avant l'expérience. — Si l'on chauffe en même temps la sphère et l'anneau, on constate que les dimensions intérieures de l'anneau restent

Fig. 178.  
Anneau de S'Gravesande.

égales aux dimensions extérieures de la sphère. On peut encore donner à cette expérience une forme un peu diffé-

rente. — On introduit un anneau de cuivre C sur un tronc de cône du même métal A (fig. 179), qui présente, suivant l'une de ses génératrices, un certain nombre de traits de repère: on note le point a auquel arrive l'anneau, lorsque le tronc de cône et l'anneau sont à la température ordinaire. En retirant ensuite l'anneau, on peut faire les expériences suivantes: — Chauffer le tronc de cône seul; on constate que l'anneau ne peut plus pénétrer que jusqu'en un point tel que a', plus éloigné de la grande base que a. — Chauffer l'anneau seul; on constate qu'il pénètre jusqu'en un point tel que a'', plus voisin de la grande base que a. — Chauffer à la fois le tronc de cône et l'anneau, en les soumettant simultanément à l'action d'un même foyer de chaleur; on constate que l'anneau pénètre jusqu'au même point a qu'à la température ordinaire.



Fig. 179.

De ces diverses observations, on peut tirer les conclusions générales suivantes.

1° *Le volume des corps solides qu'on échauffe s'accroît dans tous les sens;*

2° *La capacité des espaces vides que ces corps présentent s'accroît d'une quantité égale à l'accroissement de volume d'un corps solide, de même nature, qui remplirait exactement cette capacité.*

Cette dernière remarque fait concevoir, par exemple, que la capacité intérieure d'un vase de verre doit augmenter, sous l'action de la chaleur, comme le volume d'une masse du même verre qui remplirait le vase. — C'est, en effet, ce que des expériences précises ont vérifié d'une manière rigoureuse.

198. **Accroissement de volume des liquides sous l'action de la chaleur.** — Pour constater l'accroissement de volume qu'éprouvent les corps liquides sous

l'action de la chaleur, prenons un ballon de verre (fig. 180), surmonté d'un tube étroit, et contenant de l'eau colorée jusque vers le milieu du tube. Marquons ce niveau sur une feuille de papier fixée au tube, et plongeons le ballon dans l'eau chaude. — Nous voyons, au premier moment, le niveau du liquide s'abaisser un peu dans le tube: cela tient à l'échauffement du verre, qui augmente la capacité intérieure du ballon (197). Mais, au bout d'un instant très court, la chaleur se transmettant au liquide intérieur, nous voyons le niveau remonter et dépasser de beaucoup le point d'où il était parti. Cette observation montre que, sous l'influence d'une même élévation de température, le volume du liquide augmente plus que celui du verre.

Fig. 180.  
Dilatation des liquides

Dans la figure 180, AB représente la dilatation de l'enveloppe; BC est la dilatation réelle ou absolue du liquide; AC est la dilatation apparente. — On voit que la dilatation absolue d'un liquide est égale à la somme de la dilatation apparente et de la dilatation de l'enveloppe.

199. **Accroissement du volume ou de la force élastique des gaz sous l'action de la chaleur.** — Prenons enfin un ballon de verre B (fig. 181), soudé à un tube étroit recourbé horizontalement, et ne contenant que de l'air. Pour séparer cet air de l'air extérieur, introduisons dans le tube une petite colonne de



Fig. 181. — Dilatation des gaz.

liquide *a*. Il suffira d'échauffer légèrement le ballon, en y appliquant la main, pour voir la colonne liquide se mettre en mouvement vers l'extrémité du tube. — Les gaz sont donc encore plus dilatables par la chaleur que les liquides.



Fig. 182.  
Accroissement  
de force élastique  
des gaz.

Remarquons maintenant que, dans cette expérience, la force élastique de l'air intérieur, qui presse sur la colonne liquide d'un côté, reste toujours égale à la pression de l'atmosphère, qui presse sur elle de l'autre côté. Au contraire, quand le volume d'un gaz qu'on échauffe est maintenu sensiblement constant, l'échauffement produit un accroissement de force élastique. — C'est ce qu'on peut constater par l'expérience suivante. Le ballon de verre B (fig. 182) contient de l'air : le tube recourbé et la petite boule dont il est muni contiennent du mercure. Quand on approche la main du ballon, on voit le liquide monter dans la branche ouverte du tube, jusqu'à un certain niveau D, au-dessus du niveau *cc'* dans la boule. Par cette disposition, le volume de l'air intérieur varie donc très peu, mais sa force élastique augmente, car elle arrive à faire équilibre, non seulement à la pression atmosphérique qui s'exerce en D, mais encore à la pression produite par la colonne de liquide *cd*.

## II. — THERMOMÈTRE.

200. **Températures. — Thermomètres.** — Le sens du toucher permet, dans certains cas, de décider si un corps est plus chaud qu'un autre, ou si un même corps est, à un instant déterminé, plus chaud qu'à un autre instant. Mais les impressions de chaud ou de froid que nous percevons au contact dépendent, en général, de la disposition dans laquelle se trouvent nos organes : par suite, ces impressions nous

exposent à des erreurs. Enfin, il est des circonstances où l'on ne peut employer le toucher comme moyen d'investigation.

Les phénomènes de variations de volume fournissent, au contraire, un moyen de comparaison à la fois plus sûr et plus général. Nous désignerons sous le nom général de *thermomètres*, des instruments disposés de manière à permettre d'évaluer facilement les variations de volume qu'ils éprouvent sous l'action de la chaleur. — Selon qu'un thermomètre, mis en contact avec tel ou tel corps, prendra un volume plus ou moins grand, on dira que ce corps est à une température plus ou moins élevée. — L'emploi de ces instruments permettra en outre, comme on va le voir, d'établir des relations numériques entre les diverses températures, c'est-à-dire d'arriver à la mesure des températures elles-mêmes.

201. **Échelles thermométriques.** — Pour faire un thermomètre de l'appareil représenté par la figure 180, il suffirait de tracer, sur la tige cylindrique, des traits équidistants, et de les numéroter : 0, 1, 2, 3, 4... — Si tous les thermomètres étaient identiques et identiquement gradués, cette échelle thermométrique, choisie arbitrairement, suffirait pour évaluer numériquement les températures; tous les thermomètres seraient comparables entre eux, c'est-à-dire que, plongés dans un même bain, ils marqueraient tous une même température. — Mais l'identité de forme et de dimensions étant irréalisable, on doit se contenter de chercher à réaliser, autant que possible, l'identité de nature des corps qui servent à former l'instrument. Le liquide sera, par exemple, du mercure pur, et on emploiera, pour former les enveloppes, des verres aussi peu différents que possible les uns des autres.

Pour que les instruments ainsi construits soient comparables entre eux, on devra d'abord marquer sur la tige les niveaux correspondants à des températures déterminées, adoptées comme *points fixes*. Pour qu'un corps puisse servir à déterminer un des points fixes du thermomètre, il suffit qu'il soit à une température constante, c'est-à-dire qu'un thermomètre quelconque, non gradué, placé au contact de ce corps prenne toujours le même volume. — La glace fondante remplit cette condition : elle est toujours à la même température, quel que soit l'état de l'air ambiant. — La vapeur d'eau bouillante, sous une pression atmosphérique équivalente à 76 centimètres de mercure, est aussi à une température constante, invariable pendant toute la durée de l'ébullition. — En général, une fois qu'on aura fait choix de deux points fixes, on portera successivement le thermomètre (fig. 180) à ces deux températures, et on marquera sur la tige deux nombres *a, b*, aux deux points où se seront arrêtés les niveaux du liquide; on divisera l'intervalle en *b - a* parties égales, et on prolongera les divisions au delà de la division *b*, et en deçà de la division *a*. — Il est bon de remarquer que, puisque l'on peut choisir arbitrairement les deux points

fixes et les nombres *a* et *b*, les degrés d'une échelle thermométrique quelconque ont une valeur essentiellement conventionnelle; cette valeur n'est liée à aucune autre unité.

Newton graduait ses thermomètres à mercure en marquant 0° dans la glace fondante, et 12° à la température du corps humain.

Dans l'échelle de Réaumur, longtemps usitée en France, encore employée en Suisse et dans certaines parties de l'Allemagne, le point correspondant à la glace fondante est marqué 0; le point correspondant à l'ébullition de l'eau est marqué 80.

L'échelle de Fahrenheit est fréquemment employée en Angleterre; le degré 32 correspond à la glace fondante; le degré 212 au point d'ébullition de l'eau sous la pression normale; l'intervalle est divisé en 180 degrés égaux.

L'échelle centigrade, usitée en France depuis le commencement du siècle, a été adoptée par tous les savants. Pour la construire, on marque le degré 0 au point où s'arrête le niveau du liquide dans la glace fondante; le degré 100 correspond au point d'ébullition de l'eau.

**202. Correspondance des échelles thermométriques.** — La température du corps humain étant à peu près 36° centigrades, un degré des thermomètres de Newton vaut à peu près 3° centigrades.

Il est facile aussi de convertir une indication du thermomètre Réaumur en indication du thermomètre centigrade. — En effet, 80 degrés de Réaumur valent 100 degrés centigrades; il en résulte que 1 degré Réaumur vaut  $\frac{100}{80}$  ou  $\frac{5}{4}$  de degré centigrade. Il suffit donc de multiplier par 4 le nombre de degrés marqué par le thermomètre Réaumur, et de diviser le produit par 5, pour avoir le nombre équivalent de degrés centigrades. En opérant ainsi, on trouve, par exemple, que 32° R. équivalent à 40° C. — Réciproquement, pour convertir un certain nombre de degrés centigrades en degrés Réaumur, on multipliera ce nombre par 5 et on divisera le produit par 4. Exemple : 14° C. = 11°, 2 R.

On peut enfin se proposer de traduire en degrés centigrades une indication du thermomètre Fahrenheit, ou réciproquement. — On remarquera d'abord que l'intervalle entre la température de la glace fondante et celle de la vapeur d'eau bouillante comprend 180 degrés de Fahrenheit et 100 degrés centigrades, en sorte que 18 degrés de Fahrenheit valent 10 degrés centigrades. — Cela posé, soit *F* une température évaluée au moyen de l'échelle Fahrenheit, et *C* cette même température évaluée en degrés centigrades. L'intervalle entre cette température et la glace fondante comprend *F* — 32 degrés de Fahrenheit, et *C* degrés centigrades, on a donc la proportion :

$$\frac{F - 32}{C} = \frac{18}{10}$$

Si *F* est donné, cette équation fera connaître *C*, et réciproquement.

Il est aisé de voir que, si *F* est supérieur à 32, *C* est un nombre positif; si *F* est inférieur à 32, ou si *F* est négatif, *C* est un nombre négatif.

**203. Thermomètres à liquides.** — Le thermomètre le plus ordinairement employé (fig. 185) se compose d'un petit réservoir en verre, surmonté d'un tube plus ou moins capillaire, qu'on appelle la tige. — Le réservoir et la partie inférieure de la tige contiennent du mercure ou de l'alcool : d'après ce que nous avons vu (198), le liquide montera dans la tige, si la température s'élève; il descendra, si la température s'abaisse. — La graduation est marquée sur le tube lui-même, ou sur la planchette qui le supporte.

Nous allons indiquer la série des opérations à effectuer pour construire un thermomètre à mercure, et pour le graduer.

**204. Construction du thermomètre à mercure.** —



Fig. 185.

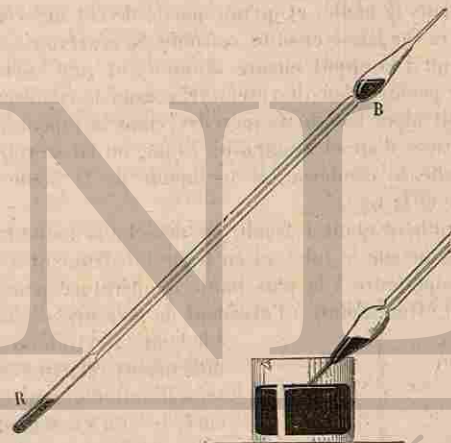


Fig. 184.

Fig. 183.

Construction du thermomètre à mercure.

Les ouvriers qui travaillent le verre fabriquent des enveloppes thermométriques, qu'il reste seulement à emplir et à graduer. Ces enveloppes ont été façonnées en choisissant, pour former la tige, un tube capillaire bien calibré, c'est-à-dire ayant une section intérieure bien uniforme (\*).

Une boule de verre *B* (fig. 184), surmontée d'une pointe effilée, a

(\*) On reconnaît qu'un tube satisfait à cette condition, en constatant qu'une petite colonne de mercure, introduite dans l'intérieur et proménée le long de ce tube, y présente toujours une longueur constante.

été soudée à l'une des extrémités de la tige; à l'autre extrémité, l'ouvrier a soufflé, aux dépens de l'épaisseur du tube, un réservoir R en forme d'olive. On laisse la pointe supérieure fermée, jusqu'au moment où l'on introduira le liquide, afin d'empêcher la poussière et l'humidité de pénétrer dans l'appareil.

Pour introduire le mercure, on brise l'extrémité de la pointe, et, après avoir chauffé légèrement le réservoir R et la boule B pour dilater l'air intérieur, on plonge dans le mercure la pointe renversée (fig. 185) : l'air intérieur se contracte par le refroidissement et laisse entrer dans la boule une certaine quantité de mercure. Quand on juge cette quantité suffisante pour emplir au moins le réservoir R et la tige, on redresse l'instrument. — A ce moment, le mercure pénètre un peu dans la tige, mais, comme la tige est capillaire, l'air intérieur empêche le liquide de descendre jusque dans le réservoir R. On chauffe alors le réservoir, de manière que l'air, en se dilatant, fasse remonter tout le liquide dans la boule, et qu'une partie de cet air s'échappe dans l'atmosphère. On laisse ensuite refroidir le réservoir : la force élastique de l'air qu'il contient encore diminue, et une certaine quantité de mercure pénètre dans le réservoir, comme le représente la figure 184. — On fait alors bouillir le mercure, dont la vapeur entraîne les dernières traces d'air et l'humidité. Enfin, on laisse refroidir : la vapeur mercurielle se condense, et le liquide de la boule vient remplir le réservoir et la tige.

L'instrument étant refroidi, on détache la boule B, en donnant un trait de lime sur le tube, et on porte l'instrument à une température un peu supérieure à la plus haute température pour laquelle il doit plus tard être employé : l'excédent de mercure s'échappe, et on ferme à la lampe l'extrémité supérieure. Si les dimensions relatives de la tige et du réservoir ont été bien choisies, le mercure, revenu à la température ordinaire, doit rester encore dans la tige à une certaine distance du réservoir.

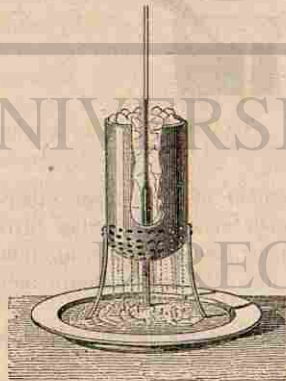


Fig. 186. — Détermination du zéro.

205. **Détermination des points fixes.** — Pour déterminer sur un thermomètre la position du degré zéro, on emplit de glace fondante un vase dont le fond est percé de trous (fig. 186), et l'on y enfonce l'instrument, de manière que la colonne liquide soit entièrement plongée dans la glace. De temps en temps, on soulève la tige pour observer le sommet de la colonne de mercure : quand il est devenu tout à fait stationnaire, on marque, avec un pin-

ceau ou avec un diamant, le point auquel il s'est arrêté. Ce sera le zéro du thermomètre.

Pour déterminer la position du second point fixe, on emploie généralement l'appareil qui est représenté en coupe par la figure 187. La vapeur se produit dans une petite chaudière E, placée sur un fourneau; elle s'élève dans la cheminée centrale M, redescend dans l'espace NN qui enveloppe le tube M, et s'échappe par l'ouverture C. Le thermomètre T est fixé dans la cheminée centrale par un bouchon A, son réservoir étant à une petite distance de la surface de l'eau bouillante. La vapeur qui circule autour de la tige est ainsi préservée de toute cause extérieure de refroidissement. Un petit manomètre à eau, adapté dans une tubulure B qui débouche dans la cheminée centrale, permet de vérifier que la pression intérieure est égale à la pression atmosphérique; enfin on mesure la pression atmosphérique au moyen du baromètre : nous supposons qu'elle soit de 760<sup>mm</sup>. — De temps à autre, on soulève le thermomètre, en le faisant glisser dans son bouchon, pour voir le sommet de la colonne; lorsqu'il est devenu fixe, on marque sur la tige le point qui lui correspond.

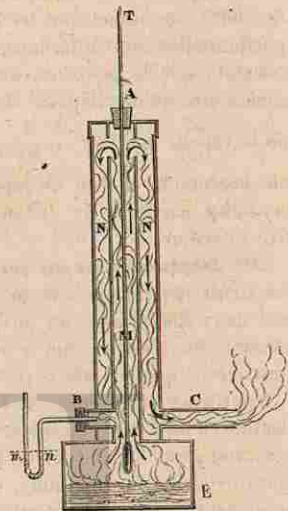


Fig. 187.  
Détermination du point 100°.

206. **Graduation du thermomètre centigrade.** — Les deux points fixes étant déterminés, on marque 0 au point fixe inférieur, 100 au point fixe supérieur, et l'on partage en 100 parties égales la distance qui les sépare; chacune de ces divisions est un *degré* de l'instrument. On prolonge la division, s'il y a lieu, au-dessus du centième degré. Enfin, on marque encore, au-dessous du zéro, des divisions égales aux précédentes, et on les désigne par les chiffres 1, 2, 5, etc., qui forment ainsi une échelle descendante, pour les températures inférieures à celle de la fusion de la glace.

Dans les notations, on fait précéder du signe — les chiffres qui indiquent ces dernières températures, pour les distinguer des températures supérieures à 0°. Ainsi, —25° désigne une température de 25 degrés au-dessous de zéro, tandis que +25°, ou simplement 25°, désigne une température de 25 degrés au-dessus de zéro.

X 207. **Correction due à la valeur de la pression atmosphérique, au moment de la détermination du 100° degré.** — S'il arrive

que, au moment de la détermination du point fixe supérieur, la pression soit différente de 760<sup>mm</sup>, on peut calculer la correction à faire subir à l'échelle, d'après cette observation due à Wollaston, que la température de la vapeur d'eau bouillante s'élève ou s'abaisse de 1 degré quand la pression augmente ou diminue de 27<sup>mm</sup>, au voisinage de 760<sup>mm</sup>. On admet que les petites différences de pression sont proportionnelles aux différences de température. — Si, par exemple, on constate que la pression, au moment de l'expérience, est de 769<sup>mm</sup>, c'est-à-dire qu'elle dépasse de 9<sup>mm</sup> la pression normale, la température de la vapeur est  $100^{\circ} + \frac{1}{27} \times 9$ , ou  $100^{\circ} + \frac{1}{3}$ . Le 100° degré est alors au-dessous du niveau du liquide à une distance égale au tiers de la centième partie de la distance comprise entre ce niveau et le point fixe inférieur.

**208. Déplacement du zéro.** — Lorsqu'on reprend un thermomètre construit depuis un certain temps, et qu'on le soumet de nouveau aux deux opérations qui ont servi à déterminer les points fixes, on observe, en général, que le mercure s'arrête en des points un peu plus élevés que les points primitivement obtenus.

D'après les expériences de Despretz, ce résultat est dû à une modification lente, qu'a éprouvée le verre du réservoir. Pour souffler le réservoir dans l'épaisseur de la tige, on a dû porter le verre à la température de sa fusion; puis, comme le refroidissement a toujours été assez brusque, le verre a subi une véritable *trempe*, qui a fait conserver au réservoir une capacité supérieure à celle qu'il aurait dû prendre à la température ordinaire. Les élévations de température plus ou moins considérables qu'il subit ensuite, par l'usage, et qui sont généralement suivies d'un refroidissement lent, font éprouver au réservoir un *recuit*, et par suite une diminution de capacité, qui explique le phénomène observé (\*).

Lorsqu'on veut employer un thermomètre à des recherches précises, on doit donc d'abord déterminer, en replongeant l'instrument dans la glace fondante, le nombre de divisions dont son zéro a pu s'être déplacé : on retranchera ce nombre de toutes les indications fournies ultérieurement par l'instrument.

**209. Thermomètre à alcool.** — Le mercure se solidifie à la température de  $-40^{\circ}\text{C}$ .; le thermomètre à mercure ne peut donc pas servir à évaluer les températures très basses, celles qu'on rencontre, par exemple, dans les contrées polaires. On remplace alors le mercure par l'alcool. — Dans les thermomètres grossièrement construits, on

(\*) Le déplacement des points fixes avait été attribué d'abord à un effet progressif de la pression atmosphérique, sur l'enveloppe vide d'air : Despretz, en opérant avec des thermomètres ouverts, pour lesquels la pression était la même à l'intérieur qu'à l'extérieur, a vu le déplacement se produire comme dans des thermomètres fermés.

emploie de l'alcool coloré en rouge par la teinture d'orseille; mais cette matière a l'inconvénient de s'altérer à la longue.

Le procédé d'emplissage est plus simple que pour le thermomètre mercure : il n'est plus nécessaire de souder une boule à la partie supérieure de la tige, comme dans la figure 184. — On chauffe simplement le réservoir, pour dilater l'air intérieur, et on plonge ensuite dans l'alcool l'extrémité ouverte de la tige; lorsque le refroidissement a fait monter un peu de liquide dans le thermomètre, on le redresse, et on chauffe de manière à faire bouillir l'alcool dans le réservoir et à chasser ainsi tout l'air. L'ébullition s'effectuant à une température beaucoup plus basse que pour le mercure (environ  $78^{\circ}\text{C}$ .), on peut plonger de nouveau la tige dans l'alcool, et laisser le liquide froid arriver dans le réservoir, sans craindre la rupture du verre (\*). — On ferme ensuite à la lampe l'extrémité de la tige, en laissant un peu d'air au-dessus du liquide.

En général, on ne prolonge pas l'échelle jusqu'à la température d'ébullition de l'eau, car, à cette température (supérieure de 22 degrés à celle où l'alcool entre en ébullition), l'alcool émet des vapeurs dont la force élastique pourrait briser l'enveloppe. Pour graduer l'instrument, après avoir déterminé le zéro par le procédé ordinaire, on détermine un second point de l'échelle, en plongeant le thermomètre dans un bain plus ou moins tiède, dont la température est donnée exactement par un thermomètre à mercure.

**210. De la sensibilité dans les thermomètres.** — Dans les thermomètres, on distingue deux sortes de sensibilité, qui correspondent à des conditions de construction bien distinctes.

La première est la propriété de se mettre *rapidement* en équilibre de température avec les corps environnants : elle est d'autant plus grande que les dimensions *absolues* du réservoir sont moindres.

La seconde est la propriété d'apprécier, avec exactitude, de *petites variations* de température. A ce point de vue, un thermomètre est d'autant plus sensible, que le degré occupe sur la tige une plus grande longueur, et peut se subdiviser en un plus grand nombre de parties perceptibles. Cette condition exige, contrairement à la précédente, que l'on augmente, autant que possible, la capacité du réservoir, tout en diminuant le diamètre de la tige.

Suivant les usages auxquels l'instrument est destiné, on cherche à lui donner l'une ou l'autre de ces espèces de sensibilité.

(\*) En procédant ainsi, on observe que l'alcool s'élève dans l'instrument renversé, de manière à remplir la capacité de la tige et du réservoir; il reste cependant toujours, dans le réservoir, une petite bulle de gaz, provenant de l'air qui était dissous dans l'alcool et qui s'en est dégagé. Pour chasser cette bulle, on redresse l'instrument, on l'attache à l'extrémité d'une ficelle, et on le fait tourner comme une fronde : ce mouvement, chassant l'alcool vers les points les plus éloignés du centre de rotation, force la bulle d'air à se dégager par la surface libre du liquide.

**211. Choix de la substance thermométrique. — Thermomètre normal.** — Nous avons pris jusqu'ici, comme substance thermométrique, un *liquide*, mercure ou alcool, enfermé dans une enveloppe de verre. — On pourrait aussi construire des thermomètres *solides*, présentant une disposition semblable à celle de la figure 177; les points 0 et 100 seraient marqués sur le cadran, devant les positions occupées par l'aiguille, lorsque la barre thermométrique serait placée dans la glace fondante ou dans la vapeur d'eau à l'ébullition; mais il serait difficile de donner à de pareils thermomètres une sensibilité suffisante. — Au contraire, un thermomètre à *gaz*, disposé comme l'appareil de la figure 181, présenterait une très grande sensibilité.

Tous ces thermomètres, solides, liquides ou gazeux, seraient évidemment d'accord aux températures des deux points fixes; mais il n'est pas certain qu'ils dussent fournir toujours les mêmes indications numériques, quand ils seraient plongés dans un milieu à une température quelconque. Il est donc nécessaire de choisir l'un de ces appareils, qui prendra le nom de *thermomètre normal*, et qui seul définira exactement les températures. — Le choix de la substance thermométrique repose sur les principes suivants :

1° Le thermomètre normal doit être toujours *comparable à lui-même*, aux différentes époques; c'est-à-dire que, dans un milieu à température invariable, il doit toujours, à quelque époque que ce soit, marquer le même degré;

2° Les divers instruments doivent être *comparables entre eux*; c'est-à-dire qu'ils doivent marquer simultanément la même température, quand ils sont placés dans un même milieu.

La plupart des corps solides, et les métaux en particulier, lorsqu'ils sont soumis à des alternatives de dilatation et de contraction, éprouvent, dans leur structure, des changements qui modifient leur dilatabilité; dès lors un thermomètre formé d'une barre métallique pourrait, à des époques diverses, ne pas rester comparable à lui-même.

Un liquide, lorsqu'il est pur, est toujours identique à lui-même; il ne présente point les variations d'état moléculaire que présentent les corps solides; mais le liquide est nécessairement contenu dans une enveloppe solide, et comme on n'observe que des variations apparentes du volume, variations qui dépendent de la dilatation de l'enveloppe (198), les indications fournies par un thermomètre à liquide pourraient varier d'un instrument à un autre, et, pour un même instrument, d'une époque à une autre. Dès lors, le thermomètre normal ne peut être pris parmi les thermomètres à liquides (\*).

(\*) Le phénomène du déplacement du zéro (208) prouve qu'un même thermomètre à mercure ne reste pas comparable à lui-même aux différentes époques. — D'autre part, deux thermomètres à mercure, construits, l'un avec du verre ordinaire, l'autre avec du cristal, et récemment gradués, sont sensiblement d'accord

Le thermomètre *normal* sera donc un thermomètre à gaz.

Un gaz étant toujours enfermé dans une enveloppe, on pourrait craindre que l'inconvénient signalé pour les liquides ne se présentât encore. Mais, en raison de la grande dilatabilité des gaz, les irrégularités de la dilatation de l'enveloppe sont négligeables par rapport à la dilatation observée; l'expérience prouve que deux thermomètres à gaz sont toujours comparables entre eux, quelle que soit la nature du verre qui forme leur enveloppe.

On a choisi l'*air sec*, plutôt qu'un autre gaz, parce qu'on peut facilement se le procurer toujours identique à lui-même.

**212. Thermomètre à air. — Degré de température.** — On peut donner au thermomètre à air deux dispositions différentes; les figures 181 et 182 suffisent pour en faire comprendre le principe.

Dans la première disposition, si l'on suppose que la pression atmosphérique reste constante, on évalue la température par la *variation de volume* de l'air, sous pression constante. Mais alors, plus la température s'élève, plus grande est la masse d'air qui sort du réservoir pour passer dans la tige; si, comme il arrive le plus souvent, la tige est placée en dehors du milieu dont on veut évaluer la température, il en résulte une cause d'erreur qui va en croissant avec la température.

Pour cette raison, on préfère donner au thermomètre à air une disposition semblable à celle de la figure 182, et sur laquelle nous reviendrons plus loin, avec plus de détails. On fait en sorte que le volume occupé par l'air reste toujours le même : à mesure que la température s'élève, on ajoute du mercure dans la branche CD; la température est alors évaluée par la *variation de force élastique* de l'air, sous volume constant. — Lorsque la masse d'air est dans la glace fondante, elle occupe le volume du thermomètre; sa force élastique est 76 centimètres. Dans la vapeur d'eau à l'ébullition, sous le même volume, la force élastique augmente de 27<sup>cent</sup>,854, c'est-à-dire de 0,3665 de sa valeur initiale.

Nous appellerons *degré de température* la variation de température qui produit, sur une masse d'air assujettie à conserver un volume constant, une variation de force élastique égale à la centième partie de celle qu'elle éprouve entre la température de la glace fondante et celle de la vapeur d'eau bouillante; la force élastique de cette masse d'air, dans la glace fondante, étant 76 centimètres.

**213. Emploi du thermomètre à mercure, préalablement comparé au thermomètre normal.** — L'évaluation d'une température au moyen d'un thermomètre à air constitue une véritable expé-

entre 0° et 100°; mais à des températures élevées, à 250°, par exemple, l'écart de leurs indications peut atteindre 5°. — Le défaut de comparabilité est encore bien plus accentué dans les thermomètres à alcool.



rience, et exige un opérateur exercé. Pour la pratique, il y a avantage à employer des thermomètres à *liquides*, qui donnent des indications immédiates par une simple lecture.

Parmi les liquides, on a choisi le *mercure*, pour de nombreuses raisons : 1° le mercure peut être obtenu dans un état de pureté parfaite, condition indispensable pour que les liquides de tous les instruments soient toujours identiques entre eux ; 2° le point de congélation du mercure ( $-40^\circ$ ) est très éloigné de son point d'ébullition ( $+360^\circ$ ), et la plupart des températures usuelles sont comprises dans l'intervalle de ces deux points ; 3° le mercure se met rapidement en équilibre de température avec les corps environnants.

Quand on tient compte du déplacement du zéro (208), un thermomètre à mercure, soigneusement gradué, reste d'accord avec le thermomètre à air entre  $0^\circ$  et  $100^\circ$  ; il indique donc exactement les températures comprises entre ces limites. Il n'en est plus de même aux températures supérieures à  $100^\circ$ . Ainsi quand le thermomètre normal, plongé dans un bain, marque  $500^\circ$ , tel thermomètre à mercure marquera  $298^\circ$ , tel autre marquera  $502^\circ$ . Dès lors si l'on veut faire usage d'un thermomètre à mercure pour déterminer avec précision des températures notablement supérieures à  $100^\circ$ , on devra préalablement le comparer au thermomètre normal, et dresser une table indiquant les températures exactes qui correspondent aux indications de l'instrument.

## CHAPITRE II

### MESURE DES DILATATIONS

#### I. — DILATATIONS DES CORPS SOLIDES.

**214. Coefficients de dilatation linéaire.** — L'expérience montre que, si l'on fait subir à une même barre métallique des variations de température peu considérables, et comprises par exemple entre  $0^\circ$  et  $150^\circ$ , elle éprouve des variations de longueur sensiblement *proportionnelles* à ces variations de température.

On appelle *coefficient de dilatation linéaire* d'une barre solide, le nombre qui exprime l'allongement éprouvé par l'unité de longueur de cette barre, lorsque sa température s'élève d'un degré.

**215. Formules relatives aux dilatations linéaires.** — Connaissant la longueur  $L_0$  d'une barre à  $0^\circ$ , et son coefficient de dilatation linéaire  $\lambda$ , proposons-nous de calculer la longueur  $L$  de cette barre à  $t$  degrés. — Puisque l'unité de longueur de la barre s'allonge de  $\lambda$  en passant de  $0^\circ$  à  $1^\circ$ , elle s'allonge de  $\lambda t$  en passant de  $0^\circ$  à  $t$  degrés ; par suite, la longueur  $L_0$ , pour cette même variation de température, s'allonge de la quantité  $L_0 \lambda t$ . La longueur totale de la barre devient donc  $L_0 + L_0 \lambda t$ , c'est-à-dire que l'on a

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

La quantité  $1 + \lambda t$  a reçu le nom de *binôme de dilatation*.

Inversement, si l'on connaît la longueur  $L$  d'une barre à  $t$  degrés, et son coefficient de dilatation linéaire  $\lambda$ , pour calculer la longueur  $L_0$  de cette barre à  $0^\circ$ , on aura

$$(2) \quad L_0 = \frac{L}{1 + \lambda t}.$$

Enfin, connaissant la longueur  $L$  à  $t$  degrés, il est facile d'en déduire la longueur  $L'$  à  $t'$  degrés. — En effet, si l'on prend pour inconnue

rience, et exige un opérateur exercé. Pour la pratique, il y a avantage à employer des thermomètres à *liquides*, qui donnent des indications immédiates par une simple lecture.

Parmi les liquides, on a choisi le *mercure*, pour de nombreuses raisons : 1° le mercure peut être obtenu dans un état de pureté parfaite, condition indispensable pour que les liquides de tous les instruments soient toujours identiques entre eux ; 2° le point de congélation du mercure ( $-40^\circ$ ) est très éloigné de son point d'ébullition ( $+360^\circ$ ), et la plupart des températures usuelles sont comprises dans l'intervalle de ces deux points ; 3° le mercure se met rapidement en équilibre de température avec les corps environnants.

Quand on tient compte du déplacement du zéro (208), un thermomètre à mercure, soigneusement gradué, reste d'accord avec le thermomètre à air entre  $0^\circ$  et  $100^\circ$  ; il indique donc exactement les températures comprises entre ces limites. Il n'en est plus de même aux températures supérieures à  $100^\circ$ . Ainsi quand le thermomètre normal, plongé dans un bain, marque  $500^\circ$ , tel thermomètre à mercure marquera  $298^\circ$ , tel autre marquera  $502^\circ$ . Dès lors si l'on veut faire usage d'un thermomètre à mercure pour déterminer avec précision des températures notablement supérieures à  $100^\circ$ , on devra préalablement le comparer au thermomètre normal, et dresser une table indiquant les températures exactes qui correspondent aux indications de l'instrument.

## CHAPITRE II

### MESURE DES DILATATIONS

#### I. — DILATATIONS DES CORPS SOLIDES.

**214. Coefficients de dilatation linéaire.** — L'expérience montre que, si l'on fait subir à une même barre métallique des variations de température peu considérables, et comprises par exemple entre  $0^\circ$  et  $150^\circ$ , elle éprouve des variations de longueur sensiblement *proportionnelles* à ces variations de température.

On appelle *coefficient de dilatation linéaire* d'une barre solide, le nombre qui exprime l'allongement éprouvé par l'unité de longueur de cette barre, lorsque sa température s'élève d'un degré.

**215. Formules relatives aux dilatations linéaires.** — Connaissant la longueur  $L_0$  d'une barre à  $0^\circ$ , et son coefficient de dilatation linéaire  $\lambda$ , proposons-nous de calculer la longueur  $L$  de cette barre à  $t$  degrés. — Puisque l'unité de longueur de la barre s'allonge de  $\lambda$  en passant de  $0^\circ$  à  $1^\circ$ , elle s'allonge de  $\lambda t$  en passant de  $0^\circ$  à  $t$  degrés ; par suite, la longueur  $L_0$ , pour cette même variation de température, s'allonge de la quantité  $L_0 \lambda t$ . La longueur totale de la barre devient donc  $L_0 + L_0 \lambda t$ , c'est-à-dire que l'on a

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

La quantité  $1 + \lambda t$  a reçu le nom de *binôme de dilatation*.

Inversement, si l'on connaît la longueur  $L$  d'une barre à  $t$  degrés, et son coefficient de dilatation linéaire  $\lambda$ , pour calculer la longueur  $L_0$  de cette barre à  $0^\circ$ , on aura

$$(2) \quad L_0 = \frac{L}{1 + \lambda t}.$$

Enfin, connaissant la longueur  $L$  à  $t$  degrés, il est facile d'en déduire la longueur  $L'$  à  $t'$  degrés. — En effet, si l'on prend pour inconnue

auxiliaire la longueur  $L_0$  de la barre à la température de  $0^\circ$ , on a (1)

$$L' = L_0(1 + l'),$$

et en remplaçant  $L_0$  par sa valeur (2),

$$(5) \quad L' = L \frac{1 + l'}{1 + l} (*).$$

**216. Mesure des dilatations linéaires : principe de la méthode de Lavoisier et Laplace.** — Diverses méthodes ont été employées pour déterminer les coefficients de dilatation linéaire des corps solides. Voici celle qui a été suivie par Lavoisier et Laplace en 1782.

Concevons une barre d'environ 2 mètres, placée sur des rouleaux, et s'appuyant par l'une de ses extrémités contre un talon fixe A (fig. 488);

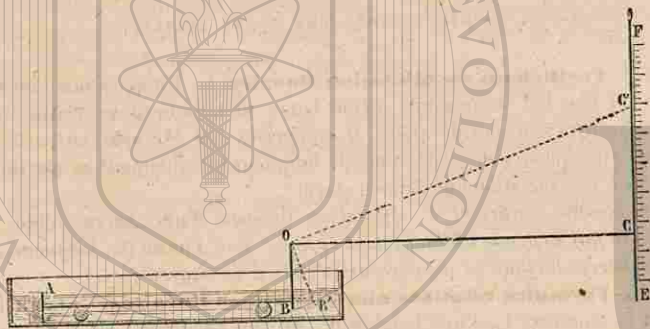


Fig. 488

par son autre extrémité B, contre la petite branche d'un levier coudé BOC, mobile dans un plan vertical autour du point O. Imaginons, en outre, une échelle EF disposée verticalement en regard du levier. —

(\*) Au lieu de cette relation entre  $L$  et  $L'$  on peut en employer une autre, qui n'est qu'approchée. — En effectuant la division  $\frac{1+l'}{1+l}$ , on obtient pour quotient

$$1 + l(l' - l) - l^2 l'(l' - l) + \dots;$$

or  $l$  étant toujours une fraction très petite, on doit négliger les termes en  $l^2, l^3, \dots$ , à côté du terme en  $l$ , et prendre, pour valeur approchée de ce quotient,  $1 + l(l' - l)$ . Il vient alors

$$(5 \text{ bis}) \quad L' = L [1 + l(l' - l)],$$

relation qui offre avec la formule (1) une analogie remarquable : elle indique que, pour déduire de la longueur  $L$ , correspondante à une température quelconque  $t$ , la longueur  $L'$  correspondante à une autre température  $t'$ , il suffit encore de multiplier la première longueur par le binôme de dilatation  $1 + l(t' - t)$ , relatif à la variation de température.

Soit  $BB'$  l'allongement qu'éprouve la barre  $AB$ , lorsqu'on la fait passer de  $0^\circ$  à  $t$  degrés; à cette dernière température, le levier prendra la position  $B'OC'$ . Or, les triangles semblables  $BOB'$  et  $COB'C'$  donnent

$$BB' = CC' \frac{OB}{OC}.$$

Pour obtenir l'allongement  $BB'$  de la barre, il suffira donc de mesurer le déplacement  $CC'$  de l'extrémité  $C$  de la grande branche du levier, sur l'échelle divisée, et de multiplier ce déplacement par le rapport des deux bras de levier  $OB$  et  $OC$ , lequel aura été déterminé une fois pour toutes (\*). — Pour en déduire le coefficient de dilatation linéaire, on divisera la quantité  $BB'$  par la longueur initiale de la barre et par la variation de température  $t$ .

**217. Appareil de Lavoisier et Laplace.** — La barre  $AB$ , reposant sur des rouleaux de verre et maintenue par deux paires de tiges verti-

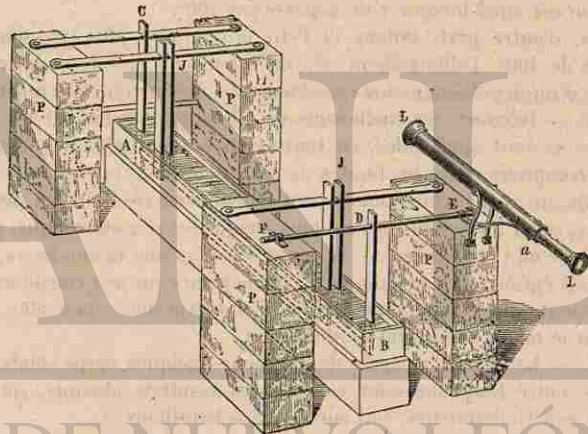


Fig. 489. — Dilatation linéaire des corps solides; appareil de Lavoisier et Laplace.

cales  $J, J$ , était placée dans une auge métallique, établie entre quatre piliers de maçonnerie  $P$  (fig. 489); dans cette auge, on plaçait d'abord de la glace fondante, et on la remplaçait ensuite par de l'eau bouillante ou de l'huile. L'extrémité  $A$  s'appuyait contre la tige de verre verticale  $C$ , fixée solidement aux massifs de maçonnerie. L'extrémité  $B$  venait s'appuyer contre une tige semblable  $D$ , qui constituait la petite

(\*) Dans les expériences de Lavoisier et Laplace, ce rapport était égal à  $\frac{1}{744}$ , en sorte qu'on avait  $BB' = \frac{1}{744} CC'$ . — On voit que l'erreur commise dans la mesure de  $CC'$  était divisée par 744, et  $BB'$  était ainsi déterminé avec une grande précision.

branche du levier coudé : cette tige était fixée à une traverse horizontale FE qui, en tournant autour de son axe, entraînait la tige métallique Ea et la lunette LL; enfin, on avait installé, en regard de la lunette, à environ 200 mètres de distance, une règle verticale divisée. Le rayon visuel dirigé suivant l'axe de la lunette constituait ici la grande branche du levier coudé.

218. **Résultats relatifs aux dilatations linéaires.** — Nous avons admis (214) qu'une même barre solide s'allonge, entre des limites de température suffisamment restreintes, d'une quantité *constante* pour chaque élévation de température d'un degré. S'il en est ainsi, l'allongement BB' qu'éprouve la barre AB, en passant de 0° à t°, doit être proportionnel au nombre t; en d'autres termes, le quotient  $\frac{BB'}{t}$ , qui exprime l'allongement moyen de cette barre pour une élévation de température d'un degré, entre 0° et t°, doit être constant, quel que soit t. Les expériences de Laplace et Lavoisier permettent de constater qu'il en est ainsi lorsque t ne dépasse pas 100°.

Mais, d'autre part, Dulong et Petit ont montré plus tard que, au-dessus de 100°, l'allongement moyen, pour une élévation de température d'un degré, augmente sensiblement à mesure que la température s'élève. — Dès lors, les coefficients de dilatation fournis par les expériences ne sont applicables, en toute rigueur, que pour des températures comprises entre les limites de ces expériences elles-mêmes.

Enfin, un même corps solide peut fournir des résultats un peu différents, selon les actions mécaniques auxquelles il a été soumis, par le martelage ou l'écrasement. — Il arrive aussi qu'une même barre, lorsqu'elle a éprouvé des variations de température un peu considérables, ne présente plus, quand on la soumet à une expérience nouvelle, exactement le même coefficient de dilatation.

219. — Le tableau ci-après donne, pour quelques corps solides, les limites entre lesquelles sont compris les résultats obtenus, soit par divers expérimentateurs, soit sur divers échantillons.

## COEFFICIENTS DE DILATATION LINÉAIRE.

|                                |                                       |
|--------------------------------|---------------------------------------|
| Acier non trempé. . . . .      | 0,0000 1079                           |
| Acier trempé. . . . .          | variable de 0,0000 1259 à 0,0000 1586 |
| Argent. . . . .                | 0,0000 1909                           |
| Cuivre. . . . .                | variable de 0,0000 1712 à 0,0000 1722 |
| Étain. . . . .                 | de 0,0000 1958 à 0,0000 2125          |
| Fer. . . . .                   | de 0,0000 1220 à 0,0000 1235          |
| Flint (cristal). . . . .       | de 0,0000 0812 à 0,0000 0872          |
| Laiton. . . . .                | de 0,0000 1867 à 0,0000 1890          |
| Or. . . . .                    | 0,0000 1466                           |
| Platine (selon Borda). . . . . | 0,0000 0837                           |
| Plomb. . . . .                 | 0,0000 2848                           |
| Verre sans plomb. . . . .      | variable de 0,0000 0876 à 0,0000 0917 |
| Zinc. . . . .                  | de 0,0000 2952 à 0,0000 3108          |

220. **Dilatation cubique.** — On appelle *coefficient de dilatation cubique* d'un corps, le nombre qui exprime l'accroissement éprouvé par l'unité de volume de ce corps, lorsque sa température s'élève d'un degré.

Si l'on désigne par  $V_0$  le volume d'un corps à 0°, par V son volume à t degrés, et par k son coefficient de dilatation cubique, on a la relation

$$(1) \quad V = V_0(1 + kt),$$

que l'on établirait en raisonnant comme pour la relation analogue, relative aux dilatations linéaires (215). — On en déduit

$$(2) \quad V_0 = V \frac{1}{1 + kt}.$$

Enfin, si l'on désigne par V' le volume du corps à t' degrés, on a

$$(3) \quad V' = V \frac{1 + kt'}{1 + kt} (*).$$

Nous aurons souvent à faire usage de ces formules.

221. **Relations entre les densités d'un même corps à différentes températures.** — Les densités d'un même corps, à différentes températures, sont inversement proportionnelles aux volumes qu'il occupe. Si donc on désigne par  $V_0$  et  $D_0$  le volume et la densité d'un corps à 0°, par V et D son volume et sa densité à t degrés, on a :

$$\frac{D}{D_0} = \frac{V_0}{V}.$$

En remplaçant V par sa valeur  $V_0(1 + kt)$ , il vient

$$\frac{D}{D_0} = \frac{V_0}{V_0(1 + kt)} = \frac{1}{1 + kt},$$

ou

$$(1) \quad D = \frac{D_0}{1 + kt}.$$

On aura de même, à une autre température t',

$$(2) \quad D' = \frac{D_0}{1 + kt'}.$$

(\* On démontrerait comme plus haut (note de la page 176) que cette relation peut être remplacée par la relation *approchée* suivante :

$$(3 \text{ bis}) \quad V' = V [1 + k(t' - t)].$$

En divisant les relations (1) et (2) membre à membre, il vient

$$(3) \quad \frac{D}{D'} = \frac{1 + kt'}{1 + kt}$$

c'est-à-dire que les densités d'un même corps, à deux températures différentes, sont inversement proportionnelles aux binômes de dilatation cubique.

**222. Relation entre le coefficient de dilatation linéaire et le coefficient de dilatation cubique d'un même corps.** — Les coefficients de dilatation linéaire des divers corps ayant été déterminés par l'expérience, on peut se dispenser de nouvelles expériences pour déterminer les coefficients de dilatation cubique de ces mêmes corps.

En effet, représentons par  $l$  le coefficient de dilatation linéaire d'un corps, du fer par exemple, et par  $k$  son coefficient de dilatation cubique. Prenons pour unité de longueur le mètre, et pour unité de volume le mètre cube. Si nous imaginons un cube de fer ayant un mètre de côté à la température de  $0^\circ$ , et si nous portons sa température à  $1^\circ$ , chaque côté de ce cube acquiert une longueur de  $1 + l$ ; le volume de ce cube devient donc  $(1 + l)^3$ , c'est-à-dire  $1 + 3l + 3l^2 + l^3$ ; par suite, son accroissement de volume est exprimé par  $3l + 3l^2 + l^3$ . Or, cet accroissement n'est autre chose que le coefficient de dilatation cubique  $k$ ; on a donc

$$k = 3l + 3l^2 + l^3.$$

Mais, pour tous les corps solides,  $l$  est toujours exprimé par un nombre très petit, comme le montre le tableau de la page 178; le carré  $l^2$  et le cube  $l^3$  sont des nombres encore beaucoup plus petits. Il en résulte que, si l'on calculait  $k$  en remplaçant  $l$  par sa valeur dans les trois termes du second membre, le second et le troisième terme n'augmenteraient le résultat fourni par le premier terme seul, que d'une quantité plus petite que l'erreur commise dans la détermination du premier terme (\*). On doit donc les négliger, et on écrira :

$$k = 3l.$$

Dès lors, pour obtenir les coefficients de dilatation cubique des divers corps inscrits dans le tableau précédent, il suffit de multiplier par 3 tous les nombres de ce tableau.

(\*) Effectuons, par exemple, ce calcul pour le fer, dont le coefficient de dilatation linéaire est égal à 0,000012; on aurait, pour le second et le troisième terme :

$$3l^2 = 0,000000000432; \quad l^3 = 0,000000000001728;$$

la grandeur  $l$  n'étant connue qu'à moins d'une unité du sixième ordre décimal près, nous devons négliger  $3l^2$  et  $l^3$ , qui sont deux quantités beaucoup plus petites qu'une unité du septième ordre décimal.

**223. Dilatation des enveloppes.** — Nous avons démontré précédemment, par une expérience assez grossière (197), que la capacité d'une enveloppe solide augmente, sous l'action de la chaleur, comme le volume d'une masse de la même substance, qui remplirait cette enveloppe. On a pu constater, par des expériences plus précises, qu'il en est toujours rigoureusement ainsi. — Il résulte de là que, si l'on considère un réservoir de verre, par exemple, et si l'on se propose de calculer les variations de volume intérieur qu'il éprouve pour des variations de température déterminées, il suffira de faire usage du coefficient de dilatation cubique du verre, et de procéder comme s'il s'agissait d'une masse de verre, remplissant la capacité du réservoir.

Mais, pour ce qui est de la connaissance précise de ce coefficient de dilatation lui-même, on ne doit pas se contenter de déterminations effectuées sur des échantillons de verres plus ou moins semblables à celui qui forme l'enveloppe dont il s'agit. — Il est nécessaire de déterminer le coefficient de dilatation, sur cette enveloppe elle-même. Cette méthode de détermination est fondée sur la connaissance de la dilatation des liquides, comme on le verra plus loin (229 et 230).

## II. — DILATATIONS DES LIQUIDES.

**224. Dilatations apparentes et dilatations absolues.** — Lorsqu'on chauffe un liquide placé dans un vase (fig. 180), on n'observe que l'effet résultant de l'action de la chaleur sur le liquide et sur le vase; c'est ce qu'on nomme la *dilatation apparente* du liquide. — Puisque le vase augmente de capacité, la dilatation apparente est moindre que l'accroissement réel du volume du liquide, ou *dilatation absolue*.

Il semble d'abord impossible d'obtenir la dilatation absolue d'un liquide, sans avoir à tenir compte de la dilatation du vase qui le contient. — C'est ce que permet cependant la méthode suivante, dont le principe est dû à Boyle, et qui a été appliquée par Dulong et Petit à l'étude de la dilatation absolue du mercure.

**225. Détermination du coefficient de dilatation absolue du mercure : principe de la méthode de Dulong et Petit.** — Deux tubes verticaux AB et CD (fig. 190), ayant un diamètre de quelques centimètres, communiquent entre eux par un tube capillaire deux fois recourbé BEFD, dont la branche EF est horizontale : on y a introduit du mercure. On refroidit à  $0^\circ$  le liquide contenu dans la branche AB, tandis qu'on chauffe à une température connue  $T$  celui de la branche CD; il s'établit de part et d'autre une différence de densité, et par suite une différence de niveau. En raisonnant comme on l'a fait pour les vases communicants (77), on voit que les hauteurs des niveaux  $m$

et  $n$ , au-dessus de l'axe du tube horizontal EF, doivent être en raison inverse des densités du liquide dans les deux branches. En désignant

donc par  $h_0$  et  $D_0$  la hauteur et la densité du mercure à  $0^\circ$ , par  $h$  et  $D$  la hauteur et la densité du mercure à  $T$  degrés, on a

$$\frac{h}{h_0} = \frac{D_0}{D}.$$

Mais, si l'on désigne par  $m$  le coefficient de dilatation absolue du mercure, nous avons vu (221) que les densités  $D_0$  et  $D$  sont inversement proportionnelles aux binômes de dilatation correspondants aux températures  $0^\circ$  et  $T$ , c'est-à-dire aux quantités 1 et  $1 + mT$ ; on a donc

$$\frac{D_0}{D} = 1 + mT, \quad \text{et par suite,} \quad \frac{h}{h_0} = 1 + mT.$$

De cette équation on tire la valeur de  $m$ ,

$$m = \frac{h - h_0}{h_0 T}.$$

Pour déterminer le coefficient de dilatation absolue  $m$ , il suffira donc de mesurer la température  $T$ , la différence de niveau  $h - h_0$ , et la hauteur  $h_0$ . C'est ce qu'ont fait Dulong et Petit.

**226. Appareil de Dulong et Petit.** — Le tube EF, qui réunit les deux branches, était fixé à une règle de fonte MNP (fig. 191), en forme de T, que l'on rendait horizontale au moyen de vis calantes et de deux niveaux à bulle d'air placés à angle droit. Le tube AB était environné d'un manchon de fer-blanc, qu'on emplissait de glace fondante : une tige de fer verticale, contenue dans le manchon, se terminait par un crochet dont l'extrémité  $r$  servait de repère. — L'autre branche CD était entourée d'un manchon de cuivre, contenant de l'huile. On chauffait l'huile au moyen d'un fourneau en briques, qui environnait le manchon de toutes parts; un thermomètre à poids  $t$  et un thermomètre à air  $t'$ , comme ceux dont nous indiquerons plus loin le mode d'emploi, donnaient la température de l'huile.

Pour faire une observation, on laissait la température s'élever lentement, jusque près du point qu'on voulait atteindre. On fermait alors toutes les ouvertures du fourneau; le tirage étant arrêté, la température continuait à monter pendant quelques instants, puis atteignait un maximum, où elle se maintenait quelque temps stationnaire avant de descendre. On profitait de cet instant pour effectuer les observa-

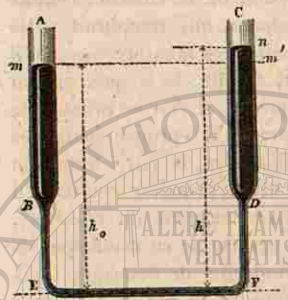


Fig. 190.

tions; à cet effet, on versait dans la branche AB une petite quantité de mercure préalablement refroidi à  $0^\circ$ , de manière à élever le niveau dans l'autre branche de quelques millimètres au-dessus du manchon, et l'on écartait un peu la glace autour du sommet de la colonne mercurielle en A. Les deux niveaux étant ainsi rendus visibles, on mesurait au cathétomètre les distances verticales du repère  $r$  au-

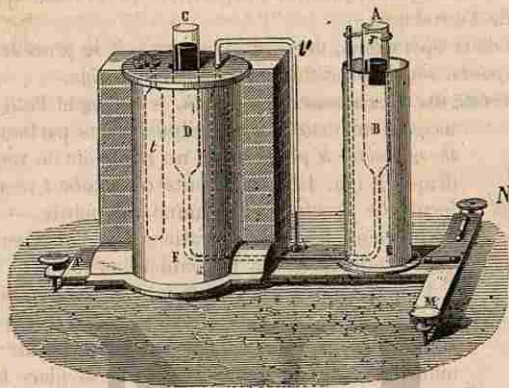


Fig. 191. — Dilatation absolue du mercure; appareil de Dulong et Petit.

dessus des plans de ces niveaux; la différence de ces distances était la quantité  $h - h_0$ . — En même temps, on notait les indications des deux thermomètres. — Enfin la hauteur du repère  $r$  au-dessus de l'axe du tube EF ayant été déterminée une fois pour toutes, il suffisait d'en retrancher la hauteur du même repère au-dessus du niveau du mercure froid, pour avoir la hauteur  $h_0$ .

227. — Dulong et Petit ont trouvé, pour le coefficient de dilatation absolue du mercure, entre  $0^\circ$  et  $100^\circ$ , la valeur  $\frac{1}{5550}$ , ou, en fraction décimale, 0,000 18018. — Regnault a trouvé plus tard une valeur très peu différente, avec un appareil qui donne des résultats plus précis.

**228. Méthode générale pour déterminer les coefficients de dilatation absolue des liquides autres que le mercure.** — La dilatation absolue du mercure étant connue, on emploie, pour les autres liquides, une méthode fondée sur cette remarque que, lorsqu'un liquide placé dans une enveloppe éprouve une élévation de température, on peut considérer la dilatation absolue comme égale à la somme de la dilatation apparente et de la dilatation de l'enveloppe (198) (\*).

(\*) Pour le démontrer, supposons le liquide placé dans une enveloppe graduée en parties d'égales capacités, la capacité d'une division à la température  $0^\circ$  étant prise pour unité de volume. Soit  $V_0$  le volume du liquide à  $0^\circ$ , soit  $V$  le volume apparent à  $t$  degrés. L'accroissement de volume apparent est de  $V - V_0$ ; par suite, l'accroisse-

Dès lors, si, dans une enveloppe de verre, on fait une première expérience avec du mercure, l'observation de la dilatation apparente permettra de calculer la *dilatation de l'enveloppe*, puisque la dilatation absolue du mercure sera connue. — Si maintenant, dans ce même vase, on fait une seconde expérience avec un autre liquide quelconque, l'observation de la dilatation apparente permettra de calculer la *dilatation absolue du liquide*, puisque l'expérience précédente fournira la dilatation de l'enveloppe.

Pour ces deux opérations, on peut employer soit le procédé du *thermomètre à poids*, soit le procédé du *thermomètre à tige*.

229. **Procédé du thermomètre à poids.** — Dulong et Petit faisaient usage d'un vase de verre d'une forme particulière, dit *thermomètre à poids*. C'est un réservoir de verre cylindrique R (fig. 192), surmonté d'un tube t recourbé en forme de crochet, et terminé en pointe. — Avec cet instrument, les deux opérations que l'on vient d'indiquer s'effectuent de la manière suivante :

1<sup>o</sup> *Détermination du coefficient de dilatation de l'enveloppe.* — L'enveloppe de verre ayant été pesée, on l'emplit de mercure (en opérant comme pour un thermomètre ordinaire); on l'environne de glace fondante, en plongeant la pointe dans le mercure, de manière qu'il se remplisse complètement de mercure à la température de 0°, et on le pèse de nouveau : l'accroissement de poids P<sup>0</sup> est le poids du mercure qui remplit l'enveloppe à 0°. — On introduit alors l'appareil dans une enceinte à une température connue T (on peut le porter, par exemple, à 100°, en l'introduisant dans l'étuve de la figure 187); une petite quantité de mercure s'échappe par l'extrémité



Fig. 192.  
Thermomètre  
à poids.

ment apparent éprouvé par l'unité de volume, ou la *dilatation apparente*, est  $\Delta = \frac{V - V_0}{V_0}$ . Nous allons chercher à évaluer cette expression au moyen de la dilatation absolue et de la dilatation de l'enveloppe.

Si l'on désigne par K la dilatation éprouvée par l'unité de volume de la matière de l'enveloppe, entre 0 et t, chacune des divisions observées à t degrés vaut 1 + K, en sorte que le volume réel de la partie de l'enveloppe occupée par le liquide à t degrés est V(1 + K). D'autre part, si l'on désigne par D la dilatation absolue de l'unité de volume du liquide entre 0 et t, le volume du liquide à t degrés est V<sub>0</sub>(1 + D). Or le volume réel du contenant à t degrés est égal au volume réel du contenu : donc,

$$V(1 + K) = V_0(1 + D),$$

d'où l'on tire

$$\Delta = \frac{V - V_0}{V_0} = \frac{D - K}{1 + K} \quad \text{et} \quad D = K + \Delta(1 + K).$$

Or, d'après ce qu'on a vu sur la dilatation des corps solides, le nombre K est toujours très petit par rapport à l'unité, en sorte que le second membre se réduit sensiblement à  $\Delta + K$ ; c'est ce qu'exprime l'énoncé qui précède.

du tube; on la recueille dans une coupelle, et on détermine son poids p<sup>0</sup>. Le poids du mercure restant est P - p.

Or, si l'appareil était ramené à 0°, le mercure restant laisserait un espace vide dont le volume représenterait sa contraction apparente dans le verre, en revenant de T à 0°, ou sa dilatation apparente de 0° à T; ce volume serait d'ailleurs précisément celui qui était occupé par le poids p de mercure à 0°. D'autre part, les volumes peuvent être représentés par les poids de mercure à 0° qui leur correspondent : dès lors, p représente la dilatation, dans le verre, d'une quantité de mercure représentée par P - p, pour une variation de température de T degrés. Par suite, le *coefficient de dilatation apparente*, ou la dilatation apparente  $\mu$  de l'unité de volume, pour une élévation de température d'un degré, est

$$\mu = \frac{p}{(P - p)T};$$

en retranchant ce coefficient du coefficient de dilatation absolue du mercure  $\frac{1}{5550}$ , on a le coefficient de dilatation k de l'enveloppe,

$$k = \frac{1}{5550} - \mu. (*)$$

2<sup>o</sup> *Détermination du coefficient de dilatation d'un liquide quelconque.* — On reprend la même enveloppe; on y introduit le liquide dont on cherche le coefficient de dilatation absolue d, et on répète la même série d'opérations. Soit P' le poids du liquide qui remplit l'appareil à 0°, et p' le poids qui s'en échappe à la température T'; le coefficient de dilatation apparente  $\delta$  de ce liquide dans le verre est

$$\delta = \frac{p'}{(P' - p')T'};$$

par suite, le coefficient de dilatation d du liquide est

$$d = \delta + k,$$

k étant connu par l'expérience précédente.

Cette méthode est commode, en ce qu'elle n'exige aucune graduation préalable à effectuer sur l'enveloppe qui doit servir à l'expérience.

(\*) Dulong et Petit ont trouvé, pour le coefficient de dilatation apparente  $\mu$  du mercure, dans les enveloppes de verre qu'ils employaient, la valeur  $\frac{1}{6480}$ . Il en résulte que le coefficient de dilatation de ce verre était  $\frac{1}{5550} - \frac{1}{6480}$ , ou sensiblement  $\frac{1}{38070}$ . — Lorsqu'on veut se contenter d'évaluer approximativement la dilatation d'une enveloppe formée d'un verre quelconque, on peut faire usage de ce coefficient; mais lorsqu'il s'agit de recherches précises, il est indispensable de déterminer toujours, en opérant comme il vient d'être dit, la valeur particulière du coefficient de dilatation de l'enveloppe elle-même.

Elle n'a d'autre limite d'exactitude que celle de la sensibilité de la balance. — Nous indiquerons plus loin (258) comment le même instrument peut également servir à déterminer les températures.

250. **Procédés du thermomètre à tige.** — On prend une enveloppe thermométrique ordinaire, dont nous supposons la tige bien cylindrique et préalablement partagée en divisions d'égales longueurs. On détermine, par une expérience préliminaire, le nombre  $N$  qui représente la capacité du réservoir jusqu'au zéro de la graduation, en prenant pour unité la capacité d'une division (\*). — On effectue ensuite les deux opérations suivantes :

1° **Détermination du coefficient de dilatation de l'enveloppe.** — On introduit du mercure dans l'enveloppe, de manière que, l'instrument étant plongé dans la glace fondante, le liquide arrive à l'une des divisions inférieures de la tige : soit  $n$  le numéro de cette division;  $n + N$  est le volume du mercure que contient l'enveloppe à 0°. On porte ensuite l'appareil à une température connue  $T$  (à 100 degrés, par exemple), et on détermine le numéro  $n_1$  de la division à laquelle arrive le mercure;  $n_1 - n$  est la *dilatation apparente* de toute la masse du mercure, pour une élévation de température de  $T$  degrés. Donc, le *coefficient de dilatation apparente*  $\mu$ , ou la dilatation apparente de l'unité de volume pour une élévation de température d'un degré, est

$$\mu = \frac{n_1 - n}{(n + N)T};$$

en le retranchant du coefficient de dilatation absolue du mercure  $\frac{1}{5550}$ , on a le coefficient de dilatation de l'enveloppe, savoir :

$$k = \frac{1}{5550} - \mu.$$

(\*) Voici en quoi consiste cette opération : l'enveloppe thermométrique étant remplie à peu près complètement de mercure, on la place dans la glace fondante, et l'on note la division  $n$  où s'arrête le mercure. On porte ensuite l'instrument sur la balance, et l'on en fait la tare. On fait alors sortir, en chauffant un peu le réservoir, une quantité de mercure telle que, lorsqu'on replacera l'instrument dans la glace, le niveau s'arrête à une division un peu supérieure au zéro de la graduation; on note cette division  $n'$ , et, reportant l'instrument sur la balance, on détermine la diminution de poids  $p$ . On connaît ainsi le poids  $p$  du mercure qui occupait à zéro  $n - n'$  divisions. Enfin, on vide entièrement l'enveloppe, et la nouvelle diminution de poids  $P$  exprime le poids du mercure qui, à zéro, remplissait l'instrument jusqu'à la division  $n'$ , ou dont le volume était  $N + n'$  ( $N$  étant la capacité du réservoir jusqu'au zéro de la graduation). — Si l'on exprime que les poids  $P$  et  $p$  de mercure sont entre eux comme les volumes qu'ils occupent à zéro, on a :

$$\frac{N + n'}{n - n'} = \frac{P}{p},$$

d'où l'on tire la valeur de l'inconnue  $N$  :

$$N = \frac{P}{p} (n - n') - n'.$$

2° **Détermination du coefficient de dilatation absolue d'un liquide quelconque.** — Dans la même enveloppe thermométrique, on introduit le liquide dont on cherche le coefficient de dilatation absolue, et on lit encore les divisions  $n'$  et  $n'_1$ , auxquelles arrive le liquide aux températures 0° et  $T'$ . Le coefficient de dilatation apparente  $\delta$  du liquide est

$$\delta = \frac{n'_1 - n'}{(n' + N)T'};$$

en y ajoutant le coefficient de dilatation de l'enveloppe  $k$ , on a le coefficient de dilatation absolue du liquide,

$$d = \delta + k.$$

Quant aux conditions dans lesquelles on fait cette seconde expérience, il faut remarquer que la température choisie  $T'$  n'est généralement pas celle de 100°; c'est une température tantôt supérieure, tantôt inférieure, selon la volatilité du liquide sur lequel on opère. — On place l'instrument dans un bain d'eau ou d'huile, contenu dans une caisse rectangulaire dont une des faces est formée par une glace de verre. La température du bain est donnée par un thermomètre à mercure, placé à côté de l'enveloppe thermométrique qui contient le liquide à étudier : de là, le nom de procédé des *thermomètres comparés*, par lequel on désigne cette disposition expérimentale.

251. **Variations du coefficient de dilatation absolue d'un même liquide à diverses températures.** — Lorsqu'on détermine les *coefficients moyens* de dilatation absolue d'un liquide entre 0° et des températures de plus en plus élevées, on trouve des nombres qui vont généralement en croissant, surtout lorsqu'il s'agit de liquides volatils.

M. Isidore Pierre a déduit, d'un grand nombre d'expériences, les valeurs du *coefficient vrai* de dilatation de divers liquides, soit à la température de 0°, soit à la température d'ébullition de chacun d'eux : c'est-à-dire l'accroissement éprouvé par l'unité de volume, en passant, soit de 0° à 1°, soit de la température d'ébullition à cette même température augmentée de 1 degré. — Voici quelques-uns de ces résultats : on remarquera que, pour un même liquide, les nombres de la seconde colonne sont notablement plus grands que ceux de la première.

COEFFICIENTS DE DILATATION VRAIS

|                              | A ZÉRO.   | A LA TEMPÉRATURE D'ÉBULLITION. | TEMPÉRATURES D'ÉBULLITION. |
|------------------------------|-----------|--------------------------------|----------------------------|
| Alcool . . . . .             | 0,001 049 | 0,001 496                      | 78,5                       |
| Éther . . . . .              | 0,001 515 | 0,001 647                      | 35,5                       |
| Aldéhyde . . . . .           | 0,001 654 | 0,001 827                      | 22,0                       |
| Sulfure de carbone . . . . . | 0,001 140 | 0,001 249                      | 47,9                       |
| Brome . . . . .              | 0,001 058 | 0,001 168                      | 65,0                       |
| Chloroforme . . . . .        | 0,001 107 | 0,001 520                      | 65,3                       |



**252. Coefficients de dilatation des liquides très volatils, à des températures très supérieures à leur point d'ébullition normal.** — Lorsqu'on renferme un liquide volatil dans une enveloppe suffisamment résistante, il est possible de le porter à une température extrêmement élevée sans que l'ébullition se produise; on peut donc étudier, dans ces conditions, la dilatation du liquide à des températures bien supérieures à celle de son point d'ébullition normal.

Cette étude a été faite par Drion: il a reconnu que le coefficient de dilatation vrai des liquides très volatils va en augmentant très rapidement avec la température, et qu'il peut même atteindre des valeurs égales à deux ou trois fois celle du coefficient de dilatation de l'air. — Voici quelques nombres tirés de ce travail:

## COEFFICIENTS DE DILATATION VRAIS:

|                      | à 0°.     | à 50°.    | à 90°.    | à 150°.   |
|----------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Acide hypoazotique.  | 0,001 446 | 0,002 021 | 0,005 081 | "         |
| ether chlorhydrique. | 0,001 485 | 0,002 045 | 0,002 910 | 0,005 051 |
| Acide sulfuréux.     | 0,001 754 | 0,002 558 | 0,004 147 | 0,009 751 |

**253. Maximum de densité de l'eau.** — Lorsqu'on refroidit simultanément, à partir de 15°, par exemple, un thermomètre à mercure et une enveloppe thermométrique contenant de l'eau, on voit d'abord les liquides baisser à la fois dans les deux instruments; mais, lorsque la température arrive aux environs de 4°, si le niveau du mercure continue à descendre, celui de l'eau remonte. — Il y a donc, aux environs de 4°, une température à laquelle le volume de l'eau passe par un *minimum*; par suite, la densité passe par un *maximum*.

**254. Expériences de Despretz.** — L'expérience précédente, effectuée avec précision, donne directement la température à laquelle le volume *apparent* de l'eau est un minimum: pour trouver la température qui correspond au minimum de volume *réel*, c'est-à-dire au maximum de densité, il faut tenir compte de la variation de volume de l'enveloppe. — C'est ce qu'a fait Despretz, en étudiant préalablement, comme il a été dit (250), la dilatation de l'enveloppe employée: c'est ainsi qu'il a pu fixer très approximativement à 4° la température du maximum de densité de l'eau.

Dans ce même travail, Despretz a déterminé les volumes et les densités de l'eau, de degré en degré, en prenant pour unité le volume et la densité de l'eau à 4°. — Les résultats ont été les suivants:

| TEMPÉRATURES. | VOLUME DE L'EAU. | DENSITÉ DE L'EAU. |
|---------------|------------------|-------------------|
| 0°            | 1,000 127        | 0,999 873         |
| 4°            | 1,000 000        | 1,000 000         |
| 10°           | 1,000 269        | 0,999 751         |
| 20°           | 1,001 79         | 0,998 215         |
| 50°           | 1,004 55         | 0,995 688         |
| 40°           | 1,007 75         | 0,992 529         |
| 50°           | 1,012 05         | 0,988 095         |
| 100°          | 1,045 45         | 0,958 654         |

Enfin, en profitant de cette remarque, que l'on peut abaisser jusque vers — 20° la température d'un thermomètre à eau, bien purgé d'air, sans que le liquide se congèle, Despretz a pu constater que l'accroissement de volume, déjà observé pour des températures décroissantes de 4° à 0°, se poursuit au-dessous de 0°, jusqu'au moment où il devient impossible de maintenir l'eau à l'état liquide.

**255. Expérience de Hope.** — On constate, dans les Cours, l'existence du maximum de densité de l'eau, au moyen de l'expérience suivante, qui est due au physicien écossais Hope. — Une éprouvette de verre M (fig. 195) contient de l'eau: deux thermomètres A et B plongent, l'un, dans les couches supérieures du liquide, l'autre dans les couches inférieures; le manchon métallique C, qui entoure la partie moyenne de l'éprouvette, contient de la glace. L'eau de l'éprouvette étant primitivement à 10°, par exemple, on voit bientôt les deux thermomètres indiquer un abaissement de température; mais le thermomètre inférieur baisse d'abord plus vite que le thermomètre supérieur, les couches d'eau refroidies acquérant d'abord une plus grande densité, et gagnant successivement le fond du vase. Lorsque B est arrivé à 4°, il demeure *stationnaire*, tandis que A continue à descendre, d'abord jusqu'à 4°, puis au-dessous de 4°, et jusqu'à zéro. On en conclut que l'eau, à mesure qu'elle se refroidit au-dessous de 4°, au niveau de la galerie C, acquiert des densités moindres et gagne la partie supérieure du vase (\*).

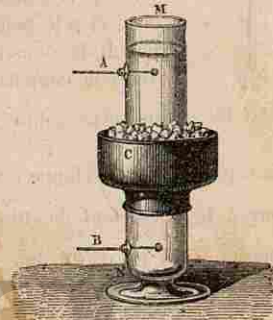


Fig. 195.  
Maximum de densité de l'eau.

**256. Emploi du thermomètre à poids, pour la détermination du coefficient de dilatation cubique des corps solides.** — Le thermomètre à poids, dont nous avons fait usage pour étudier les dilatations des liquides (229), a été appliqué par Dulong et Petit à la détermination directe du coefficient de dilatation cubique de quelques corps solides.

On donne au corps la forme d'un petit cylindre, et on l'introduit dans le réservoir, avant de souder à celui-ci le tube qui le surmonte

(\*) Cette expérience permet de concevoir comment, dans les lacs, la température de l'eau, à partir d'une certaine profondeur, demeure invariablement égale à 4°, soit pendant les chaleurs de l'été, soit pendant les froids de l'hiver. Les variations de température de la surface, qui se font sentir jusqu'à une certaine distance, donnent toujours à l'eau une densité moindre que celle des parties profondes. Il n'y a donc pas de raison pour que la température devienne uniforme dans la masse, par le mélange des diverses couches de liquide.

(fig. 194) : on remplit l'appareil de mercure (\*), et on exécute es mêmes manipulations et les mêmes pesées que précédemment (229).

— Pour poser l'équation du problème, nous écrirons que la capacité intérieure de l'enveloppe à T degrés est égale à la somme des volumes du corps solide et du mercure qu'elle contient, à cette température.



Fig. 194.

Soit  $\pi$  le poids (ou mieux la masse) du corps solide, déterminé avant l'expérience, et  $\Delta$  sa densité à zéro; soit toujours  $P$  le poids de mercure contenu dans l'appareil à zéro, et  $p$  le poids de mercure qui s'en échappe à T degrés. Soit  $D$  la densité du mercure à zéro. La capacité intérieure de l'appareil à zéro est égale à la somme des volumes du corps solide,  $\frac{\pi}{\Delta}$ , et du mercure,  $\frac{P}{D}$ ; donc, à T degrés,

la capacité de l'enveloppe est devenue  $\left(\frac{\pi}{\Delta} + \frac{P}{D}\right)(1 + kT)$ , en désignant par  $k$  le coefficient de dilatation cubique du verre. D'autre part, le mercure qui est resté dans l'appareil aurait à 0° un volume  $\frac{P-p}{D}$ ; donc, si  $m$  est le coefficient de dilatation absolue du mercure, son volume à T degrés est  $\frac{P-p}{D}(1 + mT)$ . Enfin, le corps solide a acquis à T degrés le volume  $\frac{\pi}{\Delta}(1 + xT)$ ,  $x$  étant son coefficient de dilatation cubique. On aura donc l'équation

$$\left(\frac{\pi}{\Delta} + \frac{P}{D}\right)(1 + kT) = \frac{P-p}{D}(1 + mT) + \frac{\pi}{\Delta}(1 + xT),$$

équation du premier degré, d'où l'on tirera la valeur de  $x$ .

**257. Coefficient de dilatation d'un gaz, sous pression constante. — Loi de Gay-Lussac.** — *Le coefficient de dilatation d'un gaz, sous pression constante, est le nombre qui exprime l'accroissement éprouvé par l'unité de volume de ce gaz, pour une élévation de température d'un degré.*

Les expériences de Gay-Lussac, qui seront décrites plus loin, l'amènent à énoncer la loi générale suivante : *Tous les gaz ont, entre 0°*

(\*) Dans les expériences de Dulong et Petit, les métaux qui auraient pu être attaqués par le mercure avaient été couverts d'une couche de vernis.

et 100°, le même coefficient de dilatation (loi de Gay-Lussac). — De plus, les expériences de Davy le conduisirent à considérer la valeur de ce coefficient comme indépendante de la pression sous laquelle la dilatation se produit.

Nous verrons que cette loi ne doit pas être considérée comme rigoureusement exacte; mais elle est, comme la loi de Mariotte, suffisamment approchée pour permettre de calculer, sans grande erreur, les variations de volume des gaz, pourvu qu'ils soient assez éloignés de leur point de liquéfaction.

**258. Formules relatives à la dilatation des gaz sous pression constante.** — Si l'on désigne par  $\alpha$  le coefficient de dilatation d'un gaz, par  $V_0$ ,  $V$  et  $V'$  les volumes qu'occupe, sous une pression constante, une même masse de ce gaz portée successivement aux températures de 0°,  $t$  et  $t'$  degrés, on a, en raisonnant comme plus haut (215), les relations :

$$(1) \quad \begin{cases} V = V_0(1 + \alpha t) \\ V_0 = V \frac{1}{1 + \alpha t} \\ V' = V \frac{1 + \alpha t'}{1 + \alpha t} \end{cases}$$

Ces formules supposent que la pression du gaz n'a pas varié. — Supposons maintenant que la pression varie en même temps que la température : si l'on admet que le coefficient de dilatation  $\alpha$  soit indépendant de la pression (257), on aura tous les éléments nécessaires pour résoudre le problème suivant :

**259. Problème général.** — *Étant donné le volume d'une masse gazeuse, à la température  $t$  et sous la pression  $H$ , trouver le volume  $V'$  de la même masse à la température  $t'$  et sous la pression  $H'$ .* — Supposons d'abord que la pression seule varie, et désignons par  $V_1$  le volume qu'occuperait le gaz à  $t$  degrés et sous la pression  $H'$ ; on aura, d'après la loi de Mariotte :

$$V_1 = V \frac{H}{H'}$$

En faisant varier maintenant la température, on aura

$$V' = V_1 \frac{1 + \alpha t'}{1 + \alpha t},$$

ou, en remplaçant  $V_1$  par sa valeur,

$$V' = V \times \frac{H}{H'} \times \frac{1 + \alpha t'}{1 + \alpha t},$$

équation qui peut s'écrire sous la forme plus symétrique :

$$(2) \quad \frac{VH'}{1 + \alpha t'} = \frac{VH}{1 + \alpha t}$$

On peut considérer l'une ou l'autre de ces deux expressions égales comme représentant la force élastique de la masse gazeuse sous l'unité de volume à la température  $0^{\circ}$ ; ou bien encore le volume occupé par la masse gazeuse à  $0^{\circ}$  quand sa force élastique est égale à l'unité.

La formule (2) est connue sous le nom de formule de Gay-Lussac.

*Remarque.* — Ce résultat conduit immédiatement à la solution de la question suivante :

Étant donnée la densité  $D$  d'un gaz à la température  $t$  et sous la pression  $H$ , trouver la densité  $D'$  à la température  $t'$  et sous la pression  $H'$ . En effet, les densités d'une même masse de gaz étant en raison inverse des volumes qu'elle acquiert, on aura :

$$\frac{D'}{D} = \frac{V}{V'}$$

mais la formule (2) donne

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

En substituant, il vient

$$(5) \quad D' \frac{1 + \alpha t'}{H'} = D \frac{1 + \alpha t}{H}$$

**240. Évaluation du volume ou de la densité d'une masse gazeuse, dans les conditions normales de température et de pression.** — L'un des problèmes que l'on a le plus fréquemment à résoudre est celui où, connaissant le volume  $V$  ou la densité  $D$  d'une masse gazeuse à une température  $t$  et sous une pression  $H$ , on cherche le volume  $V_0$  ou la densité  $D_0$  dans les conditions normales de température et de pression, c'est-à-dire à  $0^{\circ}$  et sous la pression de 76 centimètres. — Dans les formules (2) et (5), il suffit de faire  $t' = 0$  et  $H' = 76$ ; il vient alors :

$$(4) \quad V_0 = V \frac{H}{76} \frac{1}{1 + \alpha t}$$

$$D_0 = D \frac{76}{H} (1 + \alpha t)$$

**241. Détermination du coefficient de dilatation des gaz. — Expériences de Gay-Lussac.** — Le gaz, préalablement desséché, est introduit dans un réservoir de verre muni d'une tige  $AB$  (fig. 195).

Une petite colonne de mercure  $mn$  le sépare de l'atmosphère extérieure (\*). La tige a été partagée en parties d'égales capacités, et l'on a déterminé, par une expérience préliminaire, le rapport entre la capacité du réservoir jusqu'au zéro de la division, et celle d'une division de la tige (\*\*). — L'appareil étant placé horizontalement dans une caisse métallique  $DD'$ , on le porte successivement aux températures de

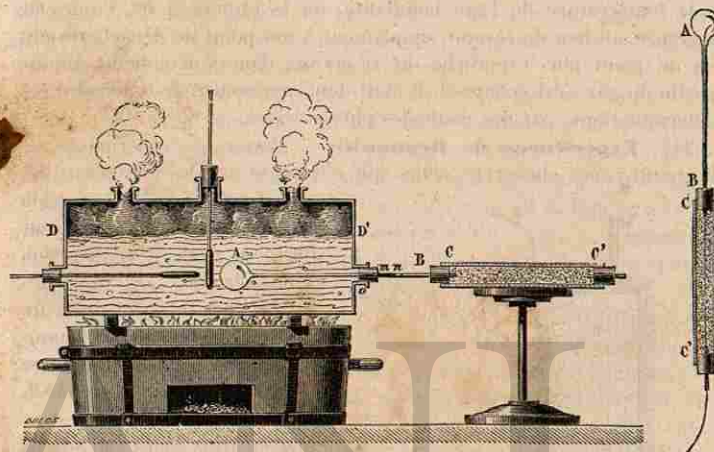


Fig. 195. — Dilatation des gaz: appareil de Gay-Lussac.

Fig. 196.

la glace fondante et de la vapeur d'eau bouillante; à chacune de ces deux températures, on note la position de l'index de mercure. — Désignons par  $V_0$  le nombre de divisions occupées par le gaz à  $0^{\circ}$  (y compris celles que représente la capacité du réservoir); soit  $V$  son volume apparent, ou le nombre de divisions qu'il occupe à la température  $T$  de l'eau bouillante, et  $k$  le coefficient de dilatation cubique du verre. Le volume réel du gaz à la température  $T$  est  $V(1 + kT)$ ; par suite, le coefficient de dilatation  $\alpha$  du gaz est :

$$\alpha = \frac{V(1 + kT) - V_0}{V_0 T}$$

(\*) Pour introduire dans l'appareil de l'air desséché, on commençait par remplir de mercure le réservoir  $A$  et la tige, en opérant comme pour la construction du thermomètre; on adaptait ensuite à l'extrémité de la tige un tube plus large  $CC'$ , contenant des fragments de chlorure de calcium, et l'on renversait l'appareil, comme l'indique la figure 196; alors, à l'aide d'un fil de platine qu'on introduisait dans le tube capillaire, on déterminait la sortie du mercure, qui se trouvait ainsi remplacé par de l'air desséché. Avec quelques précautions, on parvenait à n'avoir plus dans le tube que la petite colonne de mercure qui devait servir d'index, et l'appareil était prêt pour l'expérience.

(\*\*) Voir la note de la page 186.

Gay-Lussac a trouvé, pour l'air et pour les divers gaz qu'il a étudiés, le nombre 0,00575.

Deux causes d'erreur principales doivent être signalées dans les expériences de Gay-Lussac : 1° l'imparfaite dessiccation du gaz ; 2° l'insuffisance de l'index mercuriel, pour séparer le gaz de l'atmosphère extérieure : on peut s'assurer, en effet, que si, après avoir porté l'appareil à la température de l'eau bouillante, on le ramène à 0°, l'index de mercure, au lieu de revenir simplement à son point de départ, revient en un point plus rapproché du réservoir, d'où l'on conclut qu'une partie du gaz s'est échappée. Il était donc nécessaire de reprendre ces déterminations, par des méthodes plus précises.

242. **Expériences de Regnault.** — Parmi les expériences de Regnault, nous choisirons celles qui ont porté sur les dilatations des gaz entre 0° et 100°, la pression

étant maintenue toujours sensiblement égale à la pression atmosphérique.

Le gaz sera introduit dans un ballon de verre (fig. 197), communiquant par un tube capillaire avec un manomètre à air libre GANM, muni à sa partie inférieure d'un robinet à trois voies (fig. 156) ; les deux branches du manomètre sont placées dans un bain d'eau, qui les maintient à une température constante. Deux points de repère sont tracés sur le verre, l'un en B, l'autre en D, sur les parties étroites du tube manométrique. Le tube capillaire du ballon est réuni au manomètre par un tube métallique à trois branches ; dans la troisième branche, est mastiqué un petit tube T, qui sera mis en communication successivement avec une machine

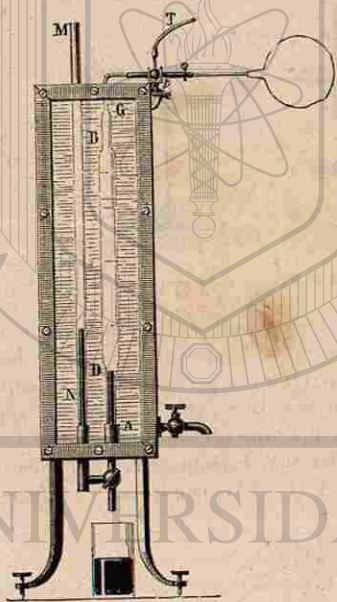


Fig. 197. — Appareil de Regnault.

pneumatique et avec un réservoir contenant le gaz sur lequel on doit opérer. Le ballon est placé dans une chaudière, disposée comme l'étuve qui sert à déterminer le centième degré du thermomètre (\*) (fig. 187).

(\*) Le degré de température étant défini par la dilatation de l'air (212), on ne peut se servir d'un thermomètre dans les expériences destinées à déterminer le coefficient de dilatation de l'air : il est donc nécessaire d'étudier la dilatation du gaz entre les températures des deux points fixes, 0° et 100°, températures indépendantes de la nature du corps thermométrique.

— Pour avoir dans l'appareil du gaz parfaitement sec, on introduit d'abord un peu de mercure dans le manomètre, et l'on tourne le robinet inférieur de manière à intercepter la communication entre les deux branches. On chauffe alors le ballon, afin de vaporiser l'humidité adhérente au verre ; on fait le vide dans l'appareil, et on laisse entrer du gaz, qui se dessèche en traversant des tubes à ponce sulfurique ; on fait encore le vide, on laisse entrer une nouvelle quantité de gaz, et ainsi de suite, une douzaine de fois, de manière à être certain que l'appareil ne contient plus trace d'humidité.

L'appareil ayant été rempli une dernière fois de gaz sec, on entoure le ballon de glace fondante : on rétablit la communication entre les deux branches du manomètre, en plaçant le robinet R dans la position 1 (fig. 156), et l'on verse du mercure en M, de manière à amener le niveau dans l'autre branche au trait supérieur B ; le liquide s'élève alors à la même hauteur de part et d'autre. On ferme à la lampe le tube de verre T. On note la hauteur H du baromètre et la température extérieure  $t$ . — C'est la première partie de l'opération.

On remplace la glace fondante par de l'eau qu'on porte à l'ébullition. Une partie du gaz passe dans le manomètre, en même temps que le niveau du mercure s'élève à gauche, par suite de l'augmentation de force élastique. On fait alors écouler du mercure par le robinet R, en le tournant dans la position 2 (fig. 156), afin de diminuer la pression : les dimensions du ballon et la capacité BD ont été choisies de façon que le niveau du mercure arrive au trait inférieur D lorsque les deux colonnes mercurielles n'offrent plus qu'une différence de hauteur de quelques millimètres. On ramène le robinet dans la position 1, et l'on détermine la force élastique H' du gaz, laquelle est exprimée par la hauteur barométrique, augmentée ou diminuée de la petite différence de hauteur du mercure dans les deux branches ; on note la température extérieure  $t'$ , et la température  $\theta$  de l'eau qui entoure le manomètre. — C'est la seconde partie de l'opération.

Soit  $V_0$  le volume du ballon à 0°, jaugé à l'eau distillée ;  $v$ , le volume du tube capillaire et de la partie supérieure du tube manométrique, jusqu'au trait supérieur B, volume jaugé au mercure, à la température extérieure ;  $u$ , le volume de la partie comprise entre les traits B et D, jaugé au mercure, à la température du bain qui l'entoure. — Nous allons calculer le volume total du gaz, ramené à 0° et à la pression de 76 centimètres, ce volume peut s'exprimer, soit au moyen des données fournies par la première partie de l'opération, soit au moyen de données fournies par la seconde partie ; en égalant les deux expressions, nous obtiendrons une équation d'où nous pourrions tirer  $\alpha$ .

Dans la première partie de l'opération, l'air occupait, sous la pression H, d'une part, le volume  $V_0$  du ballon à 0° ; d'autre part, le volume  $v$  du tube à la température  $t$  : en ramenant chacun de ces deux

volumes de gaz à 0° et 76 centimètres, et appliquant les lois de Mariotte et de Gay-Lussac, toujours applicables quand il s'agit de petites variations de pression et de température, on a, pour le volume total,

$$\left( V_0 + \frac{v}{1 + \alpha t} \right) \frac{H}{76}.$$

Dans la seconde partie de l'opération, le ballon étant à T degrés (\*), son volume est  $V_0(1 + kT)$ ,  $k$  étant le coefficient de dilatation cubique du verre. Le gaz occupe donc, d'une part le volume  $V_0(1 + kT)$  à la température T; d'autre part, le volume  $v$  à la température  $t'$ , et le volume  $u$  à la température  $\theta$ ; comme il est à une pression  $H'$ , voisine de la pression atmosphérique, on obtient, pour seconde expression du volume total, à 0° et 76 centimètres,

$$\left( \frac{V_0(1 + kT)}{1 + \alpha T} + \frac{v}{1 + \alpha t'} + \frac{u}{1 + \alpha \theta} \right) \frac{H'}{76}.$$

En égalant ces deux expressions, il vient

$$\left( V_0 + \frac{v}{1 + \alpha t} \right) H = \left( \frac{V_0(1 + kT)}{1 + \alpha T} + \frac{v}{1 + \alpha t'} + \frac{u}{1 + \alpha \theta} \right) H'.$$

En chassant les dénominateurs, on obtient une équation qui est d'un degré trop élevé en  $\alpha$  pour qu'on puisse la résoudre directement. Pour en déduire la valeur de  $\alpha$ , Regnault employait une méthode de calcul particulière, que nous ne pouvons indiquer ici. Nous nous contenterons de faire remarquer que, si la température extérieure n'a pas changé pendant l'expérience, et si cette température est aussi celle de l'eau qui entoure le manomètre, on aura  $t = t' = \theta$ ; si l'on a, en même temps  $H' = H$ , l'équation devient

$$V_0 = \frac{V_0(1 + kT)}{1 + \alpha T} + \frac{u}{1 + \alpha t},$$

équation d'où il est facile de tirer la valeur de  $\alpha$ .

Pour l'air en particulier, le calcul exact, appliqué aux données de l'expérience, a donné pour le coefficient de dilatation  $\alpha$  la valeur 0,00367, qui a été adoptée par les physiciens. — On emploie souvent, dans les calculs, la valeur approchée  $\frac{1}{273}$ .

245. **Valeurs des coefficients de dilatation des divers gaz, sous pression constante.** — Le tableau suivant donne, pour quel-

(\*) Cette température T ne diffère jamais beaucoup de 100°. On la détermine exactement d'après la hauteur barométrique (207).

ques gaz, les résultats fournis par les expériences de Regnault, sous une pression sensiblement égale à la pression atmosphérique.

## COEFFICIENTS DE DILATATION.

|                             |           |
|-----------------------------|-----------|
| Hydrogène . . . . .         | 0,005 661 |
| Air . . . . .               | 0,005 670 |
| Oxyde de carbone . . . . .  | 0,005 669 |
| Acide carbonique . . . . .  | 0,005 710 |
| Protoxyde d'azote . . . . . | 0,005 719 |
| Cyanogène . . . . .         | 0,005 877 |
| Acide sulfureux . . . . .   | 0,005 905 |

On voit que les trois premiers gaz ont des coefficients de dilatation sensiblement égaux. — Pour les autres gaz, le coefficient de dilatation acquiert des valeurs d'autant plus grandes, qu'il s'agit d'un gaz plus voisin de son point de liquéfaction.

A la suite de ces expériences, Regnault en a fait d'autres, pour étudier les dilatations des gaz sous des pressions *supérieures à la pression atmosphérique*, la pression conservant d'ailleurs toujours sensiblement une même valeur pendant la durée d'une même expérience. — Il a trouvé que, pour l'hydrogène ou l'air, le coefficient de dilatation reste sensiblement indépendant de la pression. — Pour les gaz facilement liquéfiables, comme l'acide carbonique ou l'acide sulfureux, le coefficient de dilatation augmente notablement, à mesure que la pression sous laquelle on opère est plus considérable.

*En résumé*, les recherches de Regnault conduisent à conclure, ainsi que nous l'avons indiqué en commençant, que la loi de Gay-Lussac, même avec l'extension indiquée par les expériences de Davy (257), peut être appliquée, sans erreur sensible, au calcul des variations de volume des gaz, mais seulement quand il s'agit de gaz suffisamment éloignés de leur point de liquéfaction.

### CHAPITRE III

#### DENSITÉS DES GAZ

**244. Définitions.** — D'après la définition générale (98), on doit appeler *densité* ou *masse spécifique* d'un gaz, dans des conditions déterminées de température et de pression, la *masse d'un centimètre cube* de ce gaz, pris dans ces conditions. Ce serait aussi le quotient de la masse (vulgairement poids) d'un certain volume de gaz par la masse (vulgairement poids) du même volume d'eau. — Les nombres qu'on obtiendrait ainsi et qu'on peut appeler *densités* ou *poids spécifiques des gaz par rapport à l'eau*, sont essentiellement variables avec les conditions de température et de pression. On préfère introduire dans les calculs les *densités prises par rapport à l'air*.

On appelle, en général, *densité d'un gaz*, le rapport entre les poids de deux volumes égaux de ce gaz et d'air, pris dans des conditions identiques de température et de pression. — Quand il s'agit d'un gaz auquel la loi de Mariotte est applicable aussi bien qu'à l'air, et quand le coefficient de dilatation du gaz est le même que celui de l'air, ce rapport est indépendant des conditions de température et de pression, pourvu que ces conditions restent les mêmes pour le gaz et pour l'air. On voit, en effet, que des volumes égaux de ce gaz et d'air resteront toujours égaux entre eux, quelles que soient les variations de température et de pression.

Mais il n'en serait plus de même pour un gaz qui ne suivrait pas la loi de Mariotte (159), et dont le coefficient de dilatation différerait notablement de celui de l'air (245). — Dès lors, pour définir avec précision la densité d'un gaz, il faut convenir d'une température et d'une pression particulières, sous lesquelles la détermination devra être effectuée. On a choisi la température de 0° et la pression de 76 centimètres. — On appelle alors plus particulièrement *densité d'un gaz*, le rapport entre les poids de deux volumes égaux du gaz et d'air, pris l'un et l'autre à 0° et sous la pression de 76 centimètres.

**245. Détermination des densités des gaz ; méthode de Regnault.** — La méthode employée par Regnault consiste essentiellement dans les deux opérations suivantes : — 1° détermination du poids de gaz qui remplit, à 0° et sous une pression voisine de 76<sup>cm</sup>, un ballon de verre d'une grande capacité; on en conclut, au moyen de la loi de Mariotte, le poids du gaz qui remplirait le ballon à 0° et sous la pression de 76<sup>cm</sup>; — 2° détermination, par une seconde expérience, du poids d'air qui remplit le même ballon, dans des conditions semblables : on en déduit le poids de l'air qui le remplirait à 0° et 76<sup>cm</sup>. — Voici comment on effectue ces deux déterminations.

1° Le ballon A (fig. 198), qui doit servir aux expériences, est fermé à sa partie supérieure par une monture à robinet R; on le place dans la glace fondante et on le met en communication, par le tube à trois branches T, d'une part avec la machine pneumatique; d'autre part, par l'intermédiaire de tubes desséchants, avec l'appareil producteur du gaz. Des robinets, qui ne sont pas représentés sur la figure, permettent d'intercepter ou de rétablir à volonté ces communications. — Après avoir fait le vide dans le ballon, on laisse entrer le gaz sur lequel doit porter l'expérience; on fait le vide de nouveau, et l'on recommence cinq ou six fois la même manipulation. Après la dernière rentrée de gaz, on laisse quelques instants le ballon en communication avec l'atmosphère, et l'on ferme le robinet R; on observe la pression barométrique H. — On retire le ballon de la glace, on l'essuie, et on le laisse reprendre la température du laboratoire; on le suspend sous l'un des plateaux de la balance, et l'on en fait la tare, comme nous l'indiquerons plus loin.

Il est clair que, si l'on pouvait maintenant extraire complètement le gaz, la perte de poids que le ballon éprouverait donnerait le poids de gaz qui le remplit à 0° et sous la pression H. Mais on sait que les meilleures machines pneumatiques ne peuvent faire un vide absolu : on a recours alors au procédé suivant, qui conduit à un résultat équivalent.

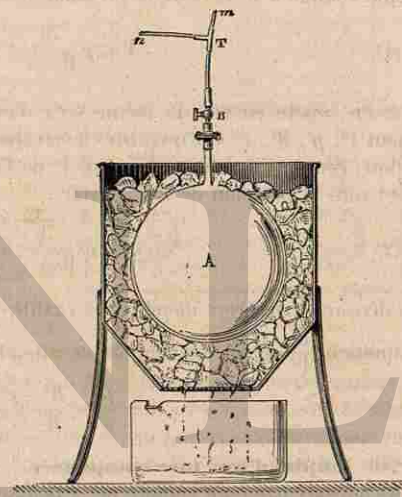


Fig. 198.

— On replace le ballon dans la glace, et, au moyen du tube T, on le remet en communication, d'une part avec la machine pneumatique, d'autre part avec un manomètre barométrique comme celui de la figure 157. On se contente de faire le vide autant que possible, et on lit, sur le manomètre, la tension  $\varepsilon$  du gaz restant. On ferme enfin le robinet R, on détache les tubes, et on replace le ballon sous le plateau de la balance, après avoir pris les mêmes précautions que plus haut. Le poids  $p$ , qu'il faut ajouter du côté du ballon, exprime le poids de gaz qui a été enlevé par la machine, c'est-à-dire celui qui occuperait le volume du ballon à 0° et sous la pression  $H - \varepsilon$  (150); on en déduit, en appliquant la loi de Mariotte, le poids P de gaz qui remplirait le même volume à 0° et sous la pression de 76<sup>cm</sup>, savoir :

$$(1) \quad P = p \frac{76}{H - \varepsilon}.$$

2° On répète ensuite la même série d'expériences avec de l'air sec. soient  $P'$ ,  $p'$ ,  $H'$ ,  $\varepsilon'$ , les quantités correspondantes à P, p, H,  $\varepsilon$ ; on en déduit, comme plus haut, le poids P' de l'air qui emplirait le ballon à 0° et sous la pression de 76<sup>cm</sup>, savoir :

$$(2) \quad P' = p' \frac{76}{H' - \varepsilon'}.$$

En divisant membre à membre les égalités (1) et (2), et observant que le quotient  $\frac{P}{P'}$  est précisément la densité cherchée D, on a

$$D = \frac{P}{P'} \times \frac{H' - \varepsilon'}{H - \varepsilon}.$$

**246. Emploi d'une tare compensée.** — Dans l'exposé qui précède, nous n'avons pas tenu compte de la poussée qu'éprouve le ballon, de la part de l'air extérieur. — Or, considérons d'abord les opérations qui ont fourni le poids  $p$  du gaz extrait du ballon. Si, lors des deux pesées, effectuées sur le ballon plein de gaz et sur le ballon vide, l'air extérieur n'a subi aucune modification de température, de pression ou d'humidité, la poussée est, par cela même, demeurée *constante*, et le poids  $p$  est bien celui du gaz enlevé par la machine. Mais si les conditions atmosphériques ont changé entre ces deux pesées, le poids de l'air déplacé par le ballon a augmenté ou diminué d'une certaine quantité; dès lors, le poids  $p$  qu'il a fallu pour rétablir l'équilibre représente le poids de gaz extrait par la machine, augmenté ou diminué de cette même quantité. Mêmes remarques pour les deux pesées qui donnent  $p'$ .

Les physiciens qui, avant Regnault, s'étaient occupés de la recherche des densités des gaz, Biot et Arago d'abord, MM. Dumas et Boussingault ensuite, avaient cherché à déterminer exactement les conditions

atmosphériques, au moment de chacun des quatre équilibres, afin d'en déduire chacune des valeurs de la poussée, et d'en tenir compte dans le calcul. Mais ces corrections présentent toujours une certaine incertitude, qui peut entraîner des erreurs correspondantes dans les résultats. — Regnault a préféré se placer dans des conditions où l'on n'eût à effectuer aucune correction de ce genre.

A cet effet, on établit la tare du ballon, non pas avec des corps quelconques, mais à l'aide d'un second ballon A' (fig. 199), fabriqué avec le même verre, et présentant *exactement* le même volume extérieur que celui qui sert aux expériences (\*). On introduit, dans ce ballon-tare, un poids de mercure tel que, lorsque les deux ballons pleins d'air sont accrochés sous les plateaux de la balance, il faille, pour établir l'équilibre, ajouter une vingtaine de grammes du côté du ballon à robinet.

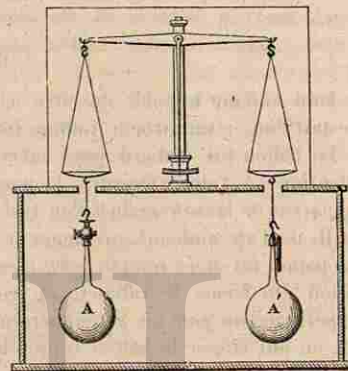


Fig. 199.

La cage de la balance est placée au-dessus d'une armoire vitrée, dont l'air est desséché par de la chaux vive; c'est dans l'atmosphère de cette armoire que sont suspendus les ballons. — Les deux ballons A et A' éprouvent toujours des poussées égales, quels que soient les changements qui puissent survenir dans la température ou dans la pression de l'air environnant. De plus, comme ils sont formés du même verre, l'eau qui se condense à leur surface, en vertu de la propriété hygrométrique du verre, peut être considérée comme étant en égale quantité sur chacun d'eux. — L'expérience montre d'ailleurs que l'équilibre, une fois établi, persiste indéfiniment.

**247. Densités des gaz par rapport à l'eau.** — Les densités des gaz *par rapport à l'air* étant connues, il suffit, pour obtenir leurs densités *par rapport à l'eau*, c'est-à-dire les masses de l'unité de volume, de multiplier chacune de ces densités par la densité de l'air par rapport à l'eau. C'est ce que montre un raisonnement semblable

(\*) Pour obtenir deux ballons de même volume extérieur, on commence par les choisir de volumes peu différents; on prend le plus grand des deux pour le ballon A qui doit recevoir le gaz; au plus petit ballon A' on adapte une simple virole métallique, terminée par un crochet. On les emplit d'eau et on détermine exactement leurs volumes extérieurs, par la perte de poids qu'ils éprouvent quand on les plonge dans l'eau: supposons que l'on trouve, entre les volumes, une différence de 25 centimètres cubes; pour achever la compensation, on façonne à la lampe un tube de verre fermé aux deux bouts, de manière qu'il éprouve dans l'eau une perte de poids de 25 grammes: ce tube, suspendu à la virole du ballon A' comme le montre la figure 199, formera avec lui un volume total égal à celui du ballon A.

à celui qui a été fait pour les corps solides solubles dans l'eau, dont nous avons déterminé d'abord la densité par rapport à un autre liquide (106). Il reste donc à obtenir la densité de l'air, c'est-à-dire la masse d'un centimètre cube d'air à 0° et sous la pression de 76 centimètres; c'est ce qu'a fait Regnault en déterminant avec précision le poids (ou mieux la masse) du litre d'air.

248. **Poids du litre d'air.** — Les expériences qui précèdent font déjà connaître le poids  $P'$  de l'air qui remplirait le ballon A (fig. 198) à 0° et sous la pression de 76<sup>cm</sup>, savoir :

$$P' = p' \frac{76}{H' - \varepsilon'}$$

Pour obtenir le poids du litre d'air dans ces mêmes conditions, il restait donc à mesurer le volume intérieur  $V_0$  du ballon.

Le ballon fut d'abord pesé *ouvert*, c'est-à-dire contenant de l'air identique à l'air extérieur : le poids obtenu  $\pi_1$  représentait le *poids apparent* de la matière du ballon avec sa monture, dans les conditions  $t_1$ , et  $H_1$  de l'air ambiant, au moment de cette première expérience. — Le ballon fut alors rempli, à 0°, d'eau distillée purgée d'air par ébullition. On ferma le robinet, et, comme on avait choisi pour cette expérience un jour où la température extérieure  $t_2$  était inférieure à 8°, on put laisser le ballon reprendre la température ambiante, sans craindre de rupture. On détermina alors son poids  $\pi_2$ . Le nombre  $\pi_2$  représentait la somme du *poids apparent* de la matière du ballon, avec sa monture, et du *poids apparent* de l'eau, dans les conditions  $t_2$  et  $H_2$  de l'air ambiant au moment de cette seconde expérience. — La différence  $\pi_2 - \pi_1$  exprimait le *poids apparent* de l'eau, dans les conditions  $t_2$  et  $H_2$ , en négligeant seulement la petite *variation de poussée* qu'avait pu éprouver la matière du ballon et de sa monture, en passant des conditions  $t_1$  et  $H_1$  aux conditions  $t_2$  et  $H_2$ . — On avait donc, en désignant par  $Q$  le poids réel de l'eau qui occupait à 0° le volume  $V_0$  et par  $P_2$  le poids du même volume d'air à la température  $t_2$  et sous la pression  $H_2$  :

$$(1) \quad \pi_2 - \pi_1 = Q - P_2.$$

Pour calculer  $P_2$ , il suffit des données de l'une des expériences effectuées avec le ballon plein d'air sec à 0° (245) : en effet,  $p'$  étant le poids d'air qui remplit le volume  $V_0$  à 0° et sous la pression  $H' - \varepsilon'$ , on a

$$P_2 = p' \frac{H_2}{H' - \varepsilon'} \times \frac{1}{1 + \alpha t_2}.$$

En tirant, de l'équation (1), la valeur du poids de l'eau  $Q$ , évaluée en kilogrammes, et divisant par  $e_0$  la densité connue de l'eau à 0° (254), on a le volume  $V_0$  du ballon, en litres,

$$V_0 = \frac{\pi_2 - \pi_1 + P_2}{e_0}.$$

Le quotient de  $P'$  par  $V_0$  est le poids du litre d'air sec, à 0° et sous la pression de 76 centimètres. — On trouve ainsi sensiblement 1<sup>er</sup>,295.

Le poids (ou mieux la masse) du litre d'air étant 1<sup>er</sup>,295, la masse d'un centimètre cube d'air est 0<sup>er</sup>,001295, c'est-à-dire que la *densité* de l'air par rapport à l'eau, ou le *poids spécifique* de l'air par rapport à l'eau, sont représentés par le nombre abstrait 0,001295.

249. **Calcul du poids d'un volume déterminé de gaz dans des conditions données de température et de pression.** — Soit  $D$  la densité d'un gaz par rapport à l'air; proposons-nous de calculer le poids (ou mieux la masse)  $P$ , en grammes, d'un volume  $V$  de ce gaz, exprimé en centimètres cubes, à  $t$  degrés, et sous la pression  $H$ .

Le volume occupé par ce gaz, à 0° et sous la pression de 76<sup>cm</sup>, serait (240) :

$$V_0 = V \frac{H}{76} \times \frac{1}{1 + \alpha t}.$$

D'autre part, à 0° et sous la pression de 76<sup>cm</sup>, la masse d'un centimètre cube de gaz (247) est égale à 0<sup>er</sup>,001295  $\times D$ ; et par suite la masse (vulgairement le poids) du gaz sera donnée par l'expression

$$P = V \times 0,001295 \frac{H}{76} \frac{D}{1 + \alpha t}.$$

Si le volume  $V$  était exprimé en litres, et si l'on voulait obtenir  $P$  en grammes, on remplacerait dans la formule le poids du centimètre cube d'air par le poids du litre d'air 1<sup>er</sup>,295.

250. **Détermination des densités des gaz qui attaquent les métaux.** — La méthode que nous avons exposée (245) ne peut s'appliquer à des gaz capables d'attaquer les garnitures métalliques des ballons. — Voici comment on peut opérer, pour le chlore, par exemple :

On prend un flacon de verre, de 1 à 2 litres de capacité (fig. 200), se fermant avec un bouchon à l'émeri. Ce flacon étant entouré de glace fondante, on l'emplit de chlore sec, en suivant le procédé qu'on indique en chimie : on place le bouchon, et l'on note la pression  $H$  de l'atmosphère. On laisse reprendre au flacon la température du laboratoire, on l'essuie, et l'on en fait la tare au moyen d'un autre vase ayant approximativement le même volume extérieur. — On le reporte dans la glace et l'on chasse le chlore par un courant d'air sec : on le bouche, et l'on note la pression  $H'$ . Le flacon étant replacé sur la balance, on trouve qu'il faut, pour rétablir l'équilibre



Fig. 200.



avec la même tare, ajouter un poids  $\pi$  à côté du flacon. — Si l'on représente par  $p$  le poids de chlore que contenait le flacon à  $0^{\circ}$  et sous la pression  $H$ , par  $p'$  le poids d'air qu'il contenait à  $0^{\circ}$  et sous la pression  $H'$ , on a :

$$p = p' + \pi.$$

Or, si l'on a préalablement déterminé le volume  $V_0$  du flacon à  $0^{\circ}$ , le poids  $p'$  de l'air qu'il contenait pendant la pesée est égal à  $V_0 \times 0^{\circ},001295 \times \frac{H'}{76}$ . En ajoutant  $\pi$  à l'expression ainsi calculée, on connaît le poids  $p$  de chlore sur lequel on a opéré. — On en déduit le poids  $P$  de chlore qui remplirait le flacon à  $0^{\circ}$  et sous la pression de 76 centimètres, savoir :

$$P = p \times \frac{76}{H}.$$

Pour obtenir la densité du gaz, il suffira de diviser  $P$  par le poids du même volume d'air, savoir  $V_0 \times 0^{\circ},001295$ .

Nous avons supposé connu le volume  $V_0$  du flacon : pour obtenir ce volume on détermine par l'expérience l'excès  $\pi_1$  du poids du flacon plein d'eau à  $0^{\circ}$ , sur le poids du flacon plein d'air à  $0^{\circ}$  et sous la pression  $H'$ . Le poids de l'eau étant représenté par  $V_0 \times 0^{\circ},999875$  et celui de l'air par  $V_0 \times 0^{\circ},001295 \times \frac{H'}{76}$ , on aura :

$$\pi_1 = V_0 \left( 0^{\circ},999875 - 0^{\circ},001295 \times \frac{H'}{76} \right),$$

équation dont on déduira la valeur de  $V_0$ .

251. **Résultats.** — Le tableau suivant donne les densités d'un certain nombre de gaz par rapport à l'air; la plupart de ces nombres ont été déterminés par Regnault (\*).

|                             | DENSITÉS<br>par rapport à l'air. |
|-----------------------------|----------------------------------|
| Air . . . . .               | 1,0000                           |
| Hydrogène . . . . .         | 0,0695                           |
| Azote . . . . .             | 0,9714                           |
| Oxygène . . . . .           | 1,1056                           |
| Chlore . . . . .            | 2,4700                           |
| Cyanogène . . . . .         | 1,8064                           |
| Acide sulfureux . . . . .   | 2,2500                           |
| Acide carbonique . . . . .  | 1,5290                           |
| Oxyde de carbone . . . . .  | 0,9680                           |
| Protoxyde d'azote . . . . . | 1,5269                           |
| Bioxyde d'azote . . . . .   | 1,0588                           |

(\*) Chacun des nombres de ce tableau permettra d'obtenir, pour le gaz auquel il se rapporte, et par un calcul simple : la *densité absolue*, la *densité relative*, le *poids spécifique relatif* et le *poids spécifique absolu* du gaz auquel il correspond. — Par exemple, pour l'oxygène, le produit  $0^{\circ},001295 \times 1,1056 = 0^{\circ},001429$  est la densité absolue, ou masse spécifique. — Ce même nombre  $0,001429$ , considéré comme abstrait, représente la densité ou le poids spécifique de l'oxygène par rapport à l'eau. — Pour avoir le poids spécifique absolu de l'oxygène, il faudrait multiplier sa masse spécifique par l'intensité de la pesanteur, qui est 981 dynes, à Paris.

## CHAPITRE IV

### APPLICATIONS DES DILATATIONS

#### I. — APPLICATIONS DES DILATATIONS DES CORPS SOLIDES.

252. **Corrections des mesures linéaires.** — Supposons qu'une règle ait été divisée en millimètres, à une température  $\theta$ . Si l'on fait usage de cette règle pour mesurer une longueur, et si la température a une valeur notablement différente  $t$ , on remarquera que chaque division aura pris une longueur de  $1^{\text{mm}} [1 + l(t - \theta)]$ , en désignant par  $l$  le coefficient de dilatation linéaire de la règle. Si donc la lecture faite sur la règle donne un nombre  $n$  de divisions, la valeur  $L$  de la longueur mesurée sera

$$L = n [1 + l(t - \theta)].$$

253. **Pendules compensateurs.** — On met à profit l'isochronisme des petites oscillations du pendule (59) pour régulariser le mouvement des horloges, en rendant ce mouvement solidaire de celui d'un pendule ou *balancier*. Mais, si l'on veut éviter que les variations de température viennent, en modifiant la longueur du balancier, faire avancer ou retarder l'horloge, il faut faire usage de balanciers spéciaux, qu'on désigne sous le nom de *pendules compensateurs*.

Les balanciers qu'on emploie le plus ordinairement se terminent, à leur partie inférieure, par une lentille dont le poids l'emporte de beaucoup sur celui du reste de la partie oscillante. La *longueur* du pendule simple, qui ferait son oscillation dans le même temps, diffère alors peu de la distance du point de suspension au centre de gravité de la masse pesante; c'est cette distance que l'on cherche à rendre indépendante de la température.

avec la même tare, ajouter un poids  $\pi$  à côté du flacon. — Si l'on représente par  $p$  le poids de chlore que contenait le flacon à  $0^{\circ}$  et sous la pression  $H$ , par  $p'$  le poids d'air qu'il contenait à  $0^{\circ}$  et sous la pression  $H'$ , on a :

$$p = p' + \pi.$$

Or, si l'on a préalablement déterminé le volume  $V_0$  du flacon à  $0^{\circ}$ , le poids  $p'$  de l'air qu'il contenait pendant la pesée est égal à  $V_0 \times 0^{\text{r}},001295 \times \frac{H'}{76}$ . En ajoutant  $\pi$  à l'expression ainsi calculée, on connaît le poids  $p$  de chlore sur lequel on a opéré. — On en déduit le poids  $P$  de chlore qui remplirait le flacon à  $0^{\circ}$  et sous la pression de 76 centimètres, savoir :

$$P = p \times \frac{76}{H}.$$

Pour obtenir la densité du gaz, il suffira de diviser  $P$  par le poids du même volume d'air, savoir  $V_0 \times 0^{\text{r}},001295$ .

Nous avons supposé connu le volume  $V_0$  du flacon : pour obtenir ce volume on détermine par l'expérience l'excès  $\pi_1$  du poids du flacon plein d'eau à  $0^{\circ}$ , sur le poids du flacon plein d'air à  $0^{\circ}$  et sous la pression  $H'$ . Le poids de l'eau étant représenté par  $V_0 \times 0^{\text{r}},999875$  et celui de l'air par  $V_0 \times 0^{\text{r}},001295 \times \frac{H'}{76}$ , on aura :

$$\pi_1 = V_0 \left( 0^{\text{r}},999875 - 0^{\text{r}},001295 \times \frac{H'}{76} \right),$$

équation dont on déduira la valeur de  $V_0$ .

251. **Résultats.** — Le tableau suivant donne les densités d'un certain nombre de gaz par rapport à l'air; la plupart de ces nombres ont été déterminés par Regnault (\*).

|                             | DENSITÉS<br>par rapport à l'air. |
|-----------------------------|----------------------------------|
| Air . . . . .               | 1,0000                           |
| Hydrogène . . . . .         | 0,0695                           |
| Azote . . . . .             | 0,9714                           |
| Oxygène . . . . .           | 1,1056                           |
| Chlore . . . . .            | 2,4700                           |
| Cyanogène . . . . .         | 1,8064                           |
| Acide sulfureux . . . . .   | 2,2500                           |
| Acide carbonique . . . . .  | 1,5290                           |
| Oxyde de carbone . . . . .  | 0,9680                           |
| Protoxyde d'azote . . . . . | 1,5269                           |
| Bioxyde d'azote . . . . .   | 1,0588                           |

(\*) Chacun des nombres de ce tableau permettra d'obtenir, pour le gaz auquel il se rapporte, et par un calcul simple : la *densité absolue*, la *densité relative*, le *poids spécifique relatif* et le *poids spécifique absolu* du gaz auquel il correspond. — Par exemple, pour l'oxygène, le produit  $0^{\text{r}},001295 \times 1,1056 = 0^{\text{r}},001429$  est la densité absolue, ou masse spécifique. — Ce même nombre 0,001429, considéré comme abstrait, représente la densité ou le poids spécifique de l'oxygène par rapport à l'eau. — Pour avoir le poids spécifique absolu de l'oxygène, il faudrait multiplier sa masse spécifique par l'intensité de la pesanteur, qui est 981 dynes, à Paris.

## CHAPITRE IV

### APPLICATIONS DES DILATATIONS

#### I. — APPLICATIONS DES DILATATIONS DES CORPS SOLIDES.

252. **Corrections des mesures linéaires.** — Supposons qu'une règle ait été divisée en millimètres, à une température  $\theta$ . Si l'on fait usage de cette règle pour mesurer une longueur, et si la température a une valeur notablement différente  $t$ , on remarquera que chaque division aura pris une longueur de  $1^{\text{mm}} [1 + l(t - \theta)]$ , en désignant par  $l$  le coefficient de dilatation linéaire de la règle. Si donc la lecture faite sur la règle donne un nombre  $n$  de divisions, la valeur  $L$  de la longueur mesurée sera

$$L = n [1 + l(t - \theta)].$$

253. **Pendules compensateurs.** — On met à profit l'isochronisme des petites oscillations du pendule (59) pour régulariser le mouvement des horloges, en rendant ce mouvement solidaire de celui d'un pendule ou *balancier*. Mais, si l'on veut éviter que les variations de température viennent, en modifiant la longueur du balancier, faire avancer ou retarder l'horloge, il faut faire usage de balanciers spéciaux, qu'on désigne sous le nom de *pendules compensateurs*.

Les balanciers qu'on emploie le plus ordinairement se terminent, à leur partie inférieure, par une lentille dont le poids l'emporte de beaucoup sur celui du reste de la partie oscillante. La *longueur* du pendule simple, qui ferait son oscillation dans le même temps, diffère alors peu de la distance du point de suspension au centre de gravité de la masse pesante; c'est cette distance que l'on cherche à rendre indépendante de la température.

254. **Pendule de Leroy, ou à gril.** — Les figures 201 et 202

représentent le système compensateur le plus fréquemment employé. Il est dû à l'horloger Julien Leroy. — La lentille pesante C est reliée au point de suspension par une série de tiges verticales, alternativement en fer et en laiton. En examinant la figure 202, où les tiges de laiton se distinguent des tiges de fer par des hachures transversales, on voit que la dilatation de toutes les tiges de fer tend à abaisser le centre de la lentille, et que la dilatation des tiges de laiton tend à la relever. Or le laiton est plus dilatable que le fer : nous allons montrer que les longueurs relatives des deux systèmes de tiges peuvent être réglées de manière qu'il y ait compensation entre leurs allongements.

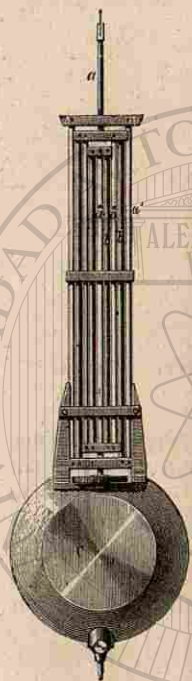


Fig. 201.



Fig. 202.

Pendule à gril.

La longueur totale du fer à 0° étant représentée par  $a + a' + a'' + a'''$ , l'allongement qu'il éprouve en passant de 0° à  $t$  degrés est,

$$(a + a' + a'' + a''')ft,$$

de même,  $b + b'$  étant la longueur totale du laiton à 0°, et  $l$  son coefficient de dilatation, l'allongement correspondant est

$$(b + b')lt.$$

Pour qu'il y ait compensation à  $t$  degrés, il faut et il suffit que l'on ait

$$(a + a' + a'' + a''')ft = (b + b')lt,$$

ou

$$\frac{a + a' + a'' + a'''}{b + b'} = \frac{l}{f}$$

condition qui est évidemment toujours réalisable. On voit en outre, que le résultat est indépendant de la température; donc la compensation, une fois réalisée pour une température particulière, subsiste à toute autre température. — Pour le fer et le laiton, le rapport  $\frac{l}{f}$  est égal à 1,5 environ.

255. **Pendule de Graham.** — Le pendule compensateur le plus ancien, celui qu'on s'accorde à regarder aujourd'hui encore comme le meilleur, a été imaginé par l'horloger anglais Graham.

Il est composée d'une tige d'acier AB (fig. 205), terminée à sa partie inférieure par un étrier CC, qui supporte un cylindre de verre M contenant du mercure. Lorsque la température s'élève, le centre de gravité du pendule tend à s'abaisser par la dilatation de la tige; mais, en même temps, le centre de gravité tend à remonter par la dilatation du mercure : le calcul montre que la compensation est possible, et que, une fois réalisée pour une température particulière, elle l'est également pour toute autre (\*).

On dispose souvent le pendule de Graham comme le représente la figure 204, en répartissant le mercure dans deux éprouvettes M, M, placées symétriquement de part et d'autre du prolongement de la tige AB.

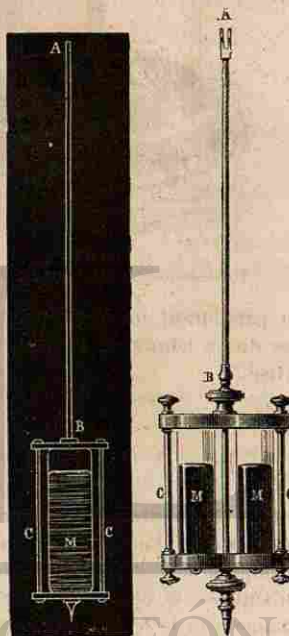


Fig. 205.

Fig. 204.

Pendule de Graham.

256. **Thermomètre de Bréguet.**

— Soient deux lames de métaux différents, de zinc et de cuivre, par exemple, appliquées l'une sur l'autre et soudées ensemble. Si l'on vient à chauffer ce système, le zinc s'allongeant plus que le cuivre, la double lame se courbe, de manière que le zinc soit à l'extérieur et le cuivre à l'intérieur de la concavité. Si le système a reçu d'avance une certaine courbure, une élévation de température tend à rendre la courbure plus prononcée.

C'est sur ces remarques que Bréguet a fondé la construction d'un thermomètre métallique d'une extrême sensibilité (fig. 205). — Trois

(\*) Voir la démonstration, dans les problèmes qui sont à la fin du volume.

petites lames d'argent, d'or et de platine, ayant été superposées dans l'ordre où nous venons de les énumérer, et soudées ensemble, on les

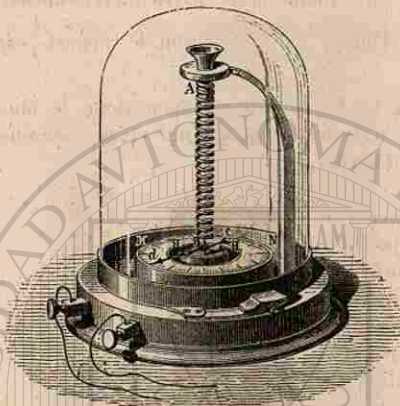


Fig. 205.  
Thermomètre métallique de Bréguet.

— Supposons le métal le plus dilatable, l'argent, placé à l'extérieur. Si la température s'élève, chacune des portions de spire de l'hélice tend à se courber davantage; l'aiguille marche dans le sens de ce mouvement, en parcourant un angle proportionnel à la somme des déplacements des divers points de l'hélice, estimés parallèlement au plan du cercle divisé.

## II. — APPLICATIONS DES DILATATIONS DES LIQUIDES.

257. **Réduction des hauteurs barométriques à la température 0°.** — Lorsque l'on considère les pressions atmosphériques comme mesurées par les hauteurs des colonnes barométriques (121), on suppose la densité du mercure constante; en réalité, la densité change avec la température. On est convenu, pour rendre les résultats comparables entre eux, de considérer toujours, non pas la hauteur barométrique observée, mais la hauteur d'une colonne de mercure à 0° qui exercerait la même pression. — Proposons-nous donc de ramener à 0° une hauteur barométrique  $H$ , observée à une température  $t$ .

Et d'abord, on a observé la hauteur  $H$  sur une échelle métallique, dont on suppose la division effectuée à 0°; d'après ce qu'on a vu (252), la hauteur réelle de la colonne barométrique est

$$H' = H(1 + lt),$$

étant le coefficient de dilatation linéaire du métal de l'échelle.

Désignons maintenant par  $H_0$  la hauteur de la colonne de mercure

a passées au laminoir, de manière à en faire un ruban très long et très mince.

On a enroulé ce ruban en hélice; on l'a suspendu par l'une de ses extrémités  $A$ , et l'on a attaché à l'autre extrémité une aiguille très légère  $cd$ , qui peut se mouvoir sur un cercle divisé  $MN$ .

— Supposons le métal le plus dilatable, l'argent, placé à l'extérieur. Si la température s'élève, chacune des portions de spire de l'hélice tend à se courber davantage; l'aiguille marche dans le sens de ce mouvement,

à 0° qui exercerait la même pression, par  $d$  et  $d_0$  les densités du mercure à  $t$  degrés et à 0°. La pression de la colonne  $H'$  à  $t$  degrés, sur une surface  $s$ , est  $sH'd$ ; la pression de la colonne  $H_0$  à 0°, sur la même surface, serait  $sH'd_0$ ; pour que ces pressions soient égales, il suffit que l'on ait  $H'd = H_0d_0$ , d'où l'on tire

$$\frac{H_0}{H'} = \frac{d}{d_0}.$$

Mais les densités  $d$  et  $d_0$  sont, comme on l'a vu (221), inversement proportionnelles aux binômes de dilatation  $1 + mt$  et 1. Donc

$$\frac{H_0}{H'} = \frac{1}{1 + mt},$$

ou enfin

$$H_0 = H' \frac{1}{1 + mt}.$$

Si l'on remplace  $H'$  par sa valeur, on trouve, pour la hauteur barométrique, corrigée à la fois de la dilatation de la règle et de la dilatation du mercure,

$$H_0 = H \frac{1 + lt}{1 + mt} (*).$$

258. **Détermination des températures au moyen du thermomètre à poids.** — L'instrument désigné sous le nom de *thermomètre à poids* (fig. 192), dont nous avons indiqué l'emploi pour la détermination des coefficients de dilatation des liquides, peut servir à la mesure des températures. Dulong et Petit l'ont fréquemment employé pour cet usage. — Il a l'avantage de pouvoir toujours être complètement plongé dans l'enceinte qui est soumise à l'expérience, et de ne point exiger de graduation préalable.

(\*) Dans la pratique, on fait le plus souvent usage d'une expression plus simple et suffisamment exacte. Effectuons la division indiquée: il vient

$$H_0 = H \left[ 1 - (m - l)t \right].$$

$$m = 0,000180, \quad l = 0,000018, \quad m - l = 0,000162.$$

Or, à Paris, la valeur de  $H$  ne s'écarte jamais beaucoup de 76 centimètres. Posons  $H = 76 + \epsilon$ ,  $\epsilon$  étant une quantité positive ou négative, dont la valeur absolue est généralement inférieure à 2. Il vient alors

$$H_0 = H - 76 \times 0,000162 \times t \mp \epsilon \times 0,000162 \times t.$$

Le troisième terme est plus petit que l'erreur commise dans la mesure de  $H$ ; on doit le négliger, et on a finalement:

$$H_0 = H - 0,012 \times t.$$

Après avoir déterminé, comme il a été dit (229, 1°), le poids P de mercure qui remplit l'appareil à 0°, on le porte dans le milieu dont on veut obtenir la température  $x$  (température supposée supérieure à 0°), et on détermine le poids  $p_1$  de mercure qui s'échappe par la pointe. Si l'on prend, pour coefficient de dilatation apparente du mercure dans le verre, la valeur adoptée par Dulong et Petit, savoir  $\frac{1}{6480}$ , on a

$$\frac{1}{6480} = \frac{p_1}{(P - p_1)x},$$

d'où l'on tire la valeur de la température  $x$  (\*).

III. — APPLICATIONS DES DILATATIONS DES GAZ.  
THERMOMÈTRES A GAZ.

259. **Thermomètre à air.** — Nous avons vu que le thermomètre normal est le thermomètre à air, la température étant mesurée par la variation de la force élastique, à volume constant (212). L'appareil de Regnault (fig. 197) est éminemment propre à ce genre de mesures. La graduation de la branche AB devient inutile; en ajoutant ou retranchant du mercure dans la branche ouverte du manomètre, on fait en sorte que le mercure affleure toujours au point B. Le bain d'eau qui entoure les deux branches du manomètre peut être supprimé.

Soit  $V_0$  le volume du ballon à 0°,  $v$  le volume du tube jusqu'au point B, et  $t$  la température ambiante. Lorsque le ballon est entouré de glace fondante, la plus grande partie de la masse d'air étant à 0°, la force élastique est H; elle diffère peu de 76 centimètres.

Si l'air contenu dans le tube était à 0°, son volume serait  $\frac{v}{1 + \alpha t}$ ; et le volume de la masse d'air à 0° sous la pression initiale H, serait

$$V_0 + \frac{v}{1 + \alpha t}.$$

Le ballon étant immergé dans un bain dont la température T est inconnue, il faut, pour rétablir l'affleurement sensiblement au point B, verser du mercure dans la branche MN; soit H' la force élastique de l'air, obtenue en ajoutant à la hauteur barométrique la différence des niveaux dans les deux branches AB et MN. — La masse d'air se compose de deux parties: l'une, à la température T, occupe un volume

(\*) Si, pour plus de précision, on veut introduire dans ce calcul, au lieu du nombre  $\frac{1}{6480}$ , le coefficient de dilatation apparente  $\mu$  du mercure dans l'instrument lui-même, il suffit d'effectuer une expérience préliminaire à une température connue T à 100°, par exemple), et d'en déduire la valeur de  $\mu$ , comme nous l'avons dit (229, 1°).

$V_0(1 + kT)$ ,  $k$  désignant le coefficient de dilatation cubique du verre; l'autre occupe un volume  $v'$  peu différent de  $v$ , à la température ambiante  $t$ ; si cette deuxième partie était à la température T, son volume serait :

$$v' \frac{1 + \alpha T}{1 + \alpha t'}$$

Donc le volume final de la masse d'air, à la température T et sous la pression H', serait :

$$V_0(1 + kT) + v' \frac{1 + \alpha T}{1 + \alpha t'}$$

En faisant application de la formule de Gay-Lussac (239), on aura une équation qui fera connaître la valeur de T :

$$\left[ V_0 + \frac{v}{1 + \alpha t} \right] H = \left[ V_0(1 + kT) + v' \frac{1 + \alpha T}{1 + \alpha t'} \right] \frac{H'}{1 + \alpha T}$$

260. **Thermomètre à air de Dulong et Petit.** — Avant les expériences de Regnault, Dulong et Petit avaient employé un thermomètre à air qui offre une disposition plus simple, et dont la précision, sans être aussi grande, est généralement suffisante dans la pratique. — La manipulation en a d'ailleurs été perfectionnée par Regnault.



Fig. 206.

Un réservoir de verre cylindrique A (fig. 206), surmonté d'un tube ab qui se termine par une pointe ouverte c, est placé dans le milieu dont on veut déterminer la température: il est mis en communication, par un raccord de caoutchouc, avec une série de tubes dessé-

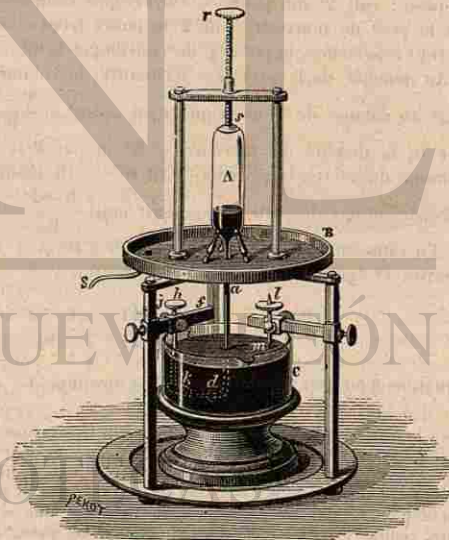


Fig. 207. — Thermomètre à air de Dulong et Petit.

chants, communiquant eux-mêmes avec une pompe à main. On fait un grand nombre de fois le vide dans l'appareil, en laissant chaque fois rentrer l'air très lentement : après la dernière rentrée d'air, on met, pendant quelques instants, l'air intérieur en communication avec l'atmosphère; on ferme alors au chalumeau la pointe *c*, et on note la hauteur du baromètre. On a ainsi l'appareil plein d'air sec, à la température *T*, et sous la pression *H* de l'atmosphère.

On le transporte, en le renversant, sur le support représenté par la figure 207, où il est maintenu par la tige *rs*, de manière que l'extrémité recourbée du tube plonge dans une cuve à mercure *C*. On a fait à l'avance un trait de lime au voisinage de la pointe, de manière à permettre de la détacher à l'aide d'une pince : le mercure pénètre dans le tube et s'élève à une certaine hauteur dans le réservoir. On environne celui-ci de glace fondante, contenue dans un manchon placé sur le plateau *B*, et, au bout d'une heure environ, on ferme de nouveau la pointe en y amenant une petite cuiller de fer *k*, remplie de cire molle, et portée par la vis *h*, dont les supports peuvent se déplacer le long de la tige horizontale *f*. On note la hauteur *H'* du baromètre, et, après avoir enlevé le manchon et la glace qui entourent le réservoir, on mesure au cathétomètre la hauteur *h* du mercure soulevé : la vis à deux pointes *lm* sert à effectuer cette mesure, comme dans le baromètre fixe (128), avec une grande précision.

On enlève l'appareil de son support, avec le mercure qui y a pénétré, et on le pèse : soit *P'* son poids. — On l'emplit complètement de mercure à 0°, et on le pèse de nouveau; soit *P* le poids trouvé. — Enfin on a déterminé, avant l'expérience, le poids *p* de l'enveloppe seule.

Au moment de la première fermeture, le volume de l'air à *T* degrés était égal au volume de l'enveloppe, c'est-à-dire à  $\frac{P-p}{D_0} (1+kT)$ , en désignant par *D*<sub>0</sub> la densité du mercure à 0°, et par *k* le coefficient de dilatation cubique du verre; la pression était *H*. — Au moment de la seconde fermeture, le volume de cette masse d'air était  $\frac{P-P'}{D_0}$ ; la pression était *H' - h*.

— En ramenant chacun de ces volumes à 0° et à la pression de 76 centimètres, et égalant les deux expressions, on a :

$$\frac{P-p}{D_0} \cdot \frac{H}{76} \cdot \frac{1+kT}{1+2T} = \frac{P-P'}{D_0} \cdot \frac{H'-h}{76}$$

équation d'où l'on tire la valeur de l'inconnue *T* (\*).

(\*) Lorsqu'on brise la pointe du tube sous le mercure, Regnault a reconnu qu'une petite quantité d'air était toujours aspirée dans le réservoir, par une sorte de gaine qui reste entre la paroi extérieure de la tige et le mercure qui ne mouille pas le verre. On est parvenu à empêcher cet effet de se produire, en adaptant sur le tube, dans la partie plongée, de petits disques d'une substance qui se laisse mouiller par le mercure, comme le laiton bien décapé : ce sont ces petits disques qui sont représentés en *d* dans la figure 207. Pour plus de sûreté, on verse sur le mercure, après avoir saisi la pointe avec la pince, une couche d'acide sulfurique : on enlève l'acide avant de faire descendre la vis à deux pointes *lm*.

## IV. — CORRECTIONS AUX DENSITÉS.

**261. Corrections à faire subir aux résultats, dans la détermination des densités des corps solides ou liquides.** — La densité d'un corps solide ou liquide est variable, comme l'est son volume, avec la température; les densités des divers corps ne sont donc comparables qu'à la condition d'avoir été calculées à une même température. On a choisi la température de 0°.

Dans les diverses méthodes qui ont été indiquées (100 à 105), si l'on employait de l'eau à la température du laboratoire, on pourrait, en tenant compte de sa densité (\*), déduire des données de l'expérience le volume réel du corps et par suite sa densité, à la température de l'expérience : mais encore faudrait-il connaître exactement cette température, et il resterait toujours quelque incertitude sur sa constance pendant l'opération. — Regnault a proposé d'opérer avec de l'eau à la température de la glace fondante, température qu'il est toujours facile de maintenir dans une petite quantité d'eau. Aussi est-ce la méthode du flacon que l'on emploie de préférence.

**262. Méthode du flacon, modifiée par Regnault. — Détermination des densités à 0°.** — Regnault a indiqué l'emploi, pour les corps solides, de petits flacons qui ont la forme représentée par la figure 208. Dans

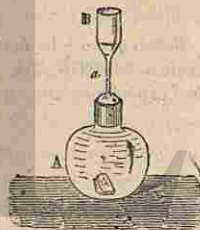


Fig. 208.

le goulot s'engage un bouchon creux, présentant une partie capillaire sur laquelle est tracé un trait d'affleurement *a*. — Le flacon débouché ayant été rempli d'eau, on introduit le bouchon qui, déplaçant un peu de liquide, fait monter le niveau jusque dans l'entonnoir *B*. On place alors le flacon dans la glace fondante, et on l'y laisse séjourner jusqu'à ce que le niveau paraisse invariable; on enlève, avec un petit rouleau de papier buvard, le liquide qui dépasse le trait *a*, et l'on retire ensuite le flacon de la glace. On le laisse reprendre la température du laboratoire, afin d'éviter qu'il y ait condensation d'eau à sa surface pendant la pesée; on l'essuie et on le porte sur le plateau de la balance, en plaçant à côté de lui le corps soumis à l'expérience, comme il a été dit (100). On fait la tare, et on détermine la masse échantillonnée *M* qu'il faut substituer au corps pour rétablir l'équilibre. — On introduit alors le corps dans le flacon, on replace le bouchon, on remet le flacon dans la glace, et on rétablit l'affleurement au trait *a*; on retire ensuite le flacon, on le laisse reprendre la température du laboratoire, et on détermine la masse *M'*, qu'il faut ajouter pour faire équilibre à la tare précédente.

La méthode s'applique aux corps liquides, en employant les flacons décrits précédemment (fig. 91). — L'affleurement au trait *a* est toujours établi, soit pour le liquide soumis à l'expérience, soit pour l'eau, pendant que le flacon est à la température de la glace fondante.

Pour déduire des données de l'expérience, pour un corps solide par exemple, à densité de ce corps à 0°, on peut raisonner comme il suit :

(\*) Voir le tableau de la page 188.

Soit  $V$  le volume du corps à  $0^{\circ}$ ,  $D$  sa densité,  $\Delta$  la densité du métal des poids marqués,  $e$  la densité de l'eau à  $0^{\circ}$ , et  $a$  la masse du centimètre cube d'air dans les conditions de l'expérience; désignons par  $k$  le coefficient de dilatation du corps, par  $K$  celui des poids, par  $t$  la température à laquelle ont été effectuées les pesées, et par  $g$  l'intensité de la pesanteur. Dans la première pesée, le poids apparent du corps est égal au poids apparent de la masse échantillonnée  $M$  :

$$(1) \quad V D g - V(1 + kt) a g = M g - \frac{M}{\Delta} (1 + Kt) a g.$$

Dans la deuxième opération, le corps étant dans le flacon ne subit plus la poussée de l'air, mais il y a en moins dans le flacon la masse d'eau déplacée par le corps à  $0^{\circ}$ . Le poids apparent de la masse  $M'$  représente donc la différence du poids de cette masse d'eau et de la poussée de l'air :

$$(2) \quad V e g - V(1 + kt) a g = M' g - \frac{M'}{\Delta} (1 + Kt) a g.$$

En supprimant partout le facteur commun  $g$  et en divisant l'équation (1) par l'équation (2), membre à membre, il vient :

$$(5) \quad \frac{D - a(1 + kt)}{e - a(1 + kt)} = \frac{M}{M'}.$$

*Remarque.* — La densité de l'eau à  $0^{\circ}$  est connue avec exactitude, elle est égale à 0,999875 (254); la masse du centimètre cube d'air dans les conditions de l'expérience est, en supposant l'air sec :

$$a = 0,001295 \frac{H}{76} \cdot \frac{1}{1 + 0,00567t};$$

si d'ailleurs on voulait tenir compte de l'humidité, il serait facile de le faire (297).

Dans la plupart des cas, on prend  $a = 0,001295$ , et on néglige le produit  $kt$  vis-à-vis de l'unité. La formule devient alors :

$$(4) \quad \frac{D - a}{e - a} = \frac{M}{M'}.$$

## CHAPITRE V

## CHANGEMENTS D'ÉTAT DES CORPS

## PASSAGE DE L'ÉTAT SOLIDE A L'ÉTAT LIQUIDE, ET PASSAGE INVERSE DE L'ÉTAT LIQUIDE A L'ÉTAT SOLIDE.

**263. Changements d'état des corps, sous l'action de la chaleur.** — Lorsqu'on porte un corps solide à des températures de plus en plus élevées, il arrive en général un moment où il devient liquide : c'est le phénomène de la *fusion*. — Réciproquement, les corps liquides, lorsqu'on les refroidit suffisamment, peuvent prendre l'état solide : c'est le phénomène de la *solidification*.

Enfin, les liquides, en absorbant de la chaleur, se transforment en des corps gazeux, qu'on désigne plus particulièrement sous le nom de *vapeurs* : c'est le phénomène de la *vaporisation*. — Réciproquement, les vapeurs, en perdant la chaleur qu'elles avaient gagnée, reviennent à l'état liquide : c'est le phénomène de la *condensation* ou de la *liquéfaction*.

Nous allons étudier successivement chacun de ces *changements d'état*.

**264. Phénomène de la fusion.** — Pour nous faire une idée des particularités que présente le phénomène de la fusion, plaçons des morceaux d'étain sur le feu, dans une cuiller de fer. La température s'élevant progressivement, il arrive un moment où nous voyons couler des gouttes d'étain fondu : toute la masse fond ainsi peu à peu, et, au bout de quelque temps, il ne reste plus que de l'étain liquide. — Ce qu'il importe de remarquer, c'est que, si un thermomètre est placé au milieu de l'étain, on observe que la fusion commence toujours à une *même température*, qui est ici de  $250^{\circ}$ ; cette température est ce qu'on appelle le *point de fusion* de l'étain. — On observe, en outre, que la *température reste constante*, depuis le moment où la fusion commence jusqu'au moment où elle se termine.

En général, si on fait abstraction des corps, tels que le verre, qui ne deviennent liquides qu'en passant par une série d'états plus ou moins pâteux, le phénomène de la fusion, pour les divers corps, est soumis aux deux lois suivantes :

Soit  $V$  le volume du corps à  $0^{\circ}$ ,  $D$  sa densité,  $\Delta$  la densité du métal des poids marqués,  $e$  la densité de l'eau à  $0^{\circ}$ , et  $a$  la masse du centimètre cube d'air dans les conditions de l'expérience; désignons par  $k$  le coefficient de dilatation du corps, par  $K$  celui des poids, par  $t$  la température à laquelle ont été effectuées les pesées, et par  $g$  l'intensité de la pesanteur. Dans la première pesée, le poids apparent du corps est égal au poids apparent de la masse échantillonnée  $M$  :

$$(1) \quad V D g - V(1 + kt) a g = M g - \frac{M}{\Delta} (1 + Kt) a g.$$

Dans la deuxième opération, le corps étant dans le flacon ne subit plus la poussée de l'air, mais il y a en moins dans le flacon la masse d'eau déplacée par le corps à  $0^{\circ}$ . Le poids apparent de la masse  $M'$  représente donc la différence du poids de cette masse d'eau et de la poussée de l'air :

$$(2) \quad V e g - V(1 + kt) a g = M' g - \frac{M'}{\Delta} (1 + Kt) a g.$$

En supprimant partout le facteur commun  $g$  et en divisant l'équation (1) par l'équation (2), membre à membre, il vient :

$$(5) \quad \frac{D - a(1 + kt)}{e - a(1 + kt)} = \frac{M}{M'}.$$

*Remarque.* — La densité de l'eau à  $0^{\circ}$  est connue avec exactitude, elle est égale à 0,999875 (254); la masse du centimètre cube d'air dans les conditions de l'expérience est, en supposant l'air sec :

$$a = 0,001295 \frac{H}{76} \cdot \frac{1}{1 + 0,00567t};$$

si d'ailleurs on voulait tenir compte de l'humidité, il serait facile de le faire (297).

Dans la plupart des cas, on prend  $a = 0,001295$ , et on néglige le produit  $kt$  vis-à-vis de l'unité. La formule devient alors :

$$(4) \quad \frac{D - a}{e - a} = \frac{M}{M'}.$$

## CHAPITRE V

## CHANGEMENTS D'ÉTAT DES CORPS

## PASSAGE DE L'ÉTAT SOLIDE A L'ÉTAT LIQUIDE, ET PASSAGE INVERSE DE L'ÉTAT LIQUIDE A L'ÉTAT SOLIDE.

**263. Changements d'état des corps, sous l'action de la chaleur.** — Lorsqu'on porte un corps solide à des températures de plus en plus élevées, il arrive en général un moment où il devient liquide : c'est le phénomène de la *fusion*. — Réciproquement, les corps liquides, lorsqu'on les refroidit suffisamment, peuvent prendre l'état solide : c'est le phénomène de la *solidification*.

Enfin, les liquides, en absorbant de la chaleur, se transforment en des corps gazeux, qu'on désigne plus particulièrement sous le nom de *vapeurs* : c'est le phénomène de la *vaporisation*. — Réciproquement, les vapeurs, en perdant la chaleur qu'elles avaient gagnée, reviennent à l'état liquide : c'est le phénomène de la *condensation* ou de la *liquéfaction*.

Nous allons étudier successivement chacun de ces *changements d'état*.

**264. Phénomène de la fusion.** — Pour nous faire une idée des particularités que présente le phénomène de la fusion, plaçons des morceaux d'étain sur le feu, dans une cuiller de fer. La température s'élevant progressivement, il arrive un moment où nous voyons couler des gouttes d'étain fondu : toute la masse fond ainsi peu à peu, et, au bout de quelque temps, il ne reste plus que de l'étain liquide. — Ce qu'il importe de remarquer, c'est que, si un thermomètre est placé au milieu de l'étain, on observe que la fusion commence toujours à une même température, qui est ici de  $250^{\circ}$ ; cette température est ce qu'on appelle le *point de fusion* de l'étain. — On observe, en outre, que la température reste constante, depuis le moment où la fusion commence jusqu'au moment où elle se termine.

En général, si on fait abstraction des corps, tels que le verre, qui ne deviennent liquides qu'en passant par une série d'états plus ou moins pâteux, le phénomène de la fusion, pour les divers corps, est soumis aux deux lois suivantes :



1° Un même corps entre toujours en fusion à une même température, qu'on appelle son point de fusion.

2° Cette température une fois atteinte, la fusion du corps s'effectue d'une manière successive, sa température demeurant invariable pendant toute la durée du phénomène.

265. **Points de fusion des divers corps.** — Chaque substance a un point de fusion déterminé, qui est souvent un indice précieux de sa pureté, car la présence de matières étrangères peut faire varier de plusieurs degrés la température de la fusion.

La glace fond exactement à 0°, puisqu'on a pris précisément la température de la glace fondante pour fixer le zéro du thermomètre. — Le tableau suivant donne les points de fusion de quelques corps solides, classés par ordre alphabétique.

|                           | POINTS DE FUSION. |                    | POINTS DE FUSION. |
|---------------------------|-------------------|--------------------|-------------------|
| Acier. . . . .            | 1500 à 1400°      | Iode. . . . .      | 107°              |
| Antimoine. . . . .        | 452               | Mercure. . . . .   | — 40              |
| Argent. . . . .           | 1000              | Or. . . . .        | 1250              |
| Bismuth. . . . .          | 262               | Phosphore. . . . . | 44                |
| Blanc de baleine. . . . . | 49                | Plomb. . . . .     | 320               |
| Cire blanche. . . . .     | 68                | Potassium. . . . . | 58                |
| Étain. . . . .            | 250               | Sodium. . . . .    | 90                |
| Fer. . . . .              | 1500 à 1600       | Soufre. . . . .    | 110               |
| Fonte blanche. . . . .    | 1050 à 1100       | Suif. . . . .      | 44                |
| Fonte grise. . . . .      | 1100 à 1200       | Zinc. . . . .      | 450               |
| Glace. . . . .            | 0°                |                    |                   |

Certains corps solides ont été considérés d'abord comme *réfractaires*, c'est-à-dire comme infusibles; à mesure que l'on est parvenu à produire des températures plus élevées, on a vu diminuer le nombre de ces corps. — Ainsi, Gaudin a pu fondre le cristal de roche, à l'aide d'une lampe alimentée par un jet d'oxygène. — Despretz, en combinant les effets calorifiques du soleil, de la pile et du chalumeau à gaz, a fondu l'alumine, la magnésie, et ramolli le charbon. — En activant la flamme du gaz d'éclairage par un courant d'oxygène, et opérant dans un petit four en chaux vive, MM. H. Sainte-Claire Deville et Debray ont pu fondre plusieurs kilogrammes de platine. — Tout porte à croire qu'avec des sources de chaleur suffisamment énergiques, on parviendrait à fondre toutes les substances solides (\*).

266. **Chaleur de fusion.** — La température d'un corps demeurant invariable pendant tout le temps que dure sa fusion, quelle que soit

(\*) Il est clair qu'il ne s'agit que des corps simples, ou des corps composés qui ne peuvent être décomposés par la chaleur. — Lorsque, parmi les éléments d'un corps composé, il en est qui peuvent prendre l'état gazeux, l'élévation de la température peut produire le phénomène qui a été désigné, par H. Sainte-Claire Deville, sous le nom de *dissociation*; c'est une séparation pure et simple des éléments du corps, c'est-à-dire un phénomène chimique.

l'activité du foyer de chaleur qui lui est appliqué, on en doit conclure que la chaleur fournie par le foyer est uniquement employée à produire le changement d'état: on nomme *chaleur latente de fusion*, ou simplement *chaleur de fusion*, la chaleur que doit absorber un corps solide, pour passer à l'état liquide sans changement de température.

Nous verrons plus loin (chapitre IX) comment on peut mesurer la chaleur de fusion des divers corps.

267. **Solidification.** — Prenons maintenant de l'étain liquide, chauffé au-dessus de son point de fusion, à 260° ou 280° par exemple, et observons ce qui se passe quand on le laisse refroidir. — Au moment où il revient à sa température de fusion, c'est-à-dire à 250°, une partie de la masse commence à se solidifier; la solidification se continue ensuite, *sans variation de température*, à mesure que l'étain abandonne la chaleur qu'il avait prise pour se fondre. C'est seulement lorsque toute la masse est devenue solide, que la température commence à s'abaisser au-dessous de 250°.

En général, si l'on fait abstraction des corps qui passent par une série d'états pâteux, on peut dire que le phénomène de la solidification est assujéti à des lois semblables à celles de la fusion: un corps liquide tend à se solidifier à une température déterminée, qui est précisément la *température de fusion* du corps solide dans lequel il se transforme, et il conserve cette même température pendant tout le temps que dure la solidification de la masse tout entière.

Cependant, la solidification présente une anomalie qu'il est important de signaler. — Il est rare qu'une masse *entièrement liquide* commence à se solidifier à la température précise qu'indique la règle précédente: le plus souvent, on peut abaisser sa température notablement au-dessous de la température de fusion, sans que la solidification se produise. — Ce phénomène a été désigné sous le nom de *surfusion*; nous allons en indiquer les principales particularités.

268. **Phénomènes de surfusion.** — **Expériences de M. Gernez.** — Lorsqu'un liquide est placé dans des conditions telles, qu'il ne se trouve, en aucun point de sa masse, *aucune parcelle solide semblable à celles dans lesquelles il se transformerait*, l'expérience montre qu'il peut se refroidir à une température bien inférieure à son point de fusion, sans passer à l'état solide.

Mais si l'on vient alors à y introduire une parcelle du corps solide dans lequel le liquide peut se transformer, la solidification commence, et elle porte immédiatement sur une portion de la masse d'autant plus grande que la température était plus basse. En outre, si la solidification n'est pas complète, *la température remonte à la température de fusion du corps.* — Cette dernière particularité s'explique, en remarquant que les parties solidifiées abandonnent leur chaleur de fusion, laquelle sert à réchauffer le reste de la masse: la solidification

porte donc seulement, au premier instant, sur une quantité de substance telle, que la chaleur dégagée par elle fasse remonter la température de la masse tout entière jusqu'au point de fusion.

Voici une expérience, qui est due à M. Gernez, et qui permet de réaliser facilement la surfusion, pour le phosphore. — Dans un grand ballon de verre plein d'eau (fig. 209), on assujettit, au moyen d'un bouchon qui le ferme incomplètement, un large tube A, fermé à son extrémité inférieure, et contenant du phosphore B, couvert d'une couche d'eau C; à côté de ce tube, est fixé un thermomètre T. L'eau du ballon étant chauffée au-dessus de  $44^{\circ}$ , le phosphore fond; on retire alors le ballon du feu, et comme la masse d'eau est considérable, elle se refroidit avec une extrême lenteur. Au bout de plusieurs heures, la température étant descendue à  $50^{\circ}$ , par exemple, c'est-à-dire à une quinzaine de degrés au-dessous du point de fusion du phosphore, le phosphore n'est pas encore solidifié. — On peut même y plonger une baguette de verre, sans produire la solidification. Mais, si l'on frotte légèrement

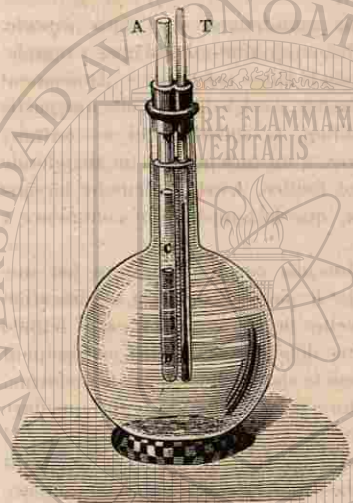


Fig. 209. — Surfusion du phosphore.

l'extrémité de cette baguette sur un morceau de phosphore solide, de manière à en détacher une parcelle, et qu'on touche ensuite avec cette extrémité la surface du phosphore surfondu, la solidification est instantanée. Le plus souvent, le phosphore se solidifie si rapidement, que la tige de verre ne peut y pénétrer.

Ce qu'il importe de remarquer, c'est qu'un corps solide ne peut faire cesser la surfusion, qu'à la condition de présenter une forme cristalline semblable à celle des cristaux qui peuvent se former. Ainsi, une parcelle de phosphore rouge, ou phosphore *amorphe*, ne détermine pas la solidification du phosphore surfondu.

269. **Expériences de M. Dufour.** — Le phénomène de la surfusion est facilement réalisable quand le liquide est enfermé dans un tube capillaire; par ce procédé, Despretz avait pu refroidir l'eau jusqu'à  $-20^{\circ}$  sans qu'elle se congelât.

M. Dufour, de Lausanne, a obtenu le même résultat, en maintenant des gouttes d'eau en suspension dans un liquide de même densité, formé de chloroforme et d'huile d'amandes douces. — Dans une solu-

tion de chlorure de zinc, des gouttes de phosphore ont pu conserver l'état liquide au-dessous de  $0^{\circ}$ . — La solidification se produit immédiatement, si l'on vient à toucher les gouttes liquides avec un fragment solide du même corps.

270. **Changements de volume qui accompagnent la fusion ou la solidification.** — La plupart des corps liquides, en passant à l'état solide, éprouvent une *diminution de volume* et, par suite, un *accroissement de densité*. — On peut remarquer, par exemple, que des fragments de soufre solide restent au fond d'une masse de soufre liquide, ce qui prouve que la densité du soufre est plus grande à l'état solide qu'à l'état liquide. Il en est de même de la cire, du plomb et des métaux en général.

L'eau fait exception à cette règle. Tout le monde a pu observer que la glace flotte à la surface de l'eau liquide; la densité de la glace est donc moindre que celle de l'eau: elle est environ 0,92.

Cette propriété exceptionnelle de l'eau présente, dans la nature, une importance considérable. — En effet, pendant les hivers rigoureux, c'est par la surface que les eaux de nos lacs ou de nos rivières éprouvent d'abord l'action du froid: lors même que la glace formée vient à être disloquée par le mouvement de l'eau, les glaçons continuent à flotter. — Si, par la persistance du froid, il vient à se former une couche consistante, elle préserve de la congélation les parties profondes. — Si, au contraire, la glace, à mesure qu'elle se forme, tombait successivement au fond, toute la masse d'eau ne tarderait pas à se congeler, et la vie des animaux ou des végétaux y deviendrait impossible.

L'augmentation de volume qu'éprouve l'eau, au moment où elle se congèle, s'effectue avec une force d'expansion que l'on peut mettre en évidence par l'expérience suivante. — On remplit d'eau un canon de pistolet; on le ferme au moyen d'un boulon à vis, et on le place dans un mélange de glace pilée et de sel marin (fig. 210), qui abaisse rapidement sa température. La paroi du canon de pistolet se déchire, en produisant un bruit sec, au moment où l'eau intérieure se congèle (\*). — Tout le monde sait que, pendant les hivers rigoureux,

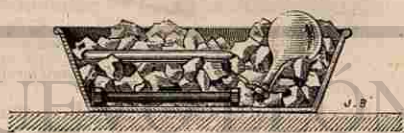


Fig. 210. — Augmentation du volume de l'eau au moment de la congélation.

(\*) La figure 210 montre le canon de pistolet, placé au fond d'un mélange de glace et de sel. A défaut d'un canon de pistolet, on peut prendre, soit un tube de verre plein d'eau, comme celui qui est représenté au-dessus, soit un ballon de verre que l'on bouche avec un bouchon de liège. La congélation se produisant d'abord dans le goulot du ballon, où la masse d'eau est moins considérable, il se forme à l'intérieur une sorte de bouchon de glace, qui rend la fermeture plus hermétique; le ballon éclate quand la masse d'eau qu'il contient se prend elle-même en glace.

les tuyaux qu'on a laissés remplis d'eau se fendent. — C'est ainsi encore qu'on s'explique les effets funestes que produisent les gelées sur les végétaux, en brisant les parois des tissus qui sont remplis de sève.

**271. Influence de la pression sur la température de fusion.** — Des expériences de M. W. Thomson et de M. Bunsen ont montré que des pressions énergiques peuvent modifier la température de fusion des corps.

Pour les corps exceptionnels dont le volume augmente par la solidification, une pression considérable *abaisse* un peu la température de fusion. Tel est le cas de la glace, dont le point de fusion peut descendre jusqu'à  $-0^{\circ},15$ , sous une pression de 17 atmosphères.

Au contraire, pour les corps dont le volume diminue par la solidification, un accroissement de pression *élève* la température de fusion. C'est ce qui a été vérifié par M. Thomson pour le blanc de baleine : ce corps fond à  $47^{\circ},7$  sous la pression atmosphérique, et à  $50^{\circ},9$  sous une pression de 165 atmosphères.

**272. Phénomène du regel.** — Pour la glace en particulier, l'abaissement du point de fusion, qui se produit d'une manière d'autant

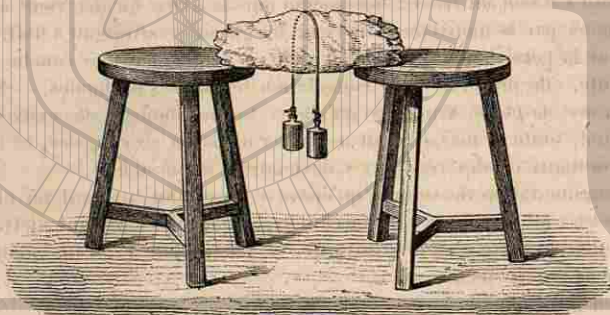


Fig. 211. — Phénomène du regel.

plus sensible que la pression est plus grande (271), conduit à une conséquence remarquable. — Supposons que des fragments de glace, pris à la température de  $0^{\circ}$ , soient soumis à une pression capable d'abaisser notablement le point de fusion : une partie de cette glace va se liquéfier, en absorbant la chaleur de fusion nécessaire pour la faire passer à l'état liquide. Il va donc se produire, par le fait même de la fusion, un abaissement de température ; et cependant la partie liquéfiée restera encore à l'état liquide, tant qu'elle continuera à être soumise à la pression qui a déterminé le phénomène. Mais, si la pression vient à être supprimée, l'eau ne pouvant plus, sous la pression ordinaire, rester liquide à une température inférieure à zéro, la congélation se produira de nouveau : c'est le phénomène du *regel*.

C'est ainsi, par exemple, que si l'on presse fortement l'un contre l'autre deux morceaux de glace, on arrive à les souder. On conçoit, en effet, que la pression fait fondre une petite quantité de glace dans les points par lesquels les deux blocs se touchent ; mais cette eau, en coulant dans les interstices qui lui sont offerts par la forme irrégulière des blocs, se soustrait d'elle-même à la pression qu'elle supportait : elle éprouve alors un *regel*, et détermine ainsi la soudure des deux blocs.

Voici encore une expérience facile à réaliser. — Prenons un bloc de glace, que nous ferons reposer sur des supports (fig. 211), et sur lequel nous placerons un fil métallique, tendu par des poids de quelques kilogrammes. Nous verrons le fil métallique se frayer peu à peu un chemin au travers du bloc de glace ; mais ce chemin se refermera immédiatement de lui-même, par le *regel* de l'eau de fusion que la pression avait produite. — Au bout de quelque temps, le fil aura traversé le bloc, sans y laisser de discontinuité.

**275. Moulage de la glace. — Phénomènes offerts par les glaciers.** — L'expérience suivante, qui est due à M. Tyndall, s'explique encore par le phénomène du regel. — On prend deux blocs de bois dur A, B (fig. 212), creusés chacun d'une cavité en forme de portion de sphère, de sorte que, quand ils sont superposés, ils laissent un espace vide, ayant la forme d'une lentille. Entre ces deux blocs, on place de la glace pilée, et on la comprime fortement, à l'aide d'une presse hydraulique. La glace se brise d'abord en fragments plus petits ; mais bientôt tous ces fragments se réunissent entre eux, et l'on obtient finalement une lentille de glace transparente, moulée

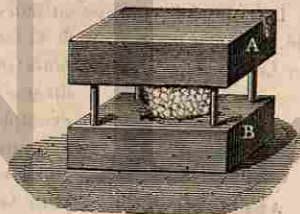


Fig. 212. — Moulage de la glace

sur la cavité où elle est placée. — Ici encore, la compression a fait fondre une partie de la glace ; mais cette eau s'est soustraite ensuite à la pression en s'échappant par les interstices laissés entre les fragments solides : elle s'est solidifiée de nouveau, et a soudé entre eux tous les fragments.

Cette expérience fournit une explication des phénomènes que présentent les *glaciers*, dans les pays de montagnes. — La neige qui tombe sur les sommets des montagnes se transforme d'abord, sous l'influence de sa propre pression, en une masse qui n'est plus pulvérulente comme la neige, mais qui n'a pas encore la transparence de la glace : c'est ce qu'on appelle le *névé*. — Le *névé*, en glissant sur la pente des montagnes, et en arrivant dans les vallées comprises entre des montagnes voisines, supporte des pressions de plus en plus

grandes, de la part des couches qui s'accroissent à la partie supérieure. Il se transforme alors successivement en une masse aussi transparente que la glace des lacs. Ces masses énormes de glaces, qui descendent des montagnes neigeuses, et se moulent sur le contour des vallées, constituent les *glaciers* proprement dits. — Les glaciers ne fondent que par leur partie inférieure, dans les vallées où la température est plus douce; les cours d'eau qu'ils produisent sont d'autant plus abondants que les chaleurs de l'été sont plus fortes.

**274. Dissolution des corps solides dans les liquides. — Mélanges réfrigérants.** — Le sucre, mis en présence de l'eau, se transforme en un liquide qui se diffuse dans l'eau elle-même. — Ce mode particulier de passage de l'état solide à l'état liquide a reçu le nom de *dissolution*.

La dissolution d'un corps solide dans un liquide, lorsqu'elle n'est accompagnée d'aucun phénomène chimique, détermine un *abaissement de température*, à cause de l'absorption de chaleur qui est nécessaire pour produire la fusion. — C'est ainsi qu'en faisant dissoudre de l'azotate d'ammoniaque dans un poids d'eau égal au sien, on obtient un abaissement de température d'environ 26 degrés. Si, par exemple, l'eau et le sel étaient primitivement à 12°, le mélange descendrait à — 14° environ.

Dans les laboratoires ou dans l'industrie, on fait usage de mélanges de ce genre pour abaisser la température des corps qui y sont plongés.

— Ces *mélanges réfrigérants* peuvent être composés de manières très diverses : nous en citerons encore un ou deux exemples.



Fig. 215. — Fabrication des glaces et des sorbets.

Le mélange formé de 5 parties de sulfate de soude et de 2 parties d'acide chlorhydrique sert pour fabriquer des glaces ou des sorbets, dans des appareils connus sous le nom de *glacières* (fig. 215). Le mélange réfrigérant est placé dans un vase AB, qu'on entoure de drap pour le préserver du contact de l'air; le liquide sucré que l'on veut refroidir est introduit dans le vase métallique CD. On agite vivement, de manière à accélérer l'opération : c'est là une condition de succès, puisqu'il faut diminuer autant que possible le réchauffement produit par l'air extérieur et par le rayonnement des corps environnants.

Enfin, on emploie très fréquemment un mélange de glace pilée et de sel marin, qui peut abaisser la température jusqu'à une vingtaine de degrés au-dessous de zéro. — L'efficacité de ce mélange est due, non seulement à la fusion du sel, mais aussi à ce que la présence du sel accélère considérablement la fusion de la glace; dès lors, la glace ne peut plus emprunter à l'air qu'une très petite partie de la chaleur qui

lui est nécessaire pour passer à l'état liquide : la plus grande partie de cette chaleur est empruntée au mélange lui-même (\*).

**275. Limite inférieure des températures que peut atteindre un mélange réfrigérant formé de glace et d'un sel déterminé.** — En général, un mélange réfrigérant, formé de glace et d'un sel déterminé, ne peut faire descendre la température que jusqu'à un point déterminé. C'est ce dont on peut se rendre compte par une expérience simple.

Prenons une solution saturée de sel marin dans l'eau et entourons le vase qui la contient d'un mélange réfrigérant, capable d'abaisser la température jusqu'à — 35° par exemple. Un thermomètre, plongé dans la solution, indiquera des températures graduellement décroissantes, mais seulement jusqu'à — 21° environ; à partir de ce moment, on constatera qu'il se forme à la fois des cristaux de sel marin et des cristaux de glace. — Il est évident, d'après cela, que, si l'on emploie, pour une expérience quelconque, un mélange de glace et de sel marin, la température ne pourra jamais s'abaisser au-dessous de — 21°; car, si elle descendait au-dessous, les cristaux de sel se reformeraient, avec dégagement de la chaleur de fusion. Une fois cette température atteinte, si le mélange n'est pas entièrement fondu, la température restera stationnaire jusqu'à ce que la chaleur fournie par les corps environnants ait achevé la fusion.

On trouve ainsi, pour chaque sel, une *limite inférieure* des températures que peut atteindre le mélange de ce sel avec de la glace : cette limite n'est autre que le *point de congélation de la solution saturée* de ce sel dans l'eau.

Le tableau suivant indique les températures les plus basses que puissent atteindre les mélanges formés de glace et de quelques sels (\*\*).

|  |          |
|--|----------|
| Sulfocyanure de potassium . . . . .                | — 55°,2  |
| Sel marin . . . . .                                | — 21°,2  |
| Azotate d'ammoniaque . . . . .                     | — 16°,75 |
| Chlorhydrate d'ammoniaque (sel ammoniac) . . . . . | — 15°,5  |
| Chlorure de potassium . . . . .                    | — 10°,8  |
| Azotate de potasse (nitre ou salpêtre) . . . . .   | — 2°,8   |

Le chlorure de calcium donne, avec la neige, un mélange réfrigérant des plus énergiques, dont la limite n'est pas encore connue : elle doit être voisine de — 50°. On peut employer ce mélange, par exemple, pour opérer la congélation du mercure, qui a lieu à — 40°.

**276. Phénomènes de sursaturation.** — Pour la plupart des sels, la solubilité dans l'eau augmente avec la température. Il en résulte que si l'on prépare à *chaud* une solution saturée d'un sel présentant

(\*) Si l'on mélange la neige avec de l'acide sulfurique (acide dont le mélange avec l'eau liquide détermine une élévation de température), les résultats obtenus sont très différents, selon les proportions employées. — Avec une petite quantité de neige, 1 partie pour 4 d'acide sulfurique, on obtient un mélange dont la température s'élève à + 80°. Avec une grande quantité de neige, 4 parties pour 1 d'acide sulfurique, on obtient un mélange dont la température s'abaisse à — 20°.

(\*\*) Les nombres de ce tableau ont été déterminés, pour la plupart, par le point de congélation de la solution saturée : ils sont extraits, soit des mémoires de M. Rüchert, soit d'un travail inédit de M. Nouel.

cette propriété, et si on laisse refroidir cette solution, une partie du sel doit reprendre l'état solide : c'est l'un des procédés les plus fréquemment employés en Chimie, pour obtenir la cristallisation des sels par *voie humide*.

Mais, dans la plupart des cas, s'il ne reste, en présence de la solution chaude, aucune parcelle solide du sel qui a servi à la former, on observe qu'on peut laisser la température s'abaisser beaucoup, sans que la cristallisation commence; c'est un phénomène analogue à la surfusion (268); on le désigne sous le nom de *sursaturation*.

On fait ordinairement, dans les Cours, l'expérience de la sursaturation du sulfate de soude, de la manière suivante. Une solution chaude et concentrée de sulfate de soude est introduite dans un ballon en verre, dont le col est recouvert d'un capuchon de papier pour empêcher la chute des poussières de l'atmosphère. La solution refroidie peut se conserver sursaturée pendant un temps indéfini. Si l'on vient à retirer le capuchon de papier, l'on voit se produire des aiguilles cristallines, qui se forment d'abord à la surface du liquide, et qui envahissent bientôt la masse tout entière.

**277. Causes capables de déterminer la cristallisation dans les solutions saturées.** — Il est démontré aujourd'hui que, dans l'expérience précédente, la cristallisation est provoquée par l'arrivée de petits cristaux de sulfate de soude, qui flottent dans l'atmosphère, comme l'a démontré M. Gernez, et qui sont surtout abondants dans l'air des laboratoires. Si quelques ballons, préparés comme on vient de le dire, ne cristallisent pas au moment où on les découvre, il suffit d'y faire tomber un petit cristal de sulfate de soude, pour déterminer le phénomène, ou d'introduire dans le ballon une baguette de verre portant une parcelle du sel cristallisé : on voit des aiguilles cristallines partir du point touché, et rayonner ensuite dans toute la masse.

Le phénomène de la sursaturation est d'ailleurs particulièrement facile à produire avec les sels déliquescents, qui ne peuvent pas se trouver à l'état de poussières solides dans l'atmosphère. — C'est ainsi, par exemple, qu'une solution sursaturée d'azotate de chaux, obtenue par l'action de la chaleur sur des cristaux additionnés de très peu d'eau, peut être étendue en couche mince sur une plaque de verre, sans cristalliser. Mais si l'on prend, à l'extrémité d'une baguette de verre, un petit cristal d'azotate de chaux, et qu'on promène rapidement la baguette dans la couche liquide, on voit la cristallisation partir instantanément de tous les points touchés, et envahir ensuite la couche tout entière.

**278. Action des corps isomorphes, pour déterminer la cristallisation.** — Ce qui constitue l'efficacité d'un cristal introduit dans une solution sursaturée, pour déterminer la cristallisation, c'est l'identité de sa

forme avec celle des cristaux qui peuvent prendre naissance, et non pas sa composition chimique.

Ainsi, une solution sursaturée de chromate de soude ( $\text{NaO}, \text{CrO}_3 + 10\text{HO}$ ) cristallise par l'introduction d'un cristal de sulfate de soude ( $\text{NaO}, \text{SO}_5 + 10\text{HO}$ ), qui a même forme cristalline. — Une solution saturée d'alun de potasse cristallise par l'introduction d'un cristal d'alun de chrome. — Il suffit donc, pour produire la cristallisation, que le cristal introduit soit *isomorphe* avec ceux qui peuvent se former.

Au contraire, un cristal de sulfate de soude *anhydre* ne détermine pas, dans une solution sursaturée de sulfate de soude, la production des aiguilles de forme prismatique à 10 équivalents d'eau, dont la forme est toute différente. On constate même le plus souvent, quand on prépare comme nous l'avons dit (276) les solutions sursaturées de sulfate de soude, qu'il se dépose, au fond des ballons, des cristaux de sulfate de soude anhydre, qui doivent leur production à la température élevée à laquelle la solution a été quelque temps maintenue : la présence de ces cristaux n'empêche point le liquide de rester sursaturé, jusqu'à l'introduction d'un cristal prismatique de sulfate de soude à 10 équivalents d'eau.

M. Gernez a effectué, à chaud, dans un tube étroit, une solution sursaturée de soufre dans le sulfure de carbone : après refroidissement, l'introduction d'un fil de platine portant un petit cristal de soufre *prismatique* a donné des cristaux prismatiques, tandis qu'un cristal de soufre *octaédrique*, introduit dans le liquide à quelque distance, n'a donné que des cristaux octaédriques.

Enfin certains sels, tels que le chlorate de soude, ont la propriété de pouvoir donner naissance à deux espèces de cristaux, de formes *symétriques*, c'est-à-dire dont les types peuvent être placés, par exemple, à droite et à gauche d'un plan vertical, de manière que les sommets de l'un soient symétriques des sommets de l'autre. — Or, dans une solution sursaturée de chlorate de soude, l'introduction d'un cristal du *type droit* produit exclusivement des cristaux du type droit; l'introduction d'un cristal du *type gauche* produit exclusivement des cristaux du type gauche. — Le formiate de strontiane donne lieu aux mêmes remarques.

**279. Chaleur dégagée pendant la cristallisation.** — La formation rapide d'une grande quantité de cristaux, dans une solution sursaturée, est éminemment propre à manifester le dégagement de chaleur qui correspond à la solidification. — Dans les expériences faites avec le sulfate de soude, l'élévation de température, qui se produit au moment de la cristallisation, peut être constatée en mettant simplement la main sur les ballons.

Si l'on fait, dans un ballon, une solution sursaturée d'hyposulfite de soude (en chauffant ce sel avec très peu d'eau et laissant refroidir), qu'on y plonge un tube contenant de l'éther, et qu'on détermine la cristallisation par l'introduction d'un petit cristal du même sel, on voit l'éther entrer en ébullition. — Avec une solution sursaturée d'acétate de soude, le thermomètre peut monter, au moment de la solidification, jusqu'à 47°.

## CHAPITRE VI

## PROPRIÉTÉS DES VAPEURS

280. **Vaporisation, ébullition, évaporation.** — On donne le nom général de *vaporisation*, au passage de l'état liquide à l'état gazeux.

La vaporisation peut se produire sous deux formes différentes : 1° l'*ébullition*, ou production de vapeurs dans toute la masse du liquide, sous forme de bulles qui viennent crever à la surface; 2° l'*évaporation*, ou production insensible de vapeurs à la surface libre.

Il est nécessaire, pour l'intelligence de ces phénomènes, de connaître d'abord les propriétés générales des vapeurs.

## I. — MESURE DE LA FORCE ÉLASTIQUE DES VAPEURS FORMÉES DANS LE VIDE.

281. **Formation des vapeurs dans le vide.** — Plusieurs tubes barométriques, C, D, E, F (fig. 214), étant installés dans une même cuvette, à l'aide d'une pipette recourbée, on fait passer dans le tube D, une petite quantité d'eau; en E, de l'alcool; en F, de l'éther. Dès que ces liquides se sont élevés à la surface du mercure, on voit celui-ci s'abaisser; une partie des liquides s'est donc vaporisée. — Les dépressions  $m'p'$ ,  $m''p''$ ,  $m'''p'''$  sont différentes pour chacun des liquides employés. Si, dans chaque tube, il reste un excès de liquide, et si la température est, par exemple, de 10°, on constate que la dépression est d'environ 9 millimètres avec l'eau, 24 millimètres avec l'alcool, etc. — Ces dépressions mesurent la *force élastique* de la vapeur formée par chacun des liquides, comme elles mesureraient la force élastique d'un gaz introduit dans la chambre barométrique.

On peut donc dire que les liquides donnent naissance, dans le vide, à des vapeurs douées d'une *force élastique comparable à celle des gaz*.

282. **Tension maximum des vapeurs saturantes.** — Lorsque, dans l'expérience qui précède, il reste un excès de liquide en contact avec la vapeur, il est évident que la chambre barométrique contient autant de vapeur qu'elle en peut contenir, à la température de l'expérience : on dit alors que l'espace est *saturé*, ou que la vapeur est *saturante*.

Dans ces conditions, si l'on cherche à augmenter la force élastique de la vapeur, en diminuant l'espace qu'elle occupe, on constate que cette force élastique *reste constante* et qu'une partie de la vapeur se

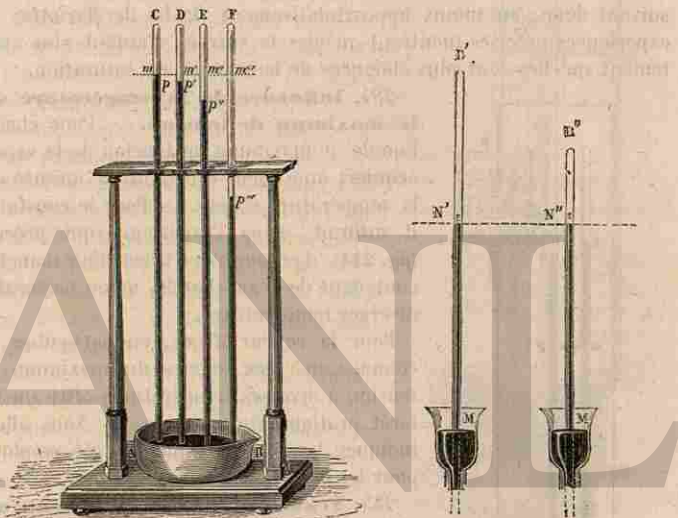


Fig. 214. — Force élastique des vapeurs dans le vide.

Fig. 215. Fig. 216.  
Tension maximum des vapeurs saturantes.

liquéfié. L'expérience se fait à l'aide du baromètre à cuvette profonde, que nous avons employé précédemment (fig. 124). — On introduit, dans la chambre bien purgée d'air, une quantité suffisante d'éther pour que, la tension de la vapeur ayant réduit la colonne de mercure à la hauteur  $MN'$  (fig. 215), il reste encore une petite quantité d'éther liquide : on peut alors diminuer le volume de la vapeur, en enfonçant le tube (fig. 216), sans que la hauteur du mercure  $MN''$  soit modifiée. La vapeur avait donc acquis immédiatement, dans cet espace saturé, un *maximum de tension* qu'on ne peut lui faire dépasser : l'effet produit par la diminution de volume est simplement de faire revenir une partie de la vapeur à l'état liquide.

Inversement, si on soulève le tube de manière à augmenter le volume de la vapeur, on voit encore la hauteur de la colonne de mercure rester constante : donc la tension de la vapeur ne diminue pas, mais une nouvelle quantité d'éther se vaporise. — Il en est ainsi tant que la vapeur reste saturante.

**285. Vapeurs non saturantes.** — Supposons maintenant qu'on puisse augmenter suffisamment l'espace occupé par la vapeur, pour qu'il ne reste plus trace de liquide; on observe alors, en continuant à soulever le tube, que la force élastique de la vapeur varie sensiblement en raison inverse de son volume. — Les vapeurs non saturantes suivent donc, au moins approximativement, la loi de Mariotte; les expériences précises montrent qu'elles la suivent d'autant plus exactement qu'elles sont plus éloignées de leur point de saturation.

**284. Influence de la température sur le maximum de tension.** — Pour chaque liquide, le maximum de tension de la vapeur acquiert une valeur croissante à mesure que la température s'élève. — Pour le constater, il suffirait, dans l'expérience qui précède (fig. 214), d'entourer les tubes d'un manchon contenant de l'eau chaude, qu'on porterait à diverses températures.

Pour la vapeur d'eau, en particulier, la connaissance des valeurs du maximum de tension à diverses températures offre un intérêt pratique considérable. — Nous allons indiquer les procédés qui ont été employés pour les déterminer avec précision.

**285. Tensions de la vapeur d'eau au-dessous de 0°.** — Gay-Lussac a montré que la glace émet, au-dessous de 0°, des vapeurs ayant une tension sensible; il a mesuré cette tension, pour diverses températures, à l'aide de l'appareil suivant.



Fig. 217.

A et B (fig. 217), sont deux tubes barométriques plongeant dans une même cuvette C; la partie supérieure du second est recourbée et pénètre dans le vase D, qui contient un mélange réfrigérant dont on détermine la température avec un thermomètre. On fait passer en B un peu d'eau : la vapeur se répand dans la chambre barométrique. Mais, une portion de cet espace étant maintenue à la température du mélange réfrigérant, à  $-10^{\circ}$ , par exemple, la vapeur ne peut y conserver une tension plus grande que celle qui correspond à  $-10^{\circ}$ ; elle s'y congèle donc en partie, fait place à une nouvelle quantité de vapeur émise par le liquide, laquelle

se congèle à son tour, et ainsi de suite, jusqu'à ce qu'il ne reste plus d'eau liquide au-dessus du mercure. A ce moment, le niveau dans le baromètre B se maintient encore au-dessous du niveau dans le baromètre sec : donc, à  $-10^{\circ}$ , la glace émet de la vapeur. La tension de cette vapeur est mesurée par la distance verticale des deux niveaux A et B.

**286. Tensions de la vapeur d'eau entre 0° et 100°.** — **Méthode de Dalton.** — Pour déterminer la tension de la vapeur d'eau aux températures comprises entre 0° et 100°, Dalton employait deux baromètres, dont l'un A (fig. 218) contenait une petite colonne d'eau au-dessus du mercure, l'autre B était un baromètre ordinaire; les deux tubes plongeaient dans le mercure contenu dans une cuvette de fonte, et étaient entourés d'un manchon de verre rempli d'eau jusqu'en mn. — L'appareil étant porté à diverses températures au moyen d'un fourneau, on déterminait, à l'aide d'une règle métallique divisée, la dépression du mercure dans le baromètre à vapeur, au-dessous du niveau dans le baromètre sec.

Dans l'expérience ainsi faite, lorsqu'on arrive à la température de 100°, on constate que le mercure s'abaisse, dans le tube à vapeur, jusqu'au niveau du mercure dans la cuvette, c'est-à-dire que, à la température de 100°, la force élastique de la vapeur d'eau est égale à la pression atmosphérique. — Il en résulte que l'appareil de Dalton ne pourrait pas servir à déterminer les valeurs de la tension maximum de la vapeur d'eau à des températures supérieures à 100°.

**287. Expériences de Regnault, pour la mesure des tensions de la vapeur d'eau entre 0° et 60°.** — L'appareil de Dalton présente ce grave défaut, qu'il ne permet pas d'établir dans le bain liquide une température uniforme. Dalton avait soin d'agiter l'eau : mais l'agitation se transmettait, par le mercure de la cuvette, à celui des colonnes barométriques, il fallait toujours attendre quelques instants avant de faire la lecture des hauteurs : de là, des erreurs d'autant plus graves que, à des températures un peu élevées, de faibles variations de température entraînent des variations considérables dans la tension de la vapeur.

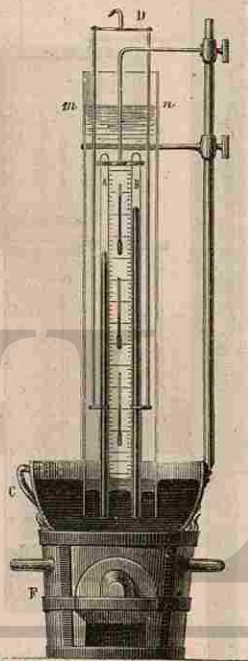


Fig. 218. — Appareil de Dalton.

Regnault a remplacé la disposition de Dalton par la suivante. Les deux tubes barométriques sont fixés dans des tubulures *a* et *b*, pratiquées au fond d'une caisse de tôle *VV* (fig. 219), dont l'une des faces

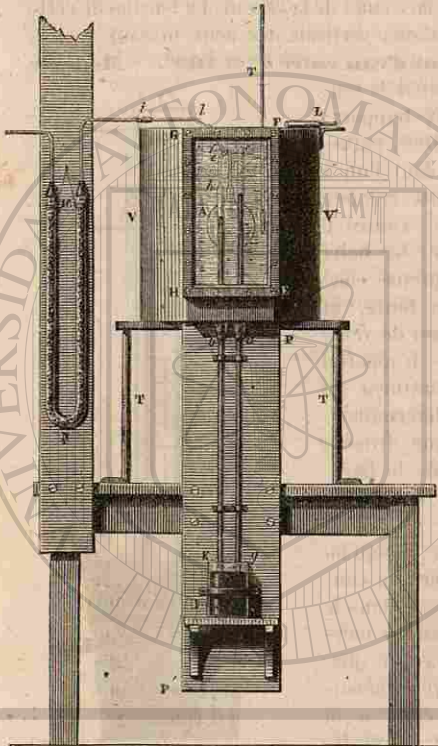


Fig. 219.  
Tension de la vapeur d'eau entre 0° et 60°;  
appareil de Regnault.

est fermée par une glace de verre *EFGH*; cette caisse contient de l'eau, qui environne les parties supérieures des tubes, et que l'on peut chauffer à l'aide d'un fourneau placé au-dessous. Le sommet du baromètre à vapeur communie, par un tube capillaire *he*, avec un ballon de verre *A* contenant de l'eau : ce tube capillaire est interrompu par une pièce de cuivre à trois branches *f*; la troisième branche communique avec une machine pneumatique, par l'intermédiaire d'un tube *MN* à ponce sulfurique. La caisse étant vide, on commence par chauffer légèrement l'eau du ballon, de façon à en faire distiller une petite quantité dans le tube barométrique; on fait jouer ensuite la machine pneumatique : l'eau du ballon et celle du tube entrent en ébullition, tandis que l'air et la vapeur

traversent le tube *MN*, où la vapeur est absorbée par de la ponce sulfurique. Lorsqu'on a ainsi vaporisé quelques grammes d'eau, on peut admettre que l'air a été expulsé de l'appareil; on ferme à la lampe le tube qui s'engage dans la troisième branche de la pièce *t*, on verse de l'eau dans la caisse, et on chauffe cette eau, en la maintenant dans un état d'agitation constante. — Pour faire une observation, on relève, au cathétomètre, la différence des niveaux du mercure dans les deux tubes barométriques, et on lit la température sur le thermomètre *T*. On corrige le résultat, en tenant compte de la dilatation du mercure (257) du poids de la petite colonne d'eau qui surmonte le

mercure dans le tube à vapeur, et enfin des actions capillaires qui s'exercent dans les deux tubes (\*).

Mais cet appareil ne peut guère être employé que jusqu'à 60°; dès que la force élastique de la vapeur est suffisante pour déprimer le mercure au-dessous du fond de la caisse, la vapeur n'étant plus tout entière à la température du bain, les indications de l'appareil n'ont plus de signification précise. Pour mesurer les tensions qui correspondent aux températures intermédiaires entre 60° et 100°, Regnault a employé un autre procédé, applicable également au-dessus de 100°, et que nous allons indiquer.

**288. Expériences de Regnault, pour les températures comprises entre 50 et 100°, et pour les températures supérieures.** — Le principe de la méthode est le suivant : *La force élastique de la vapeur émise par un liquide en ébullition est égale à la pression qui s'exerce sur sa surface.* — L'appareil de Dalton nous a déjà montré, en effet, que la force élastique de la vapeur d'eau à 100°, c'est-à-dire à la température où l'eau entre en ébullition à l'air libre, est égale à la pression de l'atmosphère. Le principe peut encore être vérifié, pour ce même cas particulier, par l'expérience suivante. — Un tube recourbé *ABC* (fig. 220), ayant la forme d'un petit tube de Mariotte, est

d'abord rempli de mercure jusqu'au sommet de sa branche fermée *C* : on fait passer un peu d'eau dans cette branche, puis on suspend l'appareil dans un ballon de verre, contenant de l'eau que l'on porte à l'ébullition. On voit la vapeur déprimer le mercure dans la branche fermée : quand la température est devenue uniforme, les niveaux du mercure arrivent à la même hauteur dans les deux branches. — La généralité du principe énoncé sera d'ailleurs établie plus loin, par l'étude du phénomène de l'ébullition lui-même.

L'un des appareils employés par Regnault est représenté par la figure 221. Une petite chaudière de cuivre *A* communique par un tube

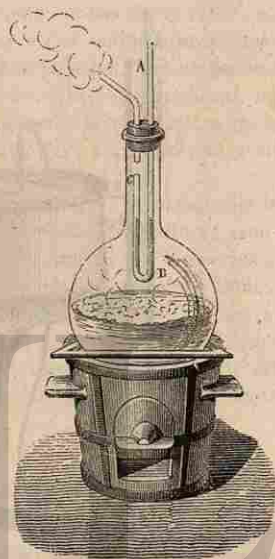


Fig. 220.

(\*) La masse d'eau contenue dans la caisse étant très considérable, il est facile de la maintenir assez longtemps à une température constante. Pour cela, on la chauffe jusqu'au voisinage de cette température, puis on ferme les ouvertures du fourneau : le thermomètre continue à monter quelques instants, puis atteint un *maximum*, qui se maintient pendant plusieurs minutes avant que la température recommence à décroître. C'est à ce moment qu'on fait l'observation.



incliné *ab*, avec un grand ballon métallique B dans lequel on peut raréfier ou comprimer de l'air à différentes pressions, en le mettant en communication, au moyen d'un tube de plomb, soit avec une machine pneumatique, soit avec un système de pompes de compression; les pressions ainsi obtenues sont mesurées par le manomètre à air libre KPO. Le ballon est entouré d'une masse d'eau froide, qui maintient sa

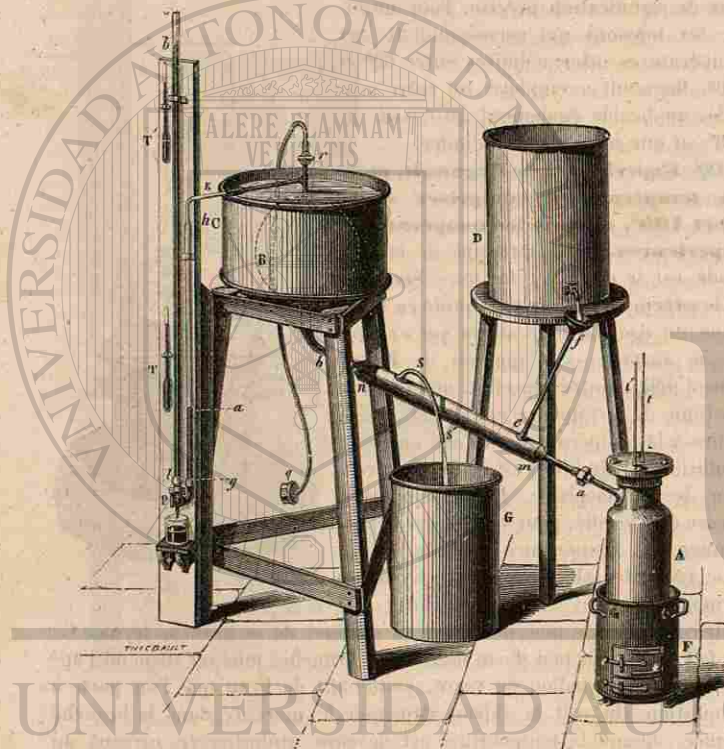


Fig. 221. — Tensions de la vapeur d'eau aux températures élevées; appareil de Regnault.

température constante. La vapeur formée par l'ébullition dans la chaudière passe dans le tube *ab*, refroidi par un courant d'eau qui parcourt le manchon *mn*: cette vapeur se condense, et retombe en eau dans la chaudière. — Or, d'après le principe précédent, lorsque l'ébullition a lieu régulièrement dans la chaudière, la force élastique de la vapeur est égale à la pression que l'on a établie dans le ballon B. Les observations se réduisent donc à noter d'une part, la température

donnée par un thermomètre plongeant dans la vapeur; d'autre part, la force élastique mesurée par le manomètre à air libre. — Dans chaque expérience, la pression et la température devant conserver la même valeur pendant un temps à peu près indéfini, on peut faire plusieurs fois chacune des lectures, et s'assurer, par la constance des résultats obtenus, de la légitimité de la méthode.

Pour déterminer les tensions de la vapeur entre 50° et 100°, on raréfiait l'air dans le ballon B; pour opérer à des températures supérieures à 100°, on comprimait l'air sous des pressions graduellement croissantes. — Pour les pressions considérables, on employait un appareil présentant une plus grande résistance; le manomètre de la figure 221 était remplacé par le grand manomètre à air libre qui avait servi pour les recherches sur la loi de Mariotte (fig. 129).

289. **Tables numériques.** — Regnault a mesuré les valeurs de la tension maximum de la vapeur d'eau, à diverses températures comprises entre  $-50^{\circ}$  et  $+256^{\circ}$ . De ces nombres, fournis par l'expérience directe, il a déduit, par une méthode d'interpolation, diverses tables, qui donnent les valeurs de la tension maximum, de degré en degré, entre  $-50^{\circ}$  et  $+256^{\circ}$ . Les tables qui suivent sont un abrégé de celles de Regnault. On en trouvera plus loin une autre (page 266), qui est particulièrement destinée à l'étude du degré d'humidité que présente l'atmosphère à divers instants.

TENSION MAXIMUM DE LA VAPEUR D'EAU, EN MILLIMÈTRES, ENTRE  $-50^{\circ}$  ET  $100^{\circ}$

| TEMPÉRATURE.  | TENSION<br>en millimètres. | TEMPÉRATURE. | TENSION<br>en millimètres.   |
|---------------|----------------------------|--------------|------------------------------|
| $-50^{\circ}$ | 0 <sup>m</sup> ,59         | 40°          | 54 <sup>m</sup> ,91          |
| $-20^{\circ}$ | 0 <sup>m</sup> ,93         | 50°          | 91 <sup>m</sup> ,98          |
| $-10^{\circ}$ | 2 <sup>m</sup> ,09         | 60°          | 148 <sup>m</sup> ,79         |
| 0°            | 4 <sup>m</sup> ,60         | 70°          | 235 <sup>m</sup> ,05         |
| +10°          | 9 <sup>m</sup> ,16         | 80°          | 334 <sup>m</sup> ,64         |
| 20°           | 17 <sup>m</sup> ,59        | 90°          | 525 <sup>m</sup> ,45         |
| 50°           | 31 <sup>m</sup> ,58        | 100°         | 760 <sup>m</sup> ,00 (1 atm) |

TENSION MAXIMUM DE LA VAPEUR D'EAU, EN ATMOSPHÈRES, ENTRE  $100^{\circ}$  ET  $256^{\circ}$

| TEMPÉRATURE. | TENSION<br>en atmosphères. | TEMPÉRATURE. | TENSION<br>en atmosphères. |
|--------------|----------------------------|--------------|----------------------------|
| 100°         | 1 atm.                     | 135°         | 5 atm.                     |
| 121°         | 2 —                        | 181°         | 10 —                       |
| 155°         | 5 —                        | 215°         | 20 —                       |
| 145°         | 4 —                        | 256°         | 50 —                       |

290. **Tensions des vapeurs des divers liquides.** — Regnault a appliqué les méthodes précédentes à la détermination des tensions des

vapeurs saturantes d'un certain nombre de liquides ou de gaz liquéfiés. Le tableau ci-après contient quelques-uns des résultats obtenus.

Certains liquides n'émettent pas, à la température ordinaire, de vapeurs appréciables : tels sont l'acide sulfurique et les huiles grasses.

Le mercure n'émet, aux températures ordinaires de l'atmosphère, que des vapeurs dont la tension est extrêmement faible. Dans les mesures barométriques et manométriques effectuées à la température de l'atmosphère, il n'est donc pas nécessaire de tenir compte de la tension de la vapeur de mercure (\*).

TENSION MAXIMUM DES VAPEURS DE QUELQUES LIQUIDES, EN MILLIMÈTRES DE MERCURE

| TEMPÉRATURE. | MERCURE. | ALCOOL. | SULFURE DE CARBONE. | ÉTHER. |
|--------------|----------|---------|---------------------|--------|
| -20°         | —        | 5       | 45                  | 67     |
| 0°           | 0,02     | 15      | 152                 | 185    |
| +20°         | —        | 45      | 502                 | 455    |
| 40°          | 0,12     | 157     | 617                 | 910    |
| 60°          | —        | 550     | 1164                | 1729   |
| 80°          | —        | 815     | —                   | 3024   |
| 100°         | 0,71     | 1695    | 2529                | 4951   |
| 120°         | —        | 5220    | 5145                | 7702   |
| 140°         | —        | 5657    | 7387                | —      |

II. — MÉLANGE DES GAZ ET DES VAPEURS.

291. **Les vapeurs acquièrent dans les gaz la même tension que dans le vide, à la même température.** — Cette loi, énoncée par Dalton, peut se vérifier au moyen de l'expérience suivante, indiquée par Gay-Lussac. — AB (fig. 222) est un manomètre à air libre dont la branche A est formée par un gros tube, divisé en parties d'égales capacités. Ce manomètre étant bien desséché, on l'emplit entièrement de mercure; après quoi, on y adapte le ballon M plein d'air ou d'un gaz sec. On ouvre les trois robinets r, r', r'' : une certaine quantité de mercure s'écoule et est remplacée dans le tube A par de l'air venu du ballon; lorsqu'on a introduit une quantité de gaz suffisante, on ferme les robinets, on détache le ballon, et l'on ramène le gaz à la pression de l'atmosphère, en versant du mercure par le tube B.

On adapte alors, au-dessus du robinet r, un robinet à gouttes R

(\*) Cependant les expériences de M. Merget ont montré que les vapeurs émises par le mercure peuvent encore être rendues sensibles jusqu'à  $-44^{\circ}$ , c'est-à-dire à une température inférieure à celle de sa solidification. En outre, contrairement à l'opinion émise par Faraday, les vapeurs de mercure, qui, à la température ordinaire, ont une tension très faible, se répandent cependant à une distance considérable du liquide qui les a produites : c'est ce que montre l'action de ces vapeurs sur des réactifs très sensibles, tels que les sels d'or, de palladium ou d'argent.

(représenté, à la droite de la figure, à une échelle beaucoup plus grande). Le noyau de ce robinet n'est percé que d'une petite cavité hémisphérique; on verse une certaine quantité de liquide dans l'entonnoir qui le surmonte, et on le fait tourner plusieurs fois sur lui-même : à chaque tour, la cavité qu'il contient s'emplit du liquide de l'entonnoir, et déverse ce liquide dans le manomètre, où il se volatilise. On continue jusqu'à ce qu'on aperçoive, au-dessus du mercure, un excès de liquide non vaporisé. — A mesure que la vapeur se forme dans le tube A, le niveau du mercure se déprime dans ce tube et s'élève en B; une fois la saturation atteinte, ce que l'on reconnaît à la constance des niveaux, on peut procéder à la mesure de la tension de cette vapeur. Pour cela, on ramène le volume à ce qu'il était d'abord, en versant du mercure par la branche B; on détermine alors la différence de hauteur des deux niveaux. — L'expérience prouve qu'elle est précisément égale à la force élastique de la vapeur du liquide dans le vide, à la même température.

Il résulte d'expériences précises, faites par Regnault, que la vaporisation des liquides dans les gaz diffère simplement de la vaporisation dans le vide, en ce que le *point de saturation* n'est atteint qu'au bout d'un certain temps, souvent assez long.

292. **Loi du mélange des gaz et des vapeurs.** — L'expérience précédente montre que la force élastique d'un mélange de gaz et de vapeur est égale à la somme des forces élastiques qu'auraient séparément le gaz et la vapeur, si chacun d'eux occupait seul le volume du mélange. C'est une loi exactement semblable à celle du mélange des gaz (150).

La même loi s'appliquerait encore au cas où la vapeur ne serait pas saturante, car alors cette vapeur suivrait la loi de Mariotte, et se comporterait comme un gaz proprement dit.

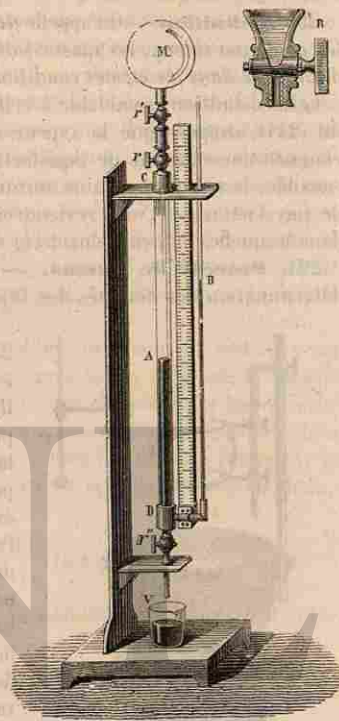


Fig. 222.  
Mélange des gaz et des vapeurs;  
appareil de Gay-Lussac.

## III. — DENSITÉS DES VAPEURS.

295. **Définition** — On appelle *densité* d'une vapeur, le rapport entre les poids (ou mieux, les masses) de deux volumes égaux de vapeur et d'air, pris dans les mêmes conditions de température et de pression.

Cette définition, semblable à celle de la densité d'un gaz proprement dit (244), suppose que la vapeur soit prise à une température assez éloignée de son point de liquéfaction pour qu'on puisse, sans erreur sensible, la regarder comme suivant à la fois la loi de Mariotte et la loi de Gay-Lussac. — Nous reviendrons plus loin sur les circonstances dans lesquelles on peut considérer cette condition comme réalisée (295).

294. **Procédé de Dumas.** — Le procédé le plus précis, pour la détermination des densités des vapeurs, est celui de Dumas.

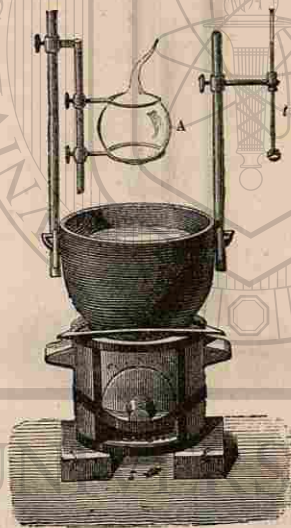


Fig. 225. — Détermination de la densité des vapeurs; procédé de Dumas.

On prend un ballon A (fig. 225), de 250 à 500 centimètres cubes de capacité, dont on étire le col en pointe fine. Le ballon étant ouvert, on le place sur l'un des plateaux d'une balance, en mettant à côté de lui un poids marqué, de 2 grammes par exemple, et on établit la tare, dans l'autre plateau. — Le poids apparent de la tare est équilibré par ces 2<sup>es</sup>, et par le poids apparent du verre du ballon. — Puis, on introduit dans le ballon A une certaine quantité du liquide dont on cherche la densité de vapeur (\*). On assujettit ce ballon dans un support, comme le montre la figure, et on le fait plonger dans un bain d'huile ou d'alliage fusible, de manière à obtenir toujours une température très notablement supérieure au point d'ébullition du liquide intérieur. La vapeur s'échappe par la pointe effilée, sous la forme d'un jet, et entraîne avec elle l'air du ballon; lorsque le jet cesse de se produire, on ferme la pointe au chalumeau. On note à ce moment la température T du bain, et la pression atmosphérique H<sub>1</sub>; on retire le

(\*) Il suffit, pour cela, de chauffer légèrement le ballon, et de le laisser ensuite refroidir, en plongeant la pointe ouverte dans le liquide: la contraction de l'air, produite par le refroidissement, fait pénétrer une petite quantité de liquide dans l'appareil.

ballon, on l'essuie, et on le reporte sur la balance. Supposons, pour fixer les idées, qu'il ait augmenté de poids; il faudra, pour établir l'équilibre, diminuer d'une certaine quantité *p* les deux grammes placés à côté de lui. On note la température *t* du laboratoire et la hauteur barométrique H, au moment de cette seconde pesée. — Le poids apparent de la tare est alors équilibré par (2 — *p*)<sup>es</sup>, par le poids apparent du verre du ballon, et par le poids apparent de la substance contenue dans le ballon fermé, dans les conditions *t* et H de l'air ambiant au moment de cette seconde pesée. En négligeant la petite variation de poussée que le verre du ballon a pu éprouver, en passant des conditions de la première pesée aux conditions de la seconde, on peut dire que la quantité *p* exprime l'excès du poids P<sub>1</sub> de la vapeur qui remplit le ballon à la température T et sous la pression H<sub>1</sub>, sur le poids P de l'air que contiendrait ce même ballon à la température *t* et sous la pression H.

Pour trouver P, on détermine le volume intérieur du ballon. A cet effet, on plonge la pointe sous le mercure, et on la brise; la vapeur intérieure s'étant condensée, le mercure pénètre dans le ballon et le remplit. On verse ensuite ce mercure dans une éprouvette graduée, afin d'en mesurer le volume; ce volume, ramené à 0°, fait connaître la capacité intérieure V du ballon à la même température. On aura donc :

$$P = V(1 + kt) 0,001295 \frac{H}{76} \frac{1}{1 + \alpha t}$$

On en déduit le poids P<sub>1</sub> de la vapeur qui remplit le ballon à la température T et sous la pression H<sub>1</sub>, savoir :

$$P_1 = p + V(1 + kT) 0,001295 \frac{H_1}{76} \frac{1}{1 + \alpha T}$$

Il reste à trouver le poids P<sub>2</sub> de l'air que contiendrait le ballon dans les mêmes conditions de température et de pression; ce poids est

$$P_2 = V(1 + kT) 0,001295 \frac{H_1}{76} \frac{1}{1 + \alpha T}$$

et si l'on divise P<sub>1</sub> par P<sub>2</sub>, le quotient exprime la densité cherchée (\*). MM. H. Sainte-Claire Deville et Troost ont appliqué la méthode de

(\*) Nous avons supposé que, au moment où l'on brise sous le mercure la pointe du ballon, celui-ci s'emplit complètement. Il peut arriver que la vapeur du liquide volatil n'ait pas expulsé la totalité de l'air; on en retrouve alors une bulle dans le ballon après la rentrée du mercure. On la fait passer au sommet d'une éprouvette graduée, on en mesure le volume à une température et à une pression connues, et on en déduit le poids. Ces données permettent d'effectuer les corrections que nécessite la présence de cet air.

Dumas à la recherche des densités de vapeurs des liquides qui n'entrent en ébullition qu'à des températures très élevées. — Pour cela, ils ont employé des ballons de porcelaine, qu'ils plaçaient dans des étuves chauffées par de la vapeur de mercure, de soufre ou de cadmium, ces corps étant maintenus en ébullition sous la pression atmosphérique. L'avantage de ce mode de chauffage est de donner, pendant un temps aussi long qu'on le veut, une température bien connue, et dont la valeur reste rigoureusement constante.

**295. Densités des vapeurs, dans les conditions où elles se comportent comme des gaz.** — La densité d'une même vapeur, par rapport à l'air, lorsqu'on la détermine à des températures de plus en plus élevées, présente des valeurs de plus en plus faibles; mais ces valeurs diffèrent de moins en moins les unes des autres, et la densité, au-dessus d'une certaine température, devient sensiblement constante. — Donc, à partir de cette température, un certain volume de vapeur éprouve les mêmes variations que subirait un égal volume d'air dans les mêmes circonstances de température et de pression; en d'autres termes, cette vapeur suit les lois de Mariotte et de Gay-Lussac (\*).

Pour chaque vapeur, on réserve généralement le nom de *densité*, à cette valeur limite vers laquelle tendent les valeurs déterminées à des températures croissantes. — Le tableau suivant donne les densités de quelques vapeurs, ainsi définies.

|                     | DENSITÉS<br>DE VAPEURS. |
|---------------------|-------------------------|
| Alcool . . . . .    | 1,615                   |
| Eau . . . . .       | 0,622                   |
| Éther . . . . .     | 2,586                   |
| Iode . . . . .      | 8,716                   |
| Mercure . . . . .   | 6,976                   |
| Phosphore . . . . . | 4,420                   |
| Soufre . . . . .    | 2,209                   |

Parmi ces résultats, il est important de retenir, en vue des applications, celui qui est relatif à la vapeur d'eau, dont la densité est 0,622.

— On emploie aussi la valeur  $\frac{5}{8}$ , qui diffère peu de la précédente.

**296. Calcul du poids de vapeur d'eau qui est contenu dans un volume déterminé d'air saturé à une température connue.**

— La tension de la vapeur d'eau étant la même dans l'air que dans le vide à la même température (291), on trouvera le poids  $p$  de la vapeur qui sature un volume  $V$  d'air à la température de  $t$  degrés, en remplaçant, dans la formule générale établie précédemment (249), la den-

(\*) Avant d'atteindre cette limite, certaines vapeurs éprouvent des variations de densité considérables. — Ainsi, d'après M. Cahours, la densité de la vapeur d'acide acétique à la température de 123° est 3,20; à la température de 250°, elle est seulement de 2,09. A partir de cette température, elle reste sensiblement constante.

sité  $D$  par 0,622, et la force élastique  $H$  par la tension maximum  $F$  de la vapeur d'eau à  $t$  degrés :

$$(1) \quad p = V \times 0,001295 \frac{F}{76} \times \frac{1}{1+at} \times 0,622,$$

ou encore, en employant la densité approchée  $\frac{5}{8}$ ,

$$(1 \text{ bis}) \quad p = V \times 0,001295 \times \frac{F}{76} \times \frac{1}{1+at} \times \frac{5}{8}.$$

**297. Calcul du poids total d'un volume déterminé d'air saturé de vapeur d'eau à une température connue.** — Le poids total  $P$  d'un volume  $V$  d'air saturé de vapeur d'eau se compose de deux parties : le poids  $p$  de la vapeur, et le poids  $p'$  de l'air supposé sec. Or, d'après la loi du mélange des gaz et des vapeurs, si l'on désigne par  $H$  la force élastique totale de l'air humide, celle de l'air supposé sec est  $H - F$ . La formule établie plus haut (249) donne donc le poids  $p'$ , en y remplaçant  $D$  par l'unité, et  $H$  par  $H - F$ , ce qui donne :

$$p' = V \times 0,001295 \times \frac{H-F}{76} \times \frac{1}{1+at}.$$

En ajoutant, à cette valeur de  $p'$ , la valeur de  $p$  donnée par l'expression (1) et en remarquant que  $1 - 0,622 = 0,378$ , il vient :

$$(2) \quad P = V \times 0,001295 \times \frac{1}{1+at} \times \frac{H - 0,378.F}{76}.$$

Si l'on prend pour la valeur du poids  $p$  l'expression (1 bis), on a :

$$(2 \text{ bis}) \quad P = V \times 0,001295 \times \frac{1}{1+at} \times \frac{H - \frac{5}{8}F}{76}.$$

Cette dernière formule est très fréquemment employée.

Si  $V$  était exprimé en litres et  $P$  en grammes, il faudrait, dans ces formules, remplacer 0,001295 par 1,295. ®

## CHAPITRE VII

DIVERS MODES DE FORMATION DES VAPEURS  
CONDENSATION DES VAPEURS ET DES GAZ

## I. — ÉVAPORATION.

298. **Évaporation.** — On appelle *évaporation*, la production de vapeur s'effectuant à la surface libre d'un liquide.

Quand l'espace où la vapeur peut se répandre est limité, que cet espace soit vide ou occupé par un gaz, nous avons vu que la vapeur cesse de se produire lorsqu'elle a acquis le maximum de tension correspondant à la température actuelle.

Si, au contraire, le liquide est placé à l'air libre, l'évaporation qui se produit à sa surface continue tant qu'il reste du liquide, et cela quelle que soit la température. Seulement, l'évaporation est d'autant plus rapide que la température est plus élevée. — Ainsi, l'eau répandue sur le sol s'évapore plus vite en été qu'en hiver.

La production de vapeur est aussi d'autant plus abondante que la surface libre du liquide offre plus d'étendue. — C'est pourquoi, pour concentrer l'eau de mer, dans les marais salants, on la fait arriver dans des bassins présentant une grande surface.

L'agitation de l'air active encore l'évaporation, en entraînant la vapeur à mesure qu'elle se forme. — C'est pourquoi, dans les séchoirs, on a soin de déterminer des courants d'air, afin de faire sécher plus vite le linge ou les étoffes qui y sont suspendus.

Enfin, l'évaporation est d'autant plus rapide que l'espace environnant est plus éloigné de la saturation. Suivant Dalton, la quantité de vapeur qui se forme en un temps donné est proportionnelle à l'excès de la tension maximum de la vapeur, pour la température actuelle, sur la tension de la vapeur qui existe dans l'atmosphère. — Ce n'est là qu'une loi approximative, dont on peut faire usage dans les cas où la différence des deux tensions est peu considérable.

299. **Froid produit par l'évaporation.** — Lorsqu'un liquide s'évapore sans l'intervention d'aucune source de chaleur, il éprouve toujours un *abaissement de température*. — Mettons, par exemple, une couche de coton autour du réservoir d'un thermomètre, et mouillons le coton avec de l'éther; à mesure que l'éther s'évapore, on voit le thermomètre indiquer une température de plus en plus basse. Cela tient à ce que le passage de l'état liquide à l'état de vapeur exige, comme le passage de l'état solide à l'état liquide (266), l'absorption d'une certaine quantité de chaleur, qu'on appelle ici *chaleur de vaporisation*; dans le cas actuel, la vapeur emprunte cette chaleur au liquide lui-même, et abaisse ainsi progressivement sa température.

300. **Expérience de Leslie.** — **Cryophore de Wollaston.** — L'évaporation rapide de l'eau, dans un milieu sans cesse raréfié, peut abaisser sa température jusqu'à déterminer la *congélation* du liquide restant. — Cette expérience, qui est due à Leslie, s'effectue en plaçant quelques gouttes d'eau dans une petite capsule de liège noircie A (fig. 224), au-dessus d'un vase V contenant de l'acide sulfurique, et sous le récipient de la machine pneumatique: on fait le vide aussi complètement que possible, et on ferme la clef de la machine. L'acide sulfurique continue d'absorber la vapeur d'eau à mesure qu'elle se



Fig. 224. — Expérience de Leslie.

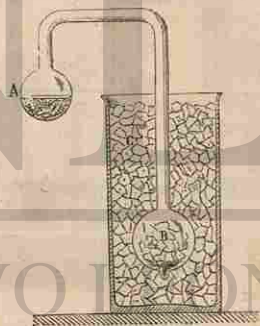


Fig. 225. — Cryophore de Wollaston.

produit, et concourt ainsi à activer l'évaporation; au bout de quelques minutes, on voit se former dans la capsule une petite lentille de glace (\*).

Le cryophore de Wollaston (fig. 225) permet de produire la congé-

(\*) Leslie a modifié cette expérience, de façon à la rendre plus frappante encore il taillait, dans un morceau de glace, une petite capsule plate, sur laquelle il déposait un peu de mercure: cette capsule étant placée sous le récipient de la machine

lation de l'eau par évaporation, sans le secours de la machine pneumatique. — Deux boules de verre A et B sont réunies par un tube recourbé; la boule A contient de l'eau. En construisant l'appareil, on l'a purgé d'air, en faisant bouillir pendant quelque temps l'eau dans la boule A, avant de fermer à la lampe la pointe effilée qui termine la boule B. — Pour faire l'expérience, on entoure la boule B d'un mélange réfrigérant; il se produit alors une évaporation rapide à la surface de l'eau qui se trouve dans la boule A, parce que la vapeur, à mesure qu'elle se forme, vient se condenser dans la boule B. Au bout de quelques minutes, l'eau qui reste en A est entièrement congelée.

501. **Appareil de M. Édouard Carré.** — On doit à M. Édouard Carré un appareil qui est une application de l'expérience de Leslie, et qui permet d'obtenir, en quelques minutes, une carafe d'eau glacée.

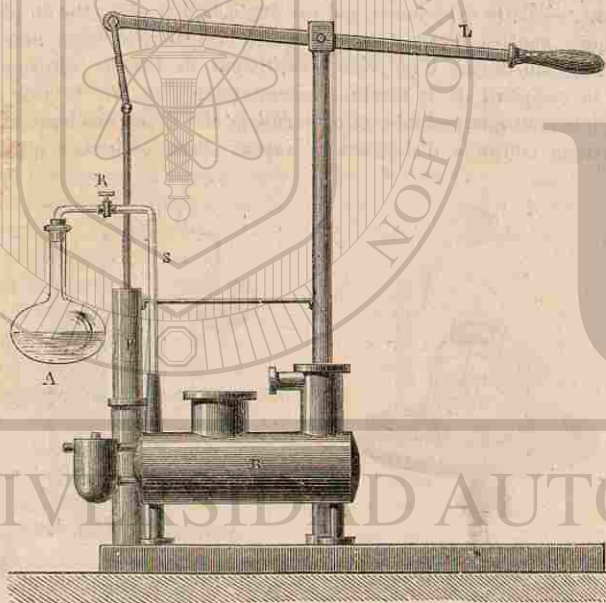


Fig. 226. — Appareil de M. Éd. Carré, pour la production de la glace.

Une pompe P (fig. 226), semblable à la pompe à main qui a été décrite précédemment (176), et dont on manœuvre la tige au moyen du levier L, communique avec un tube S, à l'extrémité duquel on adapte,

pneumatique, au-dessus d'une cuvette contenant de l'acide sulfurique concentré, l'évaporation de la glace déterminait un abaissement de température suffisant pour congeler le mercure.

au moyen d'un bouchon de caoutchouc, la carafe A qui contient l'eau. Une disposition particulière force les gaz aspirés par la pompe à traverser le cylindre B qui contient de l'acide sulfurique concentré, destiné à absorber la vapeur d'eau. — On fait d'abord le vide, aussi complètement que le permet la pompe, et on l'entretient ensuite en donnant de temps en temps quelques coups de piston : au bout de sept ou huit minutes, on voit se former de longues aiguilles de glace à la surface du liquide, et la congélation finit par envahir toute la masse.

502. **Application de l'ammoniaque liquéfiée à la production de la glace.** — **Appareil de M. F. Carré.** — Le refroidissement produit par la vaporisation de l'ammoniaque liquéfiée a été utilisé industriellement par M. Ferdinand Carré, pour obtenir des froids assez considérables. — Voici l'un des appareils de petite dimension qui sont maintenant dans le commerce.

Un cylindre métallique A (fig. 227) contient une solution saturée d'ammoniaque, et communique par le tube c avec un récipient B. L'appareil étant hermétiquement clos, si l'on place le cylindre A sur un fourneau, le gaz ammoniac qui se dégage va se liquéfier en B : l'expérience montre que la solution a perdu tout son gaz quand le thermomètre t marque 120°. — On retire alors le cylindre A du feu, et on le plonge dans un seau d'eau froide : l'ammoniaque qui était liquéfiée en B se vaporise, et vient successivement se redissoudre en A. Le froid produit en B est alors considérable; de l'eau placée dans la cavité de ce récipient se congèle rapidement. — Si l'on a soin d'envelopper le récipient de plusieurs doubles de flanelle, on peut y maintenir, pendant une heure, une température de  $-50^{\circ}$ .

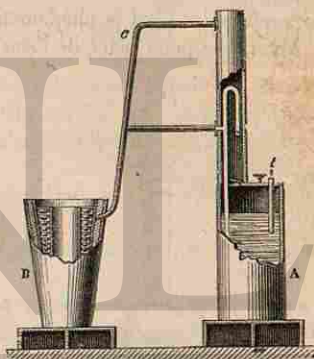


Fig. 227. — Production de la glace. Appareil de M. F. Carré.

L'appareil, restant invariablement clos, ne permet aucune déperdition de matière; il peut être employé indéfiniment, sans autre dépense que celle du combustible. — Pour 1 kilogramme de charbon brûlé, on obtient environ 5 kilogrammes de glace.

M. Carré a construit, d'après les mêmes principes, de grands appareils dans lesquels la production de la glace s'effectue d'une manière continue.

503. **Production des basses températures.** — Le chlorure de méthyle, l'acide sulfureux, qui bout à  $-10^{\circ}$ , sont bien plus volatils que l'eau. Exposés à l'air, ils s'évaporent rapidement, et abaissent la

température.

température à  $-20^{\circ}$  ou  $-50^{\circ}$ . Quand on fait passer un courant d'air dans le liquide, l'évaporation est encore plus active et la température s'abaisse à  $-50^{\circ}$  ou  $-60^{\circ}$  : on peut alors congeler le mercure. — L'évaporation du protoxyde d'azote liquide, à l'air libre, donne un abaissement de température qui peut atteindre à  $-80^{\circ}$ . Enfin, par l'évaporation, dans le vide, de l'acide carbonique liquide, ou de l'éthylène liquide, on peut obtenir une température de  $-140^{\circ}$ , qui permet de congeler le sulfure de carbone et l'alcool.

## III. — ÉBULLITION.

504. **Phénomène de l'ébullition.** — Quand une masse liquide est soumise à l'action continue d'un foyer de chaleur, il arrive, en général, qu'on voit apparaître, à un instant déterminé, des bulles de vapeur qui se forment au sein même du liquide, et viennent crever à sa surface. — C'est le phénomène de l'ébullition.

Ainsi, lorsqu'on place de l'eau sur le feu, dans un vase de verre, on y voit apparaître d'abord, quand elle commence à s'échauffer, de petites bulles très fines, qui s'élèvent à sa surface. C'est de l'air, qui était en dissolution dans l'eau, et qui se dégage. — Un peu plus tard, on commence à entendre un murmure particulier, qu'on exprime en disant que *l'eau chante*. En même temps, on aperçoit au fond du liquide, des bulles plus grosses; mais elles apparaissent et disparaissent subitement, sans monter à la surface. Ce sont des bulles de vapeur, qui se forment au contact de la paroi chauffée, mais qui se condensent brusquement dès qu'elles rencontrent des couches d'eau moins chaudes. C'est le mouvement alternatif, imprimé à l'eau, par la formation et la condensation de ces bulles, qui produit le murmure dont nous venons de parler. — Enfin, lorsque toute la masse de l'eau est arrivée à la température de  $100^{\circ}$ , le phénomène change. De grosses bulles de vapeur s'élèvent dans le liquide (fig. 228), en lui imprimant une agitation tumultueuse, et viennent crever à sa surface.

Fig. 228. — Ébullition de l'eau.

505. **Lois de l'ébullition.** — L'observation d'un thermomètre placé dans un liquide en ébullition, conduit à formuler les deux lois suivantes :

1<sup>o</sup> Pour un même liquide, placé dans les mêmes conditions, l'ébullition se produit toujours à une même température.

2<sup>o</sup> Une fois l'ébullition commencée, si les conditions restent les mêmes, la température demeure invariable pendant toute la durée de l'ébullition.

Mais c'est seulement par une étude attentive qu'on a pu définir quelles sont ces conditions, dont la réunion est nécessaire pour que l'ébullition se produise toujours à une même température. — Nous allons d'abord mettre en évidence les résultats de cette étude.

506. **L'ébullition d'un liquide ne peut s'effectuer à une température inférieure à celle pour laquelle la tension de sa vapeur est égale à la pression que supporte le liquide.** — On voit, *a priori*, que si l'on imagine une bulle de vapeur formée au sein d'un liquide, elle ne pourra subsister à l'état gazeux qu'à la condition d'avoir une force élastique au moins égale à la pression qu'elle supporte de la part du liquide qui la circonscrit. — Or, si le liquide présente une surface libre, en contact avec un gaz, la pression en un point déterminé de sa masse est égale à la pression du gaz, augmentée de la pression due à la profondeur du point considéré au-dessous de cette surface. Donc, dans ce cas, l'ébullition ne doit être possible que si la température est au moins égale à celle pour laquelle la tension de la vapeur est égale à la pression du gaz. — S'il s'agit de l'eau en contact avec l'atmosphère, l'ébullition n'est possible que si la température est au moins égale à  $100^{\circ}$ .

Mais, si la surface libre de l'eau supportait une pression inférieure ou supérieure à 1 atmosphère, l'ébullition devrait être possible à une température inférieure ou supérieure à  $100^{\circ}$ . C'est ce que nous allons d'abord vérifier.

507. **Ébullition de l'eau à des températures inférieures à  $100^{\circ}$ , sous des pressions moindres que  $76^{\text{cm}}$ .** — Sur le sommet des hautes montagnes, la pression étant beaucoup moindre que  $76^{\text{cm}}$ , l'eau doit entrer en ébullition à des températures notablement inférieures à  $100^{\circ}$ . — On a constaté, en effet, que sur le mont Saint-Gothard, l'eau bout à  $92^{\circ}$  environ; au sommet du Mont Blanc, elle bout à  $85^{\circ}$  (\*).

L'expérience suivante n'est pas moins concluante. — On met de l'eau tiède (à 40 ou 45 degrés par exemple) dans un vase placé sur le

(\*) On peut, d'après cela, mesurer approximativement la hauteur d'une montagne, en déterminant, au moyen d'un thermomètre très sensible, la température d'ébullition de l'eau au sommet de cette montagne, et cherchant ensuite, dans les tables de Regnault, quelle est la tension maximum de la vapeur d'eau à cette température. En effet, cette tension n'est autre que la pression barométrique, au point où l'expérience a été faite. Il suffit donc de comparer cette pression à la pression barométrique au pied de la montagne, pour en déduire, comme il a été dit (154), la hauteur de la montagne elle-même. — On emploie, pour ces expériences, des thermomètres particuliers, dont le liquide ne commence à arriver dans la tige qu'à la température de  $80^{\circ}$  environ, et dont la tige est très capillaire, de façon qu'ils donnent avec une grande précision les températures comprises entre  $80^{\circ}$  et  $100^{\circ}$ .

plateau de la machine pneumatique, et on couvre le vase d'une cloche (fig. 229). On enlève progressivement l'air de la cloche, en faisant fonctionner la machine : il arrive au moment où, la pression qui s'exerce sur la surface libre du liquide étant suffisamment diminuée, on voit l'eau entrer en ébullition. — Si l'on cesse de faire fonctionner la machine, l'ébullition s'arrête, parce que la vapeur dégagée vient accroître la pression à l'intérieur de la cloche.

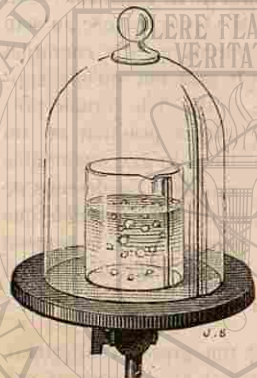


Fig. 229. — Ébullition de l'eau dans un espace raréfié.

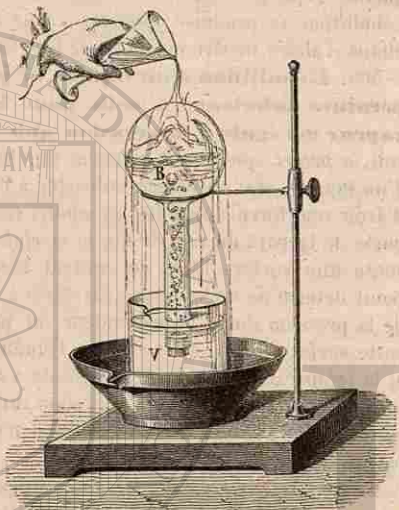


Fig. 250. — Expérience de Franklin.

Voici enfin une autre expérience, qui n'exige pas l'emploi de la machine pneumatique, et qui est due à Franklin. — On met de l'eau dans un ballon de verre à long col; on place le ballon sur le feu, et on fait d'abord bouillir l'eau vivement, de manière que la vapeur chasse l'air qui surmonte le liquide. On retire alors le ballon du feu, on le ferme avec un bouchon, et, pour mieux empêcher l'air de rentrer par les petites ouvertures que le bouchon pourrait présenter, on retourne le ballon, et on plonge l'extrémité du col dans un vase plein d'eau (fig. 250). — Au moment où l'on a retiré le ballon du feu, l'eau a cessé de bouillir. Mais, si l'on verse de l'eau froide sur la partie supérieure du ballon, de manière à condenser en partie la vapeur d'eau qui s'y trouve, et à diminuer ainsi la pression intérieure, on voit se former dans le liquide de grosses bulles de vapeur, qui se dégagent en soulevant toute la masse.

Au contraire, quand on chauffe de l'eau dans un vase clos, et qu'on laisse s'accumuler la vapeur qui se forme lentement à la surface du

liquide, l'ébullition ne peut pas se produire, quoique la température s'élève bien au-dessus de 100°. — C'est ce que nous allons constater au moyen de la *marmite de Papin*.

508. **Marmite de Papin.** — La marmite de Papin se compose d'une petite chaudière cylindrique de bronze, à parois très résistantes (fig. 251), dans laquelle on introduit de l'eau, et que l'on ferme au moyen d'un couvercle solidement fixé par la vis V. Ce couvercle est muni d'une *soupape de sûreté*, consistant en une petite ouverture s, sur laquelle s'appuie un levier L, maintenu à l'une de ses extrémités et chargé à l'autre d'un poids P; ce poids est réglé de façon que le levier puisse se soulever de lui-même et laisser échapper la vapeur, si la pression atteignait une dizaine d'atmosphères.

Lorsqu'on chauffe l'eau dans l'appareil clos, la vapeur qui se forme progressivement à la surface exerce, à chaque instant, une pression supérieure à la force élastique des bulles qui tendraient à se former au sein du liquide, et l'ébullition est impossible. — L'ébullition se produit brusquement dès qu'on ouvre la soupape; la vapeur s'échappe et il se produit une ébullition tumultueuse.

509. **Vaporisation totale.** — Si l'on chauffe de l'eau, ou tout autre liquide, dans un récipient clos, à chaque instant la force élastique de la vapeur est égale à la tension maxima correspondante à la température actuelle; elle augmente donc de plus en plus rapidement à mesure que la température s'élève (289) : on peut se demander si, la force élastique augmentant au delà de toute limite, la rupture du récipient ne doit pas nécessairement se produire. — Les expériences de Cagniard de Latour établissent que, si l'on élève successivement la température d'un liquide dans un tube fermé, très résistant, il arrive un moment où ce liquide tout entier se réduit en vapeur, mais sans entrer en ébullition. Ce phénomène de *vaporisation totale* peut se produire même dans un tube dont la capacité ne serait que deux ou trois fois égale au volume initial du liquide. Une fois le liquide totalement vaporisé,

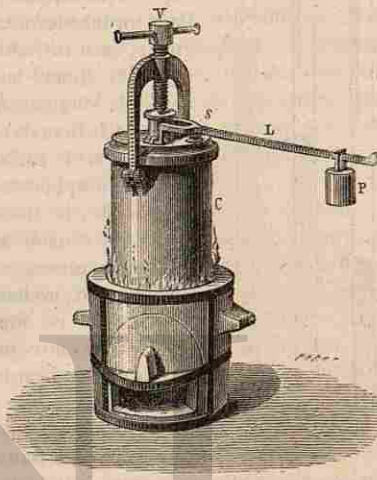


Fig. 251. — Marmite de Papin.



sa force élastique n'augmente plus que très lentement quand la température s'élève. — D'après Cagniard de Latour, la *température de vaporisation totale* est 415° pour l'eau, 259° pour l'alcool, 201° pour l'éther. — D'après les expériences de Drion, l'éther chlorhydrique éprouve la vaporisation totale à 184°; l'acide sulfureux, à 157.°



Fig. 252.

Une expérience facile à réaliser montre que l'acide carbonique liquide se vaporise totalement à 31°. — Dans un tube fermé, d'environ 30 centimètres de longueur, on a introduit de l'acide carbonique liquide (fig. 252). Quand le tube est entouré de glace fondante, la longueur AB de la colonne liquide est, par exemple, le tiers de celle du tube; le reste du tube est rempli d'acide carbonique gazeux, sous la pression de 30 atmosphères. On place le tube dans un bain d'eau à 20°, le niveau se déplace de B en C; la dilatation est considérable (252); la force élastique de la vapeur émise par le liquide est devenue 60 atmosphères. On réchauffe progressivement l'eau du bain jusqu'à ce que la température devienne 50°; le niveau s'élève jusqu'au point D; le volume du liquide est environ le triple de ce qu'il était à 0°, et la force élastique du gaz est devenue environ 75 atmosphères. — A ce moment, la surface de séparation du liquide et du gaz est encore très nette; mais si on ajoute une petite quantité d'eau chaude, lorsque le thermomètre placé dans le bain marque 51°, on voit la surface de séparation devenir nuageuse, puis disparaître; la masse d'acide carbonique remplit complètement le récipient comme le ferait un gaz; il y a eu *vaporisation totale*.

**310. Difficultés de l'ébullition dans une masse liquide entièrement privée de gaz.** — M. Donny prend un tube de verre plusieurs fois recourbé, comme l'indique la figure 253; après l'avoir nettoyé intérieurement avec le plus grand soin, par des lavages successifs à l'alcool, à l'éther, et à l'acide sulfurique concentré, il y introduit de l'eau distillée; puis, redressant l'appareil, la pointe *m*

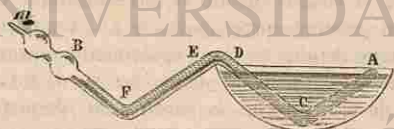


Fig. 253. — Expérience de M. Donny.

en haut, il fait bouillir longtemps, de manière à chasser l'air du tube, comme dans la construction du marteau d'eau (44); il ferme la pointe, pendant que la vapeur se dégage, et enfin il laisse refroidir le tube. Grâce à ces précautions, l'eau arrive à être en contact intime avec la paroi de verre, sans interposition de bulles d'air; l'air qui pouvait être

en dissolution dans l'eau a été également chassé par l'ébullition. — L'appareil étant ainsi préparé, on plonge la courbure ACD dans un bain de chlorure de calcium, dont on élève graduellement la température. Il semble que l'ébullition de l'eau du tube doive se produire à une température très basse, comme dans l'expérience de Franklin (fig. 250), puisque la surface libre n'est soumise qu'à la pression de la vapeur d'eau, qui est ici très faible; cependant, on peut amener la température de la partie chauffée jusque vers 135° sans qu'il y ait ébullition. Mais, quand on atteint cette haute température, on observe, en général, qu'il se produit tout à coup, en l'un des points du liquide, une bulle volumineuse de vapeur, soulevant toute la colonne et la projetant dans les boules, qui sont séparées par des étranglements destinés à amortir le choc. — Le même phénomène se reproduit, à des intervalles de quelques secondes, avec les mêmes caractères.

Cette expérience montre donc que, si un liquide ne contient, ni dans sa masse, ni sur son contour, *aucun gaz* interposé, il ne suffit pas, pour qu'il y ait ébullition, que sa température atteigne la valeur pour laquelle la tension de la vapeur serait égale à la pression exercée sur le liquide (\*).

M. L. Dufour est arrivé à la même conclusion, par un procédé semblable à celui qu'il avait employé pour produire la surfusion (269). — En introduisant des gouttes d'eau au sein d'un mélange d'huile de lin et d'essence de girofle, on obtient de petites sphères d'eau qui se tiennent en équilibre au milieu du liquide qui les environne, sans se mélanger avec lui. On constate qu'on peut élever leur température jusqu'à 178°, sans qu'il y ait ébullition. — Mais si l'on vient à toucher l'une de ces gouttes d'eau avec une baguette de verre ou de bois, l'ébullition s'y produit avec une extrême vivacité, et la goutte est projetée à une grande distance du corps solide. C'est là un fait dont nous donnerons l'explication un peu plus loin (312).

**311. Influence de la présence d'un gaz, au sein d'une masse liquide, pour déterminer l'ébullition.** — **Expériences de M. Dufour et de M. Gernez.** — Lorsqu'un liquide est parvenu à une température égale ou supérieure à celle qui donne à sa vapeur une tension égale à la pression extérieure, la présence d'un gaz, en un point de la masse liquide, *détermine l'ébullition* en ce point.

C'est ce qu'a montré d'abord une expérience de M. Dufour. — Une cornue (fig. 254), bien lavée à l'acide sulfurique et contenant de l'eau, est mise en communication avec un ballon B, qui communique lui-

(\*) Dans l'expérience que l'on vient de décrire, la tension de la vapeur correspondante à la température de 135° est d'environ 2500 millimètres, tandis que la surface du liquide supporte une pression de 15 à 20 millimètres; la tension de la vapeur est donc plus de cent fois égale à celle qui serait rigoureusement nécessaire pour que ce dégagement eût lieu.

même avec un manomètre barométrique M, comme celui de la figure 157, et avec une machine pneumatique, par l'intermédiaire du tube T. La cornue porte une large tubulure, dans laquelle sont assujettis : 1° un tube de dégagement muni d'un robinet *r*; 2° un thermomètre *a*, donnant la température du liquide; 3° deux fils de platine, *f*, *f'*, qui



Fig. 254. — Expérience de M. Dufour

plongent dans le liquide. On fait bouillir d'abord, pendant un certain temps, l'eau de la cornue, de manière à en dégager l'air dissous, ou adhérent aux parois : pendant cette ébullition, le robinet *r* est ouvert, pour servir au dégagement de la vapeur; on ferme ensuite *r*, et on laisse refroidir. — Alors, on ouvre les robinets *S* et *t*, et l'on fait fonctionner la machine pneumatique, de manière à établir dans l'appareil une pression beaucoup moindre qu'une atmosphère, pression que l'on mesure avec le manomètre M; en même temps, on règle la marche du fourneau à gaz F, de manière à élever progressivement la température. On constate que l'on peut, sans obtenir l'ébullition, amener et maintenir l'eau à une température très supérieure à celle où la tension de la vapeur serait égale à la pression intérieure. — Mais, l'expérience étant ainsi préparée, si l'on met les fils *f* et *f'* en communication avec les pôles d'une pile électrique, de manière à déterminer un dégagement gazeux à leur surface, l'ébullition se produit avec une vivacité telle, qu'une partie du liquide est ordinairement projetée dans le ballon B.

Voici une autre expérience, tout aussi démonstrative, qui a été imaginée par M. Gernez : elle a l'avantage de pouvoir être facilement répétée. — Un large tube de verre A (fig. 255), nettoyé préalablement à la potasse ou à l'acide sulfurique, et passé ensuite à l'eau bouillante, contient en B du sulfure de carbone, qui a été privé d'air, et que l'on couvre d'une couche d'eau C : il est placé dans un bain d'eau

qui est contenu dans un grand ballon de verre, et dont un thermomètre T donne la température. C'est vers 48° que la tension de la vapeur de sulfure de carbone deviendrait égale à la pression atmosphérique : cependant on constate que l'on peut chauffer le ballon jusqu'à 60°, sans que l'ébullition du sulfure de carbone se produise.

— On laisse alors tomber, par l'extrémité ouverte du tube A, une sorte de petite cloche de verre *v*, formée par un bout de tube qu'on a effilé à l'une de ses extrémités : dès que cette petite cloche, arrivant dans le sulfure de carbone, apporte au milieu de la masse l'atmosphère d'air qu'elle contient, il se produit une ébullition tumultueuse. L'expérience offre ceci de frappant, que la cloche, soulevée par la vapeur de sulfure de carbone, remonte dans la couche d'eau, et l'ébullition s'arrête : l'ébullition recommence dès que la cloche retombe, et ainsi de suite.

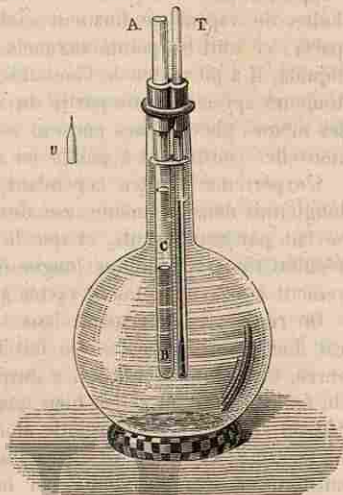


Fig. 255. — Expérience de M. Gernez.

512. **Conséquences des faits qui précèdent, concernant les conditions du phénomène de l'ébullition.** — En résumé, les expériences précédentes nous ont montré successivement : 1° que, pour qu'un liquide entre en ébullition, il faut, avant tout, que la température soit suffisante pour donner à la vapeur une tension au moins égale à celle que supporte le liquide; 2° que cette condition *nécessaire* n'est pas toujours *suffisante*; 3° que, si cette condition est remplie, la présence d'une masse gazeuse plus ou moins considérable, au sein même du liquide, détermine l'ébullition.

On doit donc considérer les bulles gazeuses, introduites dans une masse liquide, comme constituant une sorte d'*atmosphère intérieure*, dans laquelle la valeur peut se répandre, et sans laquelle elle se produit très difficilement. Si la température est suffisante, chacune des bulles augmente progressivement de volume, par l'addition incessante d'une nouvelle quantité de vapeur : il arrive un moment où une partie de la bulle se détache, pour venir crever à la surface du liquide.

Lorsqu'on fait bouillir de l'eau, par exemple, dans un vase quelconque, les bulles d'air qui sont restées interposées entre les parois du vase et le liquide suffisent pour permettre le dégagement de la vapeur, dès que la température est assez élevée. Dans la plupart des

cas, l'ébullition commence donc à une température qui est presque exactement celle où la tension de la vapeur devient égale à la pression supportée par le liquide. — L'observation montre d'ailleurs que les bulles de vapeur se forment exclusivement en *certaines points* de la paroi : ce sont les points auxquels, la paroi n'étant pas mouillée par le liquide, il a pu rester de l'air attaché. — Le départ d'une bulle laissant toujours après elle une partie du mélange gazeux adhérent à la paroi, les mêmes phénomènes peuvent continuer à se produire, et les bulles nouvelles continuent à partir des mêmes points (\*).

L'expérience montre cependant que l'ébullition, lorsqu'elle a duré longtemps dans un même vase, devient de plus en plus difficile; qu'elle se fait par soubresauts, et que la température du liquide s'élève. Ce résultat tient à ce qu'une longue ébullition finit par chasser successivement les gaz qui étaient restés adhérents à la paroi.

On répète ordinairement dans les Cours l'expérience suivante, qui est due à Gay-Lussac. — On fait bouillir de l'eau dans un ballon de verre, et, quand l'ébullition a duré quelque temps, on retire le ballon du feu : l'ébullition cesse, bien que la température soit en général de 101 ou 102 degrés. On projette alors dans cette eau un peu de limaille de fer, et l'on voit un vif dégagement de bulles se produire; c'est l'air entraîné au sein du liquide, par la limaille elle-même, qui détermine la formation de la vapeur, la température ayant encore une valeur suffisante pour que la vapeur puisse se produire.

On conçoit aussi l'influence que doit avoir, dans les expériences de

(\*) Une expérience de M. Gernez montre combien est petite la quantité d'air intérieur qui est suffisante pour déterminer l'ébullition. Un ballon de verre à long col (fig. 236), préalablement lavé à l'acide sulfurique, contient de l'eau qu'on y a fait bouillir longtemps pour chasser toute trace d'air. On introduit dans cette eau une

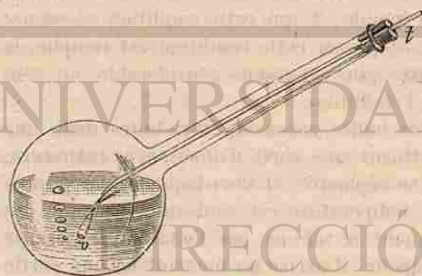


Fig. 236.

petite cloche de verre *v*, formée par l'extrémité d'un tube *t*, qu'on a étranglée à la lampe. — Lorsqu'on chauffe le ballon, on voit les bulles de vapeur se former exclusivement à l'orifice de la petite cloche *v*, et cela pendant un temps à peu près indéfini. Or, chacune de ces bulles entraîne avec elle une petite quantité d'air, et cependant M. Gernez a constaté qu'une bulle d'air, primitivement grosse comme une tête d'épingle, avait pu déterminer l'ébullition pendant vingt-quatre heures (l'eau vaporisée, se condensant sur les parois inclinées, retombait à la partie inférieure, ce qui permettait de prolonger l'expérience sans ajouter de l'eau). En comptant le nombre des bulles dégagées pendant quelques minutes, M. Gernez a évalué à plus d'un demi-million le nombre de celles qui s'étaient formées aux dépens de cette petite quantité d'air, pendant toute la durée de l'expérience.

M. Dufour (310), le contact d'une baguette de verre avec les petites sphères liquides portées à une haute température : le verre apporte une certaine quantité d'air qui lui est restée adhérente, et qui fournit à la vapeur l'atmosphère gazeuse favorable à sa formation.

Enfin, dans la distillation de l'acide sulfurique, on évite les soubresauts qui rendent cette opération difficile dans des vases de verre, en plaçant dans l'acide, comme l'a indiqué M. Raoult, quelques fragments de *charbon de cornue*; les rugosités que ce corps présente, et qui retiennent des bulles d'air au milieu du liquide, facilitent la production des bulles de vapeur, dès le commencement de l'opération.

313. **Ébullition des solutions salines.** — La présence de matières salines en dissolution dans un liquide donne lieu, en général, à une élévation de la température d'ébullition, d'autant plus considérable que la quantité de sel dissoute est plus grande.

Le tableau suivant indique les températures d'ébullition, sous la pression atmosphérique, pour quelques solutions de sels dans l'eau, chacune de ces solutions étant supposée saturée (les nombres de ce tableau correspondent donc à des quantités différentes des divers sels).

POINTS D'ÉBULLITION DE QUELQUES SOLUTIONS SATURÉES

|                             | POINTS D'ÉBULLITION. |                               | POINTS D'ÉBULLITION |
|-----------------------------|----------------------|-------------------------------|---------------------|
| Carbonate de soude. . . . . | 104°,6               | Nitrate de soude. . . . .     | 121°,0              |
| Chlorure de sodium. . . . . | 108°,4               | Carbonate de potasse. . . . . | 155°,0              |
| Sel ammoniac. . . . .       | 114°,2               | Nitrate de chaux. . . . .     | 181°,0              |
| Nitrate de potasse. . . . . | 115°,9               | Chlorure de calcium. . . . .  | 179°,5              |

Ces températures sont celles que marqueraient des thermomètres immergés dans les solutions au moment de l'ébullition; dans tous les cas la vapeur d'eau qui se dégage est à 100°.

#### 314. Détermination expérimentale du point d'ébullition normal d'un liquide.

D'après tout ce qui précède, il faut entendre par *point d'ébullition* d'un liquide, sous une pression déterminée, la température minima à laquelle ce liquide, supposé pur, puisse bouillir sous cette pression. — Nous désignerons, en particulier, par *point d'ébullition normal*, la température minima à laquelle l'ébullition puisse avoir lieu sous la pression normale, c'est-à-dire sous une pression représentée par 76 centimètres de mercure.

Or, si l'on cherchait à déterminer cette température en plaçant un thermomètre dans le liquide lui-même, on aurait toujours à craindre l'influence, soit l'une

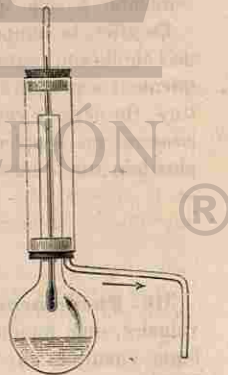


Fig. 237.

expulsion plus ou moins complète des gaz, soit de la présence d'un sel en dissolution. — Mais l'expérience a montré que, quelle que soit l'influence de ces causes sur l'ébullition, un thermomètre placé *dans la vapeur elle-même, à une petite distance de la surface du liquide*, indique une température constante, sous une pression déterminée. — C'est donc dans ces conditions qu'on doit se placer pour déterminer le point d'ébullition normal d'un liquide.

La disposition indiquée par M. Berthelot (fig. 257) est particulièrement commode pour déterminer le point d'ébullition normal d'un liquide, lors même que celui-ci contiendrait quelque substance solide en dissolution. La vapeur monte dans le col du ballon, et redescend autour du col; le thermomètre est donc préservé de tout refroidissement. On note la température stationnaire au moment de l'ébullition.

Le tableau suivant donne les points d'ébullition normaux de quelques liquides, sous la pression de 76 centimètres.

| POINTS D'ÉBULLITION NORMAUX. |      | POINTS D'ÉBULLITION NORMAUX. |      |
|------------------------------|------|------------------------------|------|
| Acide nitrique monohydraté.  | 86°  | Eau.                         | 100° |
| — nitrique ordinaire.        | 125  | Essence de térébenthine.     | 161  |
| — sulfureux.                 | 8    | Éther chlorhydrique.         | 41   |
| — sulfurique.                | 329  | — nitreux.                   | 21   |
| Alcool absolu.               | 78,5 | — sulfurique.                | 35,5 |
| — méthylique (esp. de bois). | 66   | Mercure.                     | 560  |
| Benzine.                     | 80   | Soufre.                      | 440  |
| Chloroforme.                 | 65,5 | Sulfure de carbone.          | 48   |

515. **Chaleur de vaporisation.** — La constance de la température, pendant toute la durée de l'ébullition, conduit à une conclusion semblable à celle qui a été énoncée relativement à la fusion (266).

En effet, la température restant invariable pendant toute la durée de l'ébullition, toute la chaleur fournie par la source est employée uniquement à produire le changement d'état, sans élévation de température. On désigne cette chaleur sous le nom de *chaleur latente de vaporisation*, ou simplement *chaleur de vaporisation*. — Nous reviendrons plus loin sur la mesure de cette quantité de chaleur (562).

### III. — CALÉFACTION.

516. **Phénomènes de caléfaction.** — On sait, par une expérience vulgaire, que, lorsqu'on projette un peu d'eau sur une plaque métallique chauffée au rouge, on voit l'eau rouler à la surface de la plaque, en gouttes arrondies, et se convertir lentement en vapeur.

Chauffons, sur une bonne lampe à alcool ou sur un bec de gaz, une plaque métallique légèrement concave BB (fig. 258), et, quand elle sera

parvenue au rouge sombre, laissons-y tomber quelques gouttes d'eau. Nous verrons le liquide se rassembler en une petite masse arrondie, qui restera soumise à une agitation continuelle, mais *sans entrer en ébullition*: elle ne disparaîtra qu'au bout de quelques minutes, par une *évaporation successive*.

Ce phénomène, tout à fait anormal au premier abord, a été désigné sous le nom de *caléfaction*, avant qu'on se fût rendu un compte exact des circonstances dans lesquelles il se produit.

517. **Explication de la caléfaction.** — Le phénomène de la caléfaction se rattache aux lois générales de la formation des vapeurs.

Et d'abord, on peut constater que le liquide caléfié *ne touche pas* la surface chaude au-dessus de laquelle il se trouve. — En employant une capsule percée de trous assez grands pour laisser passer le liquide à froid, on observe que le liquide caléfié ne traverse pas ces ouvertures, ce qui prouve qu'il ne touche pas la capsule. — En produisant la caléfaction de l'eau sur une plaque métallique bien plane, et disposant en arrière la flamme d'une bougie, on aperçoit la lumière entre le globule d'eau et la plaque (\*).

En second lieu, la température du liquide caléfié reste *inférieure à sa température d'ébullition*. — C'est ce que M. Boutan a constaté directement, pour l'eau, en y introduisant un petit thermomètre: la température reste toujours inférieure à 100° (\*\*).

Ces deux points étant établis, voici comment on peut expliquer le phénomène de la caléfaction. La surface solide étant à une température où la vapeur du liquide possède une tension considérable, il se forme, entre cette surface et le liquide, une couche de vapeur qui

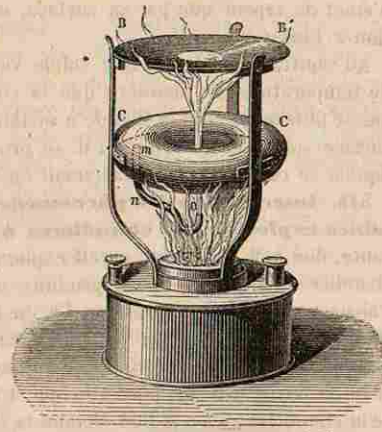


Fig. 258. — Caléfaction.

(\*) Lorsque le doigt est mouillé avec de l'alcool ou de l'éther, on peut le tremper dans une masse de plomb fondu, sans éprouver autre chose qu'une sensation de fraîcheur; on peut même, avec la main humide, couper impunément un jet de fonte en fusion, à sa sortie d'un haut fourneau.

(\*\*) On fait encore, dans les Cours, l'expérience suivante, dont le résultat est saisissant. — Dans un creuset d'argent, chauffé au rouge, on verse de l'acide sulfureux liquide, dont le point d'ébullition est à  $-8^{\circ}$ : le liquide se caléfié; si alors on verse dans le creuset une petite couche d'eau, elle se transforme immédiatement en glace; au contact de l'acide sulfureux, dont la température est restée inférieure à  $-8^{\circ}$ .

maintient entre eux une distance sensible. Dès lors, le liquide ne reçoit pas directement de chaleur de la paroi solide : il s'échauffe beaucoup moins vite que s'il y avait contact; en outre, le liquide n'émet de vapeur que par sa surface, sans qu'il puisse y avoir ébullition à l'intérieur.

Au contraire, si la surface solide vient à éprouver un abaissement de température, de manière que la couche de vapeur interposée ne puisse plus maintenir le liquide à distance, le contact s'établit entre la surface solide et le liquide : il se produit une vive ébullition, et le liquide se convertit instantanément en vapeur.

518. **Intervention des phénomènes de calcification, dans certaines explosions de chaudières à vapeur.** — L'expérience suivante, due à M. Boutigny, paraît expliquer comment l'explosion d'une chaudière à vapeur peut se produire au moment où sa température s'abaisse, ainsi que la pratique l'a quelquefois montré. — Une petite chaudière de cuivre A (fig. 259) est chauffée jusqu'à une température voisine du rouge, au moyen d'une lampe L : on y projette un peu d'eau, et on la ferme avec un bon bouchon. L'eau se calcifie d'abord au fond de la chaudière; mais si l'on éloigne la chaudière de la flamme, comme

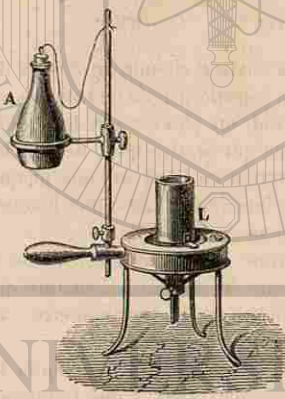


Fig. 259.

le représente la figure, il arrive un moment où le liquide se réduit brusquement en vapeur : le bouchon est alors violemment projeté.

Or, dans les chaudières qu'on alimente avec des eaux chargées de sels calcaires, il se forme souvent des dépôts assez épais, et peu conducteurs de la chaleur; les parois métalliques, chauffées directement par le fourneau, peuvent alors arriver à la température rouge. Si maintenant le dépôt calcaire vient à se détacher en certains points, l'eau, en rencontrant les parois incandescentes, doit éprouver d'abord la calcification; puis, quand plus tard la

(\*) Il est probable qu'une cause bien plus fréquente encore de l'explosion des chaudières à vapeur est la suivante. — Lorsque le travail d'une machine à vapeur est interrompu pendant quelque temps, on n'éteint généralement pas pour cela le feu; la machine étant alors au repos, la pompe alimentaire cesse d'introduire dans la chaudière de nouvelles quantités d'eau, en sorte que l'eau qu'elle renferme peut arriver à un état de *surchauffe* par la perte du gaz qu'elle contenait. Au moment de la reprise du travail, l'arrivée de l'eau d'alimentation, qui est aérée, peut déterminer une ébullition tumultueuse et une explosion.

## IV. — LIQUÉFACTION DES VAPEURS ET DES GAZ.

519. **Liquéfaction des vapeurs. — Distillation.** — On réserve ordinairement le nom de *vapeurs* aux fluides élastiques provenant de la vaporisation des substances qui sont liquides aux températures ordinaires. Il suffit, pour condenser ces vapeurs, de les faire rendre dans des appareils environnés d'eau froide. — C'est sur ce principe qu'est fondée la *distillation*, qui sert à séparer les liquides volatils des matières étrangères avec lesquelles ils étaient mélangés.

L'appareil qui sert à la distillation de l'eau dans les laboratoires

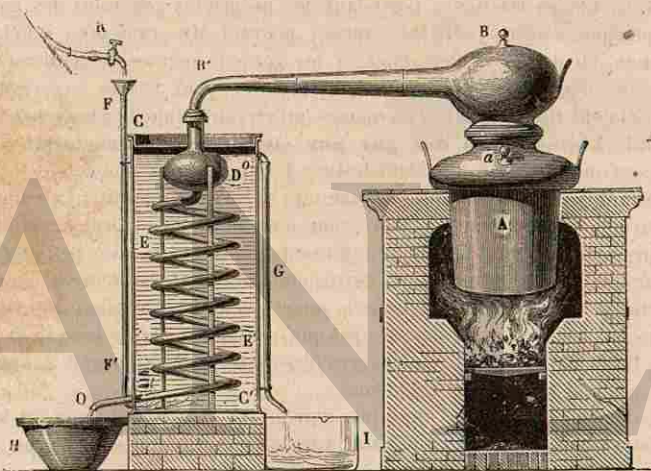


Fig. 240. — Alambic.

(fig. 240) porte le nom d'*alambic*. Il se compose : 1° d'une *chaudière* A, dans laquelle on introduit de l'eau qu'on fera bouillir sur un fourneau; 2° d'un réservoir C appelé *condenseur*, qui contient de l'eau froide, et au milieu duquel se trouve un tube EE, enroulé en spirale, qu'on nomme le *serpentin*. La vapeur d'eau, arrivant de la chaudière dans le serpentin, se condense au contact des parois froides de ce tube; l'eau provenant de cette condensation s'écoule par l'extrémité O. — Pendant l'opération, l'eau qui entoure le serpentin s'échauffe rapidement, parce que la vapeur, en se condensant, abandonne sa chaleur de vaporisation : il est donc nécessaire de renouveler sans cesse l'eau froide que contient le condenseur. Pour cela, on adapte, sur le côté, un tube à entonnoir FF, qui amène continuellement au fond du réservoir l'eau

froide fournie par un robinet R; à mesure que cette eau s'échauffe, elle gagne la partie supérieure du réservoir et s'écoule par le tube G.

Les eaux de source ou de rivière, que l'on introduit dans la chaudière de l'alambic, contiennent toujours en dissolution diverses matières étrangères; la vapeur qui s'en dégage est formée d'eau pure. — On doit constater qu'une goutte d'eau distillée ne laisse aucun résidu, quand on vient à l'évaporer sur une lame de platine.

520. **Liquéfaction des gaz.** — On réserve généralement le nom de gaz aux corps qui se présentent sous la forme de fluides élastiques, dans les conditions ordinaires de température et de pression. Tels sont, l'oxygène, l'hydrogène, l'acide sulfureux, l'acide carbonique, etc. — Or, puisque les liquides peuvent se transformer en vapeurs, c'est-à-dire en fluides élastiques possédant les propriétés générales des gaz, et puisque, d'autre part, les vapeurs peuvent être ramenées à l'état liquide, on devait se demander si les gaz eux-mêmes ne pourraient pas être liquéfiés. — Les procédés à employer, pour arriver à ce résultat, étaient indiqués par ceux mêmes qui servent à liquéfier les vapeurs.

521. **Liquéfaction des gaz par simple refroidissement.** — Lorsqu'une vapeur, à une température T et à une pression P, n'est pas saturante, c'est que sa tension maximum F, correspondante à la température T, est supérieure à la pression actuelle P. Mais si, sans changer la pression, on refroidit la vapeur à une température t, assez peu élevée pour que la tension maximum correspondante f soit inférieure à P, une partie de cette vapeur se liquéfiera, jusqu'à ce que la pression devienne égale à f. — On pouvait donc penser que, en faisant passer les gaz dans des tubes environnés de mélanges réfrigérants, on parviendrait à liquéfier au moins certains d'entre eux.

Le premier gaz qui ait été ainsi liquéfié est l'acide sulfureux; il fut obtenu liquide par Monge et Clouet, vers la fin du dix-huitième siècle. — Dans les laboratoires, on fait passer d'abord l'acide sulfureux, au sortir du ballon où il se produit, dans une éprouvette entourée de glace pour condenser l'eau entraînée; puis, dans un tube renfermant du chlorure de calcium, qui achève de dessécher le gaz, et enfin dans un petit ballon entouré d'un mélange de glace et de sel marin. A la température de  $-8^{\circ}$ , le gaz se liquéfie sous la pression atmosphérique.

Le même procédé a été appliqué, par Guyton de Morveau, à la liquéfaction du gaz ammoniac; mais il faut alors un mélange réfrigérant formé de neige et de chlorure de calcium.

522. **Liquéfaction des gaz par simple compression.** — L'expérience que nous avons effectuée à l'aide du baromètre à cuvette profonde (282) montre encore que si une vapeur, comme la vapeur d'éther, est introduite dans un espace limité, alors même qu'elle ne serait pas saturante, on peut, en réduisant progressivement l'espace qu'elle occupe, l'amener d'abord à devenir saturante, et ensuite en

liquéfier une portion de plus en plus grande, en continuant à diminuer l'espace qui lui était réservé. — On pouvait penser que, en réduisant l'espace occupé par une masse gazeuse, ou, ce qui revient au même, en faisant pénétrer dans un espace clos une masse de gaz de plus en plus grande, de manière à augmenter progressivement la pression, on parviendrait à produire la liquéfaction.

En 1824, Davy et Faraday eurent recours, pour la première fois, à la compression. Le procédé appliqué par eux est le suivant. — Dans l'une des branches d'un tube de verre très résistant (fig. 241), celle de droite par exemple, on a préalablement introduit les matières destinées à produire le gaz, puis on a fermé à la lampe l'autre extrémité. On chauffe les matières contenues dans cette branche; le gaz, se dégageant alors dans un espace limité, acquiert bientôt la tension qui correspond à la saturation de cet espace; à partir de ce moment, la liquéfaction commence. Si l'on plonge la branche de gauche dans la glace, le liquide volatil distille de la partie la plus chaude vers la plus froide, et vient s'y rassembler rapidement. — C'est la méthode de liquéfaction que l'on indique, dans les Cours de chimie, pour le cyanogène, le chlore, l'acide sulfhydrique, etc. (\*)

En partant du même principe, Thilorier construisit, en 1854, un appareil qui permet d'obtenir plusieurs litres d'acide carbonique à l'état liquide.

La pompe de M. Cailletet (fig. 242) peut servir à réaliser très-facilement la liquéfaction de l'acide carbonique, du protoxyde d'azote, et de quelques autres gaz, à des températures voisines de la température ordinaire, et sous des pressions qui ne dépassent pas 50 atmosphères. Dans le corps de pompe B, glisse un piston plongeur A surmonté d'une petite quantité de mercure; le gaz est admis dans ce corps de pompe par l'orifice O, non plus par une soupape, mais par un robinet R, ouvert et fermé alternativement par des comes reliées au volant de la machine. Le gaz comprimé au-dessus du piston soulève à la partie su-



Fig. 241. — Liquéfaction du gaz ammoniac.

(\*) M. Melsens a utilisé, dans le même appareil, la propriété que possède le charbon d'absorber les gaz à la température ordinaire, et de les dégager par une élévation de température. — On peut également liquéfier l'ammoniaque en la faisant absorber par du chlorure d'argent ou du chlorure de calcium, que l'on place dans la branche de droite. — Dans ces expériences, une fois la liquéfaction obtenue, il suffit de retirer l'appareil du bain-marie, pour que le gaz liquéfié entre en ébullition et soit absorbé de nouveau dans l'autre branche. L'appareil peut donc servir indéfiniment pour répéter la même opération.

périeure une soupape d'ébonite, et se rend par le tube T dans un récipient refroidi P. — L'introduction du mercure dans la pompe présente le double avantage de supprimer l'espace nuisible, et de répartir entre

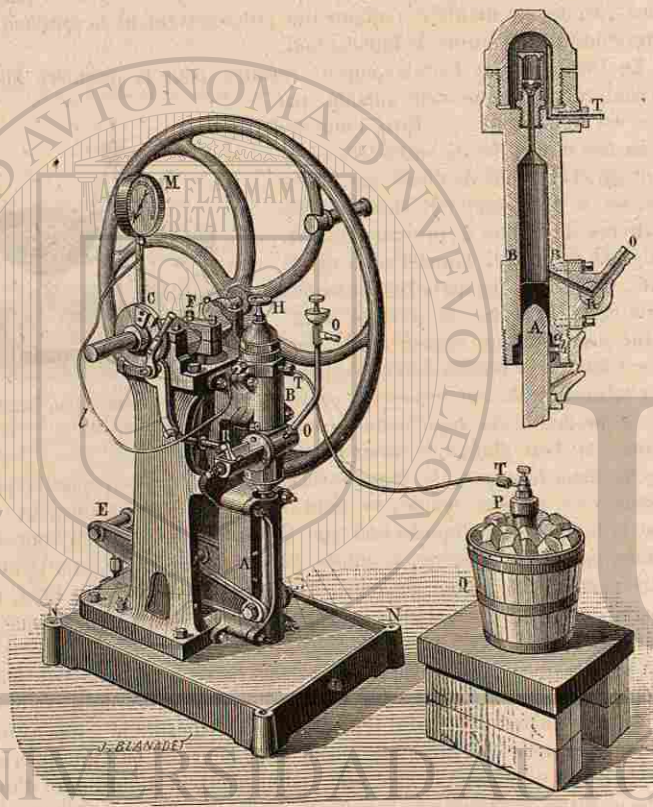


Fig. 242. — Pompe de M. Cailletet, pour la liquéfaction des gaz.

les différentes pièces, par le déplacement du mercure, l'échauffement qui est dû à la compression; en fait, l'échauffement est insensible.

525. **Liquéfaction des gaz par compression et abaissement de température réunis.** — En combinant les deux procédés, c'est-à-dire en opérant à la fois par abaissement de température et par compression, on devait espérer liquéfier des gaz qui avaient résisté à chacun des deux procédés employés séparément.

En 1845, Faraday employa, comme mélange réfrigérant, une pâte formée d'acide carbonique et d'éther : il put ainsi refroidir, à une température inférieure à  $-100^{\circ}$ , les tubes dans lesquels il comprimait les gaz, à l'aide de pompes foulantes, jusque vers 50 atmosphères. — Il parvint ainsi à obtenir, à l'état liquide, l'éthylène, l'hydrogène phosphoré, qui n'avaient pas encore été liquéfiés.

524. **Température critique.** — **Liquéfaction des gaz réputés permanents.** — Jusqu'à la fin de l'année 1877, six gaz avaient résisté à toutes les tentatives faites pour les liquéfier, savoir : l'hydrogène, l'oxygène, l'azote, le bioxyde d'azote, l'oxyde de carbone, et le gaz des marais (protocarbure d'hydrogène); ils avaient encore conservé l'état gazeux, lorsqu'on les avait soumis à des pressions d'environ 3000 atmosphères, comme l'avait fait Natterer. — Ces gaz avaient reçu le nom de *gaz permanents*.

Un principe nouveau, énoncé et démontré par le physicien écossais Andrews, vint indiquer de quelle façon on devait modifier les procédés employés, pour arriver à liquéfier ces gaz. — Les expériences de Cagniard de Latour, déjà anciennes, et auxquelles on n'avait pas attaché assez d'importance, avaient démontré que l'éther, par exemple, se vaporise totalement, sans augmenter de volume, à la température de  $201^{\circ}$ ; cette substance ne peut donc exister à l'état liquide si la température surpasse la *température de vaporisation totale*. La vapeur d'éther, à une telle température, n'est donc pas liquéfiable par simple compression : pour la liquéfier, il faudrait d'abord la refroidir au-dessous de  $201^{\circ}$ , puis la comprimer. — D'une manière générale, les expériences de Cagniard de Latour faisaient pressentir qu'il existe pour chaque vapeur, et par conséquent pour chaque gaz, une température particulière, au-dessus de laquelle la liquéfaction est impossible, quelle que soit la pression exercée. Cette température, qui n'est autre que la température de vaporisation totale de la substance à l'état liquide, a été appelée *température critique* ou *point critique* du gaz.

Andrews, en opérant sur l'acide carbonique, démontra expérimentalement ce principe, qui est une conséquence nécessaire des expériences de Cagniard de Latour. Une masse déterminée d'acide carbonique était comprimée à une température maintenue constante; on mesurait les volumes décroissants, occupés par cette masse, sous des pressions croissantes. Quand la température  $t$  était inférieure à  $31^{\circ}$ , la masse gazeuse se laissait comprimer plus que ne l'indique la loi de Mariotte (159), et sous une certaine pression P, une partie du gaz se liquéfiait. Cette pression, qu'il fallait atteindre pour liquéfier le gaz, était d'autant plus grande que la température de l'expérience était plus élevée, tout en restant au-dessous de  $31^{\circ}$ . — Quand on opérait à la température de  $31^{\circ}$ , on observait que le volume diminuait bien plus rapidement que ne l'indique la loi de Mariotte, comme pour préparer

la liquéfaction; mais, à partir d'une pression de 80 atmosphères environ, le volume ne diminuait plus sensiblement et la liquéfaction n'avait pas encore lieu, même sous des pressions extrêmement élevées. — Enfin aux températures notablement supérieures au point critique, on constata que, à partir d'une certaine pression, le gaz carbonique *résiste à la compression*; il se comporte comme l'azote, ou l'air, à la température ordinaire, et sous des pressions supérieures à 80 atmosphères (140).

Ce qu'il fallait donc, avant tout, pour liquéfier un des gaz réputés permanents, c'était un abaissement de température considérable; il fallait refroidir le gaz au-dessous de son point critique: les mélanges réfrigérants employés par Faraday étaient insuffisants.

**325. Expériences de M. Cailletet.** — Un artifice particulier, employé par M. Cailletet, permit d'arriver à ce résultat. Voici le principe de la méthode employée. — Si l'on prend un gaz fortement comprimé dans un espace clos, et si l'on augmente brusquement son volume, de manière à lui faire éprouver une diminution brusque de pression, cette *détente* a pour effet un abaissement de température. Le calcul montre que, si la température initiale est  $0^{\circ}$ , et si la pression initiale est voisine de 500 atmosphères, quand le gaz se détend jusqu'à ce que la pression ne soit plus qu'une atmosphère, la température doit s'abaisser jusqu'à  $-200^{\circ}$ . — C'est l'effet inverse de celui que nous avons constaté dans le briquet à air par la compression brusque. (Note de la page 20.)

C'est à ce procédé que M. Cailletet a eu recours pour faire apparaître à l'état liquide les gaz qu'on avait considérés jusque-là comme permanents. — Supposons qu'il s'agisse, par exemple, du bioxyde d'azote. On introduit le gaz dans un tube de verre à parois très résistantes TT, assujéti dans une cuvette de fonte B, au moyen d'un écrou de bronze A (fig. 245). La partie supérieure de l'éprouvette, très étroite, est contenue dans un manchon de verre M, où l'on peut placer soit de l'eau froide, soit un mélange réfrigérant. La cuvette B contient un bain de mercure; au moyen d'une presse hydraulique (non représentée sur la figure), on refoule de l'eau sur le mercure de la cuvette, de manière à réduire progressivement le volume occupé par le gaz dans le tube. Un manomètre adapté à la presse hydraulique fait connaître la pression que supporte le gaz. L'eau du manchon étant à  $8^{\circ}$ , on constate que le bioxyde d'azote ne se liquéfie pas, même sous une pression de plusieurs centaines d'atmosphères: le point critique de ce gaz est donc inférieur à  $8^{\circ}$ . — Ce gaz étant d'abord à  $8^{\circ}$ , et comprimé à environ 250 atmosphères, si l'on supprime brusquement la pression, de manière à produire une *détente*, le tube se remplit pendant quelques instants d'un brouillard, annonçant que la liquéfaction s'est produite. Ce résultat est dû au refroidissement considérable qui provient de la détente elle-même, et qui abaisse la température du gaz bien au-

dessous du point critique. De là, une méthode extrêmement élégante, qui a permis à M. Cailletet, en décembre 1877 et janvier 1878, de faire également apparaître à l'état liquide *tous les autres gaz réputés permanents*, l'oxygène, l'hydrogène, l'azote et le gaz des marais.

L'appareil de M. Cailletet peut d'ailleurs servir à répéter les expériences d'Andrews et parfois à déterminer le point critique avec exactitude. — Quand l'eau du manchon est portée au-dessus de  $51^{\circ}$ , il est impossible de liquéfier, *par compression*, l'acide carbonique renfermé dans le tube TT. Si on refroidit le bain un peu au-dessous de  $51^{\circ}$ , la compression poussée jusque vers 75 atmosphères entraîne la liquéfaction d'une partie du gaz. La température de  $51^{\circ}$  est donc la température critique de l'acide carbonique. — Parmi les gaz réputés permanents, il en est un, le bioxyde d'azote, dont le point critique est voisin de  $0^{\circ}$ . A la température de  $8^{\circ}$  la liquéfaction de ce gaz est impossible par la simple compression; mais si le manchon contient un mélange réfrigérant à  $-11^{\circ}$ , une pression d'une centaine d'atmosphères amène la liquéfaction. — Pour d'autres gaz réputés permanents: l'oxygène, l'hydrogène, l'azote, le point critique est au-dessous de  $-100^{\circ}$ . Si on veut, par la brusque détente, refroidir l'un de ces gaz bien au-dessous de cette température, il faudra détendre à partir d'une pression initiale de 600 atmosphères, et d'une température initiale inférieure à zéro; le manchon sera donc entouré de chlorure de méthyle, qui a l'avantage d'être transparent (505). — La cloche de verre C sert à dessécher l'air autour du manchon, et à éviter ainsi le dépôt de givre qui empêcherait de voir ce qui se passe dans le tube T.

**326. Expériences de M. R. Pictet.** — A la même époque, M. Pictet parvenait à liquéfier l'oxygène et l'hydrogène, par un procédé tout différent de celui de M. Cailletet.

L'oxygène, produit par la décomposition du chlorate de potasse dans un obus en fer forgé, se rendait dans un long tube de fer, entouré d'un

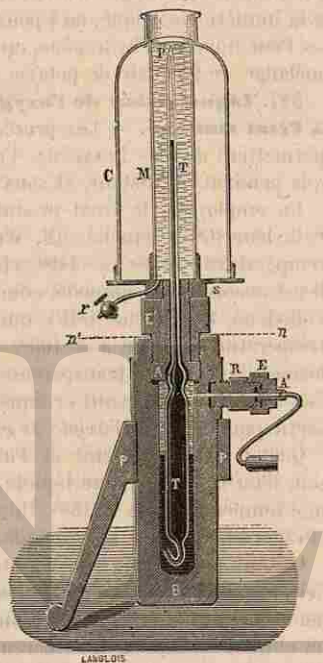


Fig. 245. — Appareil de M. Cailletet pour la liquéfaction des gaz par détente.



manchon rempli d'acide carbonique liquide dont on activait l'évaporation au moyen de pompes; la température descendait jusqu'à  $-140^{\circ}$ , température inférieure au point critique de l'oxygène. Dès que la pression atteignait une certaine valeur, l'oxygène commençait à se liquéfier. En ouvrant un robinet qui terminait le tube de fer, on voyait se produire un jet de gaz d'une extrême violence; et, en éclairant ce jet à la lumière électrique, on y pouvait distinguer des particules liquides. — Pour liquéfier l'hydrogène, on substituait au chlorate de potasse un mélange de formiate de potasse et d'hydrate de potasse.

**527. Liquéfaction de l'oxygène, de l'azote et de l'hydrogène, à l'état statique.** — Les procédés de M. Cailletet et de M. Pictet ne permettent de voir l'oxygène, l'azote ou l'hydrogène, à l'état liquide, que pendant un instant, et sous forme d'un brouillard.

En employant le froid produit par l'évaporation dans le vide de l'éthylène ( $C^2H^6$ ) liquéfié, MM. Wroblewski et Olzewski ont obtenu une température évaluée à  $-140^{\circ}$ , à laquelle l'oxygène comprimé se liquéfie. Il est encore plus commode, comme le fait M. Cailletet, de substituer à l'éthylène, le formène ( $C^3H^8$ ), qui en s'évaporant dans l'air donne une température évaluée à  $-160^{\circ}$ . — L'oxygène se présente alors sous forme d'un liquide transparent, moins dense que l'eau; il bout dans l'air à  $-186^{\circ}$ ; son point critique est  $-115^{\circ}$ . — Le même procédé peut servir pour liquéfier l'oxyde de carbone.

Quand on veut obtenir de l'azote liquide, on comprime ce gaz au sein d'un bain d'oxygène liquide en ébullition dans l'air, c'est-à-dire à une température de  $-186^{\circ}$ . On obtient un liquide incolore qui, par l'évaporation rapide dans le vide, abaisse la température à  $-215^{\circ}$ .

C'est au moyen d'un bain d'azote liquide à  $-215^{\circ}$ , que l'on peut liquéfier l'hydrogène. La compression seule ne suffit pas; mais si on laisse se détendre l'hydrogène qui a été comprimé à cette température de  $-215^{\circ}$ , on obtient un liquide transparent et incolore. Ce résultat est particulièrement remarquable pour l'hydrogène, que ses propriétés chimiques rapprochent des métaux, et qu'on aurait pu s'attendre à voir apparaître sous un aspect semblable à celui du mercure.

## CHAPITRE VIII

### HYGROMÉTRIE

**528. État hygrométrique, ou fraction de saturation.** — La présence de la vapeur d'eau dans l'atmosphère est démontrée, soit par la précipitation de cette vapeur à la surface des corps froids, sous la forme de rosée, soit par l'augmentation de poids qu'éprouvent dans l'air certaines substances, dites *substances déliquescentes*, telles que le chlorure de calcium ou le carbonate de potasse.

Lorsque la vapeur d'eau atmosphérique est voisine de son point de saturation, il suffit d'un faible abaissement de température pour en déterminer la précipitation partielle: on dit alors que l'air est *humide*.

— Quand la vapeur atmosphérique est éloignée de son point de saturation, il faut un abaissement considérable de température pour en opérer la condensation: on dit alors que l'air est *sec*.

Pour mieux fixer les idées à cet égard, supposons que, à un moment donné, la tension de la vapeur d'eau dans l'air soit  $12^{\text{mm}},5$ , la température étant  $15^{\circ}$ . Le tableau ci-après, montre que la tension maximum à  $15^{\circ}$  est  $12^{\text{mm}},7$ ; à  $14^{\circ}$ , elle serait  $11^{\text{mm}},9$ ; si donc la température venait à s'abaisser d'un degré seulement, c'est-à-dire de  $15^{\circ}$  à  $14^{\circ}$ , une portion de cette vapeur devrait se liquéfier: l'air est donc *très humide*. — Si, un autre jour, la tension de la vapeur dans l'atmosphère était encore  $12^{\text{mm}},5$ , mais que la température fût de  $20^{\circ}$ , la vapeur serait très éloignée de son point de saturation, puisque la température pourrait s'abaisser de 5 degrés sans qu'il y eût condensation: l'air serait donc *très sec*.

Le degré d'humidité de l'air dépend donc, non pas de la valeur absolue de la tension actuelle de la vapeur d'eau, mais du rapport qui existe entre la tension actuelle  $f$  et la tension maximum  $F$  à la même température. Ce rapport  $\frac{f}{F}$  est ce qu'on nomme *état hygrométrique* de l'air, ou *fraction de saturation*, au moment considéré. — Il résulte de

manchon rempli d'acide carbonique liquide dont on activait l'évaporation au moyen de pompes; la température descendait jusqu'à  $-140^{\circ}$ , température inférieure au point critique de l'oxygène. Dès que la pression atteignait une certaine valeur, l'oxygène commençait à se liquéfier. En ouvrant un robinet qui terminait le tube de fer, on voyait se produire un jet de gaz d'une extrême violence; et, en éclairant ce jet à la lumière électrique, on y pouvait distinguer des particules liquides. — Pour liquéfier l'hydrogène, on substituait au chlorate de potasse un mélange de formiate de potasse et d'hydrate de potasse.

**527. Liquéfaction de l'oxygène, de l'azote et de l'hydrogène, à l'état statique.** — Les procédés de M. Cailletet et de M. Pictet ne permettent de voir l'oxygène, l'azote ou l'hydrogène, à l'état liquide, que pendant un instant, et sous forme d'un brouillard.

En employant le froid produit par l'évaporation dans le vide de l'éthylène ( $C^2H^4$ ) liquéfié, MM. Wroblewski et Olzewski ont obtenu une température évaluée à  $-140^{\circ}$ , à laquelle l'oxygène comprimé se liquéfie. Il est encore plus commode, comme le fait M. Cailletet, de substituer à l'éthylène, le formène ( $C^3H^4$ ), qui en s'évaporant dans l'air donne une température évaluée à  $-160^{\circ}$ . — L'oxygène se présente alors sous forme d'un liquide transparent, moins dense que l'eau; il bout dans l'air à  $-186^{\circ}$ ; son point critique est  $-115^{\circ}$ . — Le même procédé peut servir pour liquéfier l'oxyde de carbone.

Quand on veut obtenir de l'azote liquide, on comprime ce gaz au sein d'un bain d'oxygène liquide en ébullition dans l'air, c'est-à-dire à une température de  $-186^{\circ}$ . On obtient un liquide incolore qui, par l'évaporation rapide dans le vide, abaisse la température à  $-215^{\circ}$ .

C'est au moyen d'un bain d'azote liquide à  $-215^{\circ}$ , que l'on peut liquéfier l'hydrogène. La compression seule ne suffit pas; mais si on laisse se détendre l'hydrogène qui a été comprimé à cette température de  $-215^{\circ}$ , on obtient un liquide transparent et incolore. Ce résultat est particulièrement remarquable pour l'hydrogène, que ses propriétés chimiques rapprochent des métaux, et qu'on aurait pu s'attendre à voir apparaître sous un aspect semblable à celui du mercure.

## CHAPITRE VIII

### HYGROMÉTRIE

**528. État hygrométrique, ou fraction de saturation.** — La présence de la vapeur d'eau dans l'atmosphère est démontrée, soit par la précipitation de cette vapeur à la surface des corps froids, sous la forme de rosée, soit par l'augmentation de poids qu'éprouvent dans l'air certaines substances, dites *substances déliquescentes*, telles que le chlorure de calcium ou le carbonate de potasse.

Lorsque la vapeur d'eau atmosphérique est voisine de son point de saturation, il suffit d'un faible abaissement de température pour en déterminer la précipitation partielle: on dit alors que l'air est *humide*.

— Quand la vapeur atmosphérique est éloignée de son point de saturation, il faut un abaissement considérable de température pour en opérer la condensation: on dit alors que l'air est *sec*.

Pour mieux fixer les idées à cet égard, supposons que, à un moment donné, la tension de la vapeur d'eau dans l'air soit  $12^{\text{mm}},5$ , la température étant  $15^{\circ}$ . Le tableau ci-après, montre que la tension maximum à  $15^{\circ}$  est  $12^{\text{mm}},7$ ; à  $14^{\circ}$ , elle serait  $11^{\text{mm}},9$ ; si donc la température venait à s'abaisser d'un degré seulement, c'est-à-dire de  $15^{\circ}$  à  $14^{\circ}$ , une portion de cette vapeur devrait se liquéfier: l'air est donc *très humide*. — Si, un autre jour, la tension de la vapeur dans l'atmosphère était encore  $12^{\text{mm}},5$ , mais que la température fût de  $20^{\circ}$ , la vapeur serait très éloignée de son point de saturation, puisque la température pourrait s'abaisser de 5 degrés sans qu'il y eût condensation: l'air serait donc *très sec*.

Le degré d'humidité de l'air dépend donc, non pas de la valeur absolue de la tension actuelle de la vapeur d'eau, mais du rapport qui existe entre la tension actuelle  $f$  et la tension maximum  $F$  à la même température. Ce rapport  $\frac{f}{F}$  est ce qu'on nomme *état hygrométrique* de l'air, ou *fraction de saturation*, au moment considéré. — Il résulte de

cette définition que, dans l'air absolument sec, l'état hygrométrique serait zéro; dans l'air saturé de vapeur d'eau, il serait égal à l'unité.

*Remarque.* — Soit  $f$  la force élastique actuelle de la vapeur d'eau dans l'air, et  $p$  le poids de vapeur contenu dans un volume déterminé de cet air : soit  $F$  la tension maximum à la même température, et  $P$  le poids de vapeur que contiendrait le même volume, s'il était saturé :

si l'on admet que la loi de Mariotte soit applicable, on aura  $\frac{f}{F} = \frac{p}{P}$ ,

et l'on pourra encore définir l'état hygrométrique comme étant le rapport entre le poids  $p$  de la vapeur actuellement contenue dans un volume déterminé d'air et le poids  $P$  que ce même volume contiendrait, s'il était saturé à la même température.

TENSION MAXIMUM DE LA VAPEUR D'EAU, DE DEGRÉ EN DEGRÉ.  
ENTRE  $-10^{\circ}$  ET  $+53^{\circ}$

| Température.  | Force élastique en millimètres. | Température. | Force élastique en millimètres. | Température.  | Force élastique en millimètres. |
|---------------|---------------------------------|--------------|---------------------------------|---------------|---------------------------------|
| $-10^{\circ}$ | 2,078                           | $+5^{\circ}$ | 6,354                           | $+20^{\circ}$ | 18,495                          |
| 9.            | 2,261                           | 6.           | 6,998                           | 22.           | 19,659                          |
| 8.            | 3,456                           | 7.           | 7,492                           | 25.           | 20,888                          |
| 7.            | 2,666                           | 8.           | 8,017                           | 24.           | 22,181                          |
| 6.            | 2,890                           | 9.           | 8,574                           | 25.           | 25,550                          |
| 5.            | 3,151                           | 10.          | 9,165                           | 26.           | 24,988                          |
| 4.            | 3,387                           | 11.          | 9,792                           | 27.           | 26,505                          |
| 3.            | 3,662                           | 12.          | 10,457                          | 28.           | 28,101                          |
| 2.            | 3,955                           | 13.          | 11,062                          | 29.           | 29,782                          |
| 1.            | 4,267                           | 14.          | 11,906                          | 30.           | 31,548                          |
| 0.            | 4,600                           | 15.          | 12,699                          | 31.           | 35,405                          |
| $+1$ .        | 4,940                           | 16.          | 15,653                          | 32.           | 35,559                          |
| 2.            | 5,502                           | 17.          | 14,421                          | 35.           | 57,410                          |
| 3.            | 5,687                           | 18.          | 15,537                          | 34.           | 59,565                          |
| 4.            | 6,097                           | 19.          | 16,546                          | 35.           | 41,827                          |
|               |                                 | 20.          | 17,591                          |               |                                 |

On donne le nom d'*hygromètres* aux instruments qui servent à la détermination expérimentale de l'état hygrométrique.

529. **Hygromètre chimique.** — L'hygromètre chimique consiste en une série de tubes, en forme d'U (fig. 244), contenant des fragments de pierre ponce imprégnés d'acide sulfurique, qui serviront à absorber la vapeur d'eau contenue dans un certain volume d'air extérieur; l'appel de cet air dans les tubes est déterminé par l'écoulement de l'eau de l'aspirateur V. Le tube A est destiné à empêcher la vapeur émise par l'eau de l'aspirateur de pénétrer dans les autres tubes; c'est uniquement dans la série comprise de F à B que doit se faire l'absorption de la vapeur abandonnée par l'air, ce qu'on peut toujours obtenir en rendant l'écoulement suffisamment lent. A la fin de l'expérience, on jauge le

volume U de l'eau écoulee, on note la température  $t$  du thermomètre placé dans l'aspirateur, et la pression extérieure H. Enfin, on détache la série des tubes de B à F, et on en détermine, au moyen de la balance, l'accroissement de poids  $p$ : c'est le poids de la vapeur d'eau absorbée.

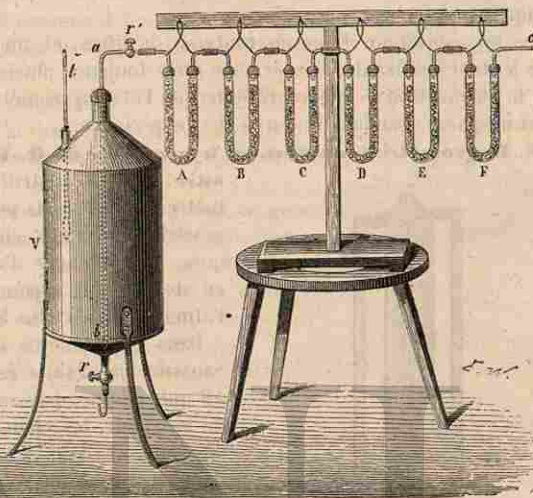


Fig. 244. — Hygromètre chimique.

Voici maintenant comment on raisonne, pour déduire, des données de l'expérience, la valeur de la force élastique  $f$  de la vapeur d'eau dans l'atmosphère. — Soit  $t$  la température extérieure, et soit  $V$  le volume qui était occupé à l'extérieur, par la vapeur qui a été condensée, on a la relation (296) :

$$(1) \quad p = V \times 0,001295 \times 0,622 \times \frac{f}{76} \times \frac{1}{1 + at}$$

D'autre part,  $V$  exprime également le volume occupé, à l'extérieur, par l'air qui a traversé l'appareil, et dont la tension propre était  $H - f$ ; lorsque cet air est arrivé dans l'aspirateur, il y a acquis un volume  $U$ , et une tension propre  $H - F$  ( $F$  étant la tension maximum de la vapeur d'eau pour la température  $t$ ); on a donc, en appliquant la loi de Mariotte à cette masse d'air,

$$V(H - f) = U(H - F).$$

En tirant de cette équation la valeur de  $V$  et la reportant dans la formule (1), il vient :

$$p = U \frac{H-F}{H-f} \times 0,001295 \times 0,622 \times \frac{f}{76} \times \frac{1}{1+at},$$

équation dont on pourra tirer  $f$ . — Le quotient  $\frac{f}{F}$  sera l'état hygrométrique cherché.

Avec un aspirateur d'une quarantaine de litres, et un écoulement d'une lenteur suffisante, l'expérience dure toujours plusieurs heures; aussi la valeur trouvée ne représente que l'état hygrométrique moyen de l'atmosphère, pendant la durée de l'expérience.

550. **Hygromètre à cheveu, ou hygromètre de H.-B. de Saussure.** — On a construit des hygromètres fondés sur la propriété, que possèdent certains corps organiques, de s'allonger d'autant plus, en absorbant la vapeur d'eau, que l'atmosphère est plus humide (\*).

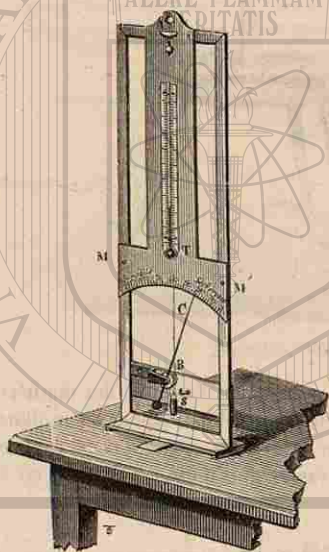


Fig. 245. — Hygromètre à cheveu.

Dans l'hygromètre de H.-B. de Saussure (fig. 245), c'est un cheveu AB qui indique, par ses variations de longueur, les changements qui surviennent dans l'humidité de l'air. Ces variations sont amplifiées à l'aide d'une disposition fort simple : le cheveu est fixé en A, au moyen d'une pince, à la partie supérieure d'un cadre de laiton; en B, il s'attache sur l'une des gorges d'une double poulie, qui porte une aiguille légère C mobile sur un cadran divisé MM'. Sur l'autre gorge de la poulie s'enroule un fil de soie tendu par un petit poids s.

Les cheveux, préalablement débarrassés de toute matière grasse, par une immersion d'une demi-heure environ dans de l'eau bouillante, renfermant un centième de carbonate de soude, sont ensuite lavés et séchés.

Pour graduer l'hygromètre à cheveu, on détermine ordinairement deux points fixes : 1° le centième degré, ou point d'humidité extrême :

(\*) Tout le monde connaît ces petits instruments, grossièrement construits, dont on se sert pour prévoir, avec plus ou moins de probabilité, la pluie ou le beau temps. Souvent ils représentent un petit personnage qui rentre sous un abri quand le temps est à la pluie. — Dans tous ces instruments, les mouvements de la pièce mobile sont produits par une corde de boyau, qui se détord plus ou moins, suivant que le temps est plus ou moins humide.

c'est le point où s'arrête l'aiguille quand l'appareil a séjourné quelque temps dans un vase contenant une petite couche d'eau (fig. 246), et dont les parois elles-mêmes ont été mouillées; 2° le zéro, ou point de sécheresse extrême : c'est le point où s'arrête l'aiguille dans un vase contenant une couche d'acide sulfurique concentré, qui absorbe l'humidité de l'air (\*).

Les deux points fixes étant déterminés, on partage l'intervalle qu'ils comprennent en 100 parties égales; ce sont les degrés de l'hygromètre.

551. **Détermination de l'état hygrométrique au moyen de l'hygromètre à cheveu. — Tables de Gay-Lussac.**

— La graduation obtenue comme il vient d'être dit ne suffit pas pour faire connaître immédiatement l'état hygrométrique : l'expérience a montré que l'on se tromperait beaucoup, si l'on croyait, par exemple, que l'instrument dût marquer 50 degrés quand l'état hygrométrique est  $\frac{1}{2}$ , ou 25 degrés quand l'état hygrométrique est  $\frac{1}{4}$ . Il est donc nécessaire, une fois l'instrument gradué, de dresser une table donnant les fractions de saturation qui correspondront à chacun des degrés.

Gay-Lussac a donné, pour résoudre cette question, une méthode fondée sur ce principe, que les vapeurs émises par les solutions aqueuses ont une force élastique d'autant moindre, toutes choses égales d'ailleurs, que ces solutions sont plus concentrées. — Gay-Lussac prépara un certain nombre de solutions d'acide sulfurique dans l'eau, et les introduisit tour à tour dans l'éprouvette représentée par la figure 246. A chaque expérience, l'aiguille marquait un certain degré : pour avoir la fraction de saturation correspondante, il restait à déterminer la tension  $f$  de la vapeur dans l'atmosphère de l'éprouvette, et à la diviser par la tension maximum F de la vapeur qui serait émise par l'eau pure à la même température; or F est donné par la table précédente (p. 266); quant à  $f$ , on l'obtenait en faisant passer au sommet d'un tube barométrique une petite quantité de la solution, et mesurant la dépression de la colonne mercurielle.

Après un certain nombre d'expériences semblables, pour représenter les résultats obtenus, sur une droite OA (fig. 247), on marqua des divisions égales, représentant les degrés de l'instrument : aux points  $m$ ,

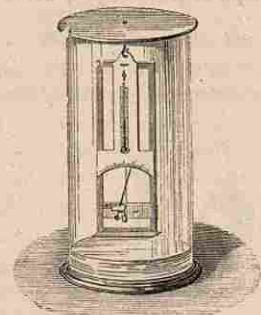


Fig. 246.

(\*) Il arrive en général, dans ces conditions, que l'aiguille met un temps fort long à se fixer, souvent plusieurs semaines; quelquefois même le cheveu s'altère dans sa structure, et ne revient plus au point 100 quand on l'expose de nouveau à l'humidité extrême. Dans ce dernier cas, il faut le remplacer par un autre.

$m'$ ,  $m''$ , ..., qui correspondaient aux degrés auxquels l'aiguille s'était arrêtée dans chaque expérience, on éleva des perpendiculaires  $mp$ ,  $m'p'$ ,  $m''p''$ , ..., proportionnelles aux fractions de saturation correspon-

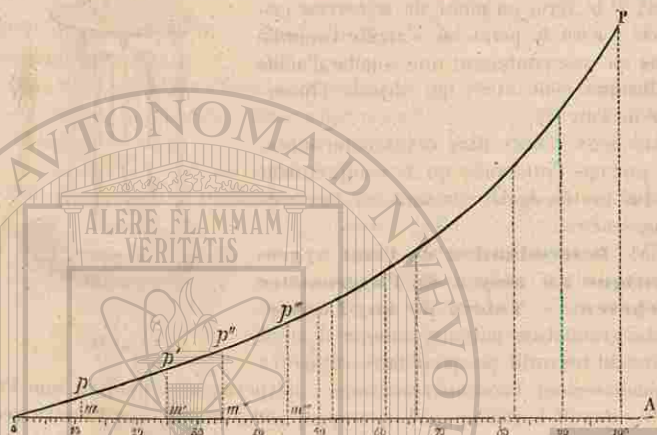


Fig. 247.

dantes; enfin, on joignit par un trait continu les extrémités de ces perpendiculaires. Il est clair que, si l'échelle adoptée est suffisamment grande, cette méthode donne, avec toute l'approximation désirable, la fraction de saturation pour un degré quelconque de l'instrument (\*).

Les expériences de Gay-Lussac ont été faites à la température de 10°; voici quelques résultats, extraits de la table construite par lui :

| DEGRÉS DE L'HYGROMÈTRE. | FRACTIONS DE SATURATION. | DEGRÉS DE L'HYGROMÈTRE | FRACTIONS DE SATURATION |
|-------------------------|--------------------------|------------------------|-------------------------|
| 0.                      | 0,000                    | 60.                    | 0,565                   |
| 10.                     | 0,046                    | 70.                    | 0,472                   |
| 20.                     | 0,094                    | 80.                    | 0,612                   |
| 30.                     | 0,148                    | 90.                    | 0,791                   |
| 40.                     | 0,208                    | 100.                   | 1,000                   |
| 50.                     | 0,278                    |                        |                         |

On peut remarquer combien les variations de l'état hygrométrique sont loin d'être proportionnelles aux déplacements de l'aiguille. Ainsi, l'aiguille indiquant la division 60, l'état hygrométrique n'est pas 0,60, mais seulement 0,56. Il est donc indispensable d'avoir une table de ce genre, pour traduire les indications de l'instrument.

(\*) Pour obtenir, par exemple, la fraction de saturation qui correspond au cinquième degré de l'hygromètre, il suffit d'élever au point 50 une perpendiculaire sur OA, jusqu'à sa rencontre avec la courbe; la mesure de cette perpendiculaire, faite avec l'échelle adoptée, donne la fraction cherchée. On opère de même pour un point quelconque de la graduation.

Cependant, les expériences de Regnault ont montré que l'hygromètre à cheveu ne peut pas être considéré comme un instrument de précision. Le principal avantage qu'il présente est de n'exiger aucune expérience, au moment de l'observation elle-même (\*).

552. **Hygromètres de condensation.** — **Hygromètre de Daniell.** — L'hygromètre de Daniell se compose d'un tube de verre recourbé (fig. 248), dont les deux branches sont terminées chacune par une boule. La boule A, en verre noir, contient de l'éther, dans lequel plonge le réservoir d'un thermomètre  $t$ . La boule B est entourée d'une gaze. Avant de fermer l'appareil, on en a chassé l'air par l'ébullition de l'éther.

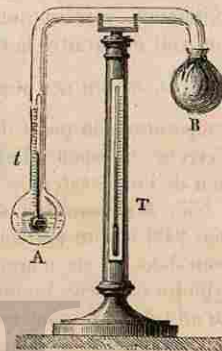


Fig. 248. — Hygromètre de Daniell.

Pour trouver l'état hygrométrique à un moment donné, on détermine d'abord la température extérieure  $T$ , au moyen du thermomètre qui est fixé sur le pied de l'instrument. — On verse ensuite de l'éther, goutte à goutte, sur la gaze qui couvre la boule B, de manière à la refroidir par évaporation : dès qu'il s'est établi ainsi une différence de température entre les deux boules, l'éther contenu dans la boule A commence à se vaporiser, la vapeur allant se condenser dans la boule B. Cette vaporisation abaisse progressivement la température de la boule A, en sorte qu'il arrive un moment où l'on voit la surface extérieure de cette boule se couvrir d'un dépôt de rosée, dû à la condensation de la vapeur d'eau contenue dans l'air environnant. A ce moment, on note la température  $t$  du thermomètre intérieur : c'est le *point de rosée*, c'est-à-dire la température à laquelle la vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère est devenue saturante. Donc, si l'on cherche, dans les tables de tension maximum de la vapeur d'eau, la valeur qui correspond à cette température  $t$ , on aura la tension actuelle  $f$  de la vapeur d'eau

(\*) Il résulte des recherches de Regnault que deux hygromètres à cheveu sont rarement comparables entre eux : les plus légères différences de construction, telles que celles qui tiennent à la provenance des cheveux, à la manière dont ils ont été dégraissés, à la grandeur des poids tenseurs, etc., entraînent de notables divergences dans leurs indications. — De là, la nécessité de construire une table de graduation particulière à chaque instrument.

Afin d'éviter aux physiciens l'obligation de répéter, à chaque fois, la série des expériences de Gay-Lussac, Regnault a donné une table des tensions de la vapeur émise, aux températures ordinaires de l'atmosphère, par des solutions d'acide sulfurique dans l'eau, en proportions définies. Il suffit d'introduire successivement ces solutions dans l'éprouvette (fig. 246); de noter, pour chacune d'elles, les indications de l'instrument qu'on veut graduer, et de prendre, comme fraction de saturation correspondante, le quotient de la tension de la vapeur de la solution par la tension maximum de la vapeur d'eau pure à la même température.

dans l'atmosphère (\*). — On cherchera, dans les mêmes tables, la tension maximum  $F$  qui correspond à la température extérieure  $T$ . — Enfin, en divisant  $f$  par  $F$ , on aura l'état hygrométrique cherché.

On doit remarquer cependant que, le refroidissement se propageant en  $A$  de l'intérieur à l'extérieur, le liquide dans lequel plonge le thermomètre est nécessairement un peu plus froid que l'air qui environne la boule, et la température observée  $t$  est toujours un peu trop basse. Pour atténuer cette cause d'erreur, on laisse l'appareil se réchauffer lentement, et l'on note l'indication  $t_1$  du thermomètre à l'instant où l'on voit disparaître la couche d'humidité qui couvrait la boule : en général,  $t_1$  est un peu supérieur à  $t$ , et l'on prend la moyenne  $\frac{t_1 + t}{2}$  pour température du point de rosée. — Il faut encore signaler, comme cause d'erreur, la vapeur d'eau introduite dans l'atmosphère par la respiration de l'observateur.

555. **Hygromètre de Regnault.** — L'hygromètre de Regnault (fig. 249) est un perfectionnement de celui de Daniell. L'éther est contenu dans un dé d'argent mince et brillant  $B$ , fixé à l'extrémité d'un cylindre de verre  $A$ ; un thermomètre  $T$  plonge dans le liquide, ainsi qu'un tube  $C$  qui s'ouvre à l'extérieur. La partie supérieure du cylindre  $A$  communique, par un tube de caoutchouc  $MM'$  de plusieurs mètres, avec un aspirateur semblable à celui de la figure 244. Quand on ouvre l'aspirateur, on produit un appel d'air qui pénètre en  $C$ , traverse l'éther et en active la vaporisation. — Pour saisir avec exactitude le point de rosée, on dispose, à côté du dé d'argent  $B$ , un autre dé  $B'$ , en tout semblable, mais ne contenant pas d'éther : il permet d'apprécier, par contraste, l'état de la surface  $B$ . L'expérimentateur observe l'appareil de loin, au moyen d'une lunette, qui permet d'apercevoir à la fois les deux dés  $B$  et  $B'$ , ainsi que les divisions grossies des deux thermomètres  $T$  et  $T'$  : l'un de ces thermomètres donne la température du point de rosée; l'autre, la température de l'atmosphère. En réglant l'écoulement de l'eau, on parvient à faire apparaître et disparaître alternativement la rosée à des températures de plus en plus rapprochées l'une de l'autre, de manière à atteindre une grande précision. — Les causes d'erreur signalées pour l'hygromètre de Daniell sont évitées : le dé métallique conduisant bien la chaleur, et la masse d'éther étant agitée, la température observée  $T'$  ne doit pas sensiblement différer de celle de la surface de l'argent; d'autre part, l'observateur, éloigné de l'appareil, ne modifiera pas, par sa respiration, la tension de la vapeur d'eau dans le voisinage de l'hygromètre.

Il faut remarquer cependant que l'appareil de Regnault ne peut pas

(\*) La table de la page 266 est extraite d'une table construite par Regnault, qui donne les valeurs de la tension maximum de la vapeur d'eau, de dixième de degré en dixième de degré.

servir à déterminer la tension de la vapeur d'eau en plein air, quand la vitesse du vent est un peu grande; la vitesse d'évaporation est alors telle que le dépôt de rosée n'apparaît plus. — M. Crova a con-

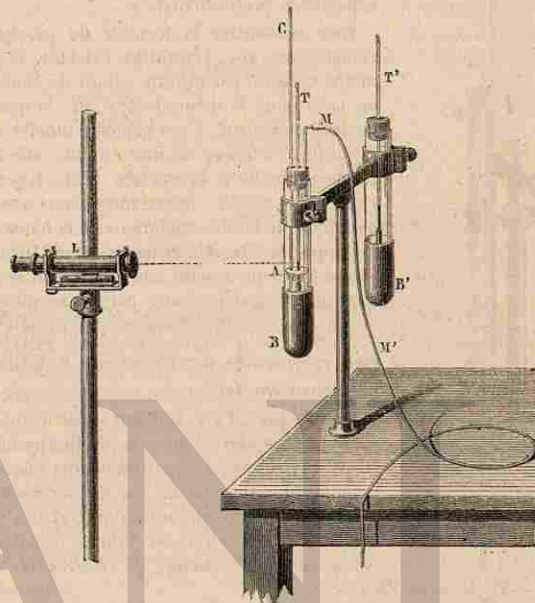


Fig. 249. — Hygromètre de Regnault.

struit un hygromètre de condensation, fondé toujours sur les mêmes principes, mais dans lequel la surface sur laquelle doit se former le dépôt de rosée est placée dans une enveloppe fermée, où l'on fait passer lentement l'air dont on veut apprécier l'état hygrométrique.

554. **Psychromètre.** — Le psychromètre se compose de deux thermomètres très sensibles  $A$  et  $A'$  (fig. 250), fixés sur un même pied. Le réservoir du thermomètre  $A'$  est couvert d'une toile fine, maintenue constamment humide à l'aide d'une mèche de coton qui aspire, par capillarité, l'eau contenue dans le tube  $B$ . Le liquide se vaporise à la surface du réservoir  $A'$ , et lui prend la chaleur nécessaire à son changement d'état; le thermomètre  $A$  marque donc une température  $t'$  inférieure à la température  $t$  de l'atmosphère, qui est donnée par le thermomètre  $A$ . L'expérience montre que la différence  $t - t'$  est d'autant plus grande que l'évaporation est plus rapide, c'est-à-dire que l'air est plus éloigné de son point de saturation.

On emploie, pour calculer la tension actuelle  $x$  de la vapeur d'eau dans l'atmosphère, à un moment déterminé, la formule empirique

$$x = F' - A(t - t')H,$$

dans laquelle  $F'$  est la tension maximum pour la température  $t'$ ,  $H$  est la pression barométrique; enfin  $A$  est un coefficient numérique, qui varie avec le mode d'exposition de l'instrument; on détermine la valeur de ce coefficient, dans chaque cas particulier, par une expérience préliminaire (\*).



Fig. 250. — Psychromètre.

Pour démontrer la formule du psychromètre, remarquons que, l'équilibre existant, le thermomètre  $A'$  reçoit par minute autant de chaleur qu'il en perd dans le même temps. Or, la quantité de chaleur cédée par  $A'$  est proportionnelle au poids d'eau qui s'évapore en une minute: elle est donc proportionnelle à la surface  $S$  du liquide et à l'excès  $F' - x$  (298); nous admettrons avec Dalton que, pour de faibles variations de la hauteur barométrique, la vitesse d'évaporation est inversement proportionnelle à cette hauteur  $H$ . En résumé, la quantité de chaleur cédée par le thermomètre  $A'$ , au poids d'eau qui s'évapore par minute, pourra être représentée par  $BS \frac{F' - x}{H}$ ,  $B$  désignant un coefficient constant.

D'autre part, l'air ambiant étant à une température  $t$  plus élevée que celle du thermomètre, les corps environnants constituent une enceinte qui rayonne plus de chaleur sur le thermomètre que celui-ci n'en rayonne autour de lui. La quantité de chaleur absorbée par minute est donc proportionnelle à la surface  $S$ , et à l'excès de température  $t - t'$ ; ce sera  $CS(t - t')$ .

En écrivant que la chaleur gagnée est égale à la chaleur perdue par minute, et désignant par  $A$  le quotient  $\frac{C}{B}$ , on aura :

$$\frac{F' - x}{H} = A(t - t'), \quad x = F' - AH(t - t').$$

Le coefficient  $C$  dépend du rayonnement, c'est-à-dire du mode d'exposition de l'instrument; par suite, il en est de même de  $A$ . — Par contre, ce coefficient  $A$  est indépendant de la surface. Deux psychromètres, de dimensions différentes, installés au même lieu, donneront, au même instant, les mêmes indications.

(\*) Pour effectuer cette détermination, on installe l'instrument à la place qu'il doit occuper; on observe les températures  $t$  et  $t'$  des deux thermomètres, ainsi que la pression  $H$ , et l'on cherche  $F'$  dans les tables; on détermine la tension  $x$  au moyen de l'hygromètre de Regnault. On connaît alors toutes les quantités qui entrent dans la formule, sauf  $A$ : il est donc facile d'en tirer la valeur de ce coefficient. — Il varie avec le mode d'exposition, de 0,00074 à 0,00128 environ.

## CHAPITRE IX

### CALORIMÉTRIE

555. **Objet de la calorimétrie.** — La calorimétrie est la mesure des quantités de chaleur dont l'absorption ou le dégagement correspondent à des effets déterminés.

Nous diviserons l'étude de la calorimétrie en trois parties: 1° l'étude des *chaleurs spécifiques*, ou quantités de chaleur nécessaires pour produire, sur les divers corps, des variations de température déterminées; 2° l'étude des *chaleurs latentes*, ou quantités de chaleur nécessaires pour produire les changements d'état, sans variation de température; 3° l'étude des *chaleurs de combinaison*, ou quantités de chaleur dégagées ou absorbées dans la formation ou la destruction des composés chimiques.

556. **Unité de chaleur : calorie.** — Dans l'évaluation des quantités de chaleur qui correspondent aux divers phénomènes, on prend pour *unité de chaleur*, ou *calorie*, la quantité de chaleur nécessaire pour élever la température d'un gramme d'eau de 0° à 1°.

Nous ferons cependant, dès maintenant, une remarque importante. — L'expérience montre que, lorsqu'on mélange un gramme d'eau à 0° avec un gramme d'eau à 2°, le mélange prend la température de 1°, ce qui prouve que le second gramme, en se refroidissant de 2° à 1°, a abandonné une calorie; ou, inversement, que pour échauffer un gramme d'eau de 1° à 2°, il faut encore une calorie. — De même, lorsqu'on mélange un gramme d'eau à 0° avec un gramme d'eau à 4°, le mélange prend la température de 2°, ce qui prouve, en raisonnant comme plus haut, que, pour échauffer un gramme d'eau de 2° à 4°, il faut 2 calories. — En étendant ainsi ces résultats de proche en proche, on trouve que la quantité de chaleur nécessaire pour élever d'un degré la température d'un gramme d'eau est toujours sensiblement la même, *quelle que soit la température initiale*, pourvu que cette température soit comprise entre 0° et 100°.

dans laquelle  $F'$  est la tension maximum pour la température  $t'$ ,  $H$  est la pression barométrique; enfin  $A$  est un coefficient numérique, qui varie avec le mode d'exposition de l'instrument; on détermine la valeur de ce coefficient, dans chaque cas particulier, par une expérience préliminaire (\*).



Fig. 250. — Psychromètre.

Pour démontrer la formule du psychromètre, remarquons que, l'équilibre existant, le thermomètre  $A'$  reçoit par minute autant de chaleur qu'il en perd dans le même temps. Or, la quantité de chaleur cédée par  $A'$  est proportionnelle au poids d'eau qui s'évapore en une minute: elle est donc proportionnelle à la surface  $S$  du liquide et à l'excès  $F' - x$  (298); nous admettrons avec Dalton que, pour de faibles variations de la hauteur barométrique, la vitesse d'évaporation est inversement proportionnelle à cette hauteur  $H$ . En résumé, la quantité de chaleur cédée par le thermomètre  $A'$ , au poids d'eau qui s'évapore par minute, pourra être représentée par  $BS \frac{F' - x}{H}$ ,  $B$  désignant un coefficient constant.

D'autre part, l'air ambiant étant à une température  $t$  plus élevée que celle du thermomètre, les corps environnants constituent une enceinte qui rayonne plus de chaleur sur le thermomètre que celui-ci n'en rayonne autour de lui. La quantité de chaleur absorbée par minute est donc proportionnelle à la surface  $S$ , et à l'excès de température  $t - t'$ ; ce sera  $CS(t - t')$ .

En écrivant que la chaleur gagnée est égale à la chaleur perdue par minute, et désignant par  $A$  le quotient  $\frac{C}{B}$ , on aura :

$$\frac{F' - x}{H} = A(t - t'), \quad x = F' - AH(t - t').$$

Le coefficient  $C$  dépend du rayonnement, c'est-à-dire du mode d'exposition de l'instrument; par suite, il en est de même de  $A$ . — Par contre, ce coefficient  $A$  est indépendant de la surface. Deux psychromètres, de dimensions différentes, installés au même lieu, donneront, au même instant, les mêmes indications.

(\*) Pour effectuer cette détermination, on installe l'instrument à la place qu'il doit occuper; on observe les températures  $t$  et  $t'$  des deux thermomètres, ainsi que la pression  $H$ , et l'on cherche  $F'$  dans les tables; on détermine la tension  $x$  au moyen de l'hygromètre de Regnault. On connaît alors toutes les quantités qui entrent dans la formule, sauf  $A$ : il est donc facile d'en tirer la valeur de ce coefficient. — Il varie avec le mode d'exposition, de 0,00074 à 0,00128 environ.

## CHAPITRE IX

### CALORIMÉTRIE

555. **Objet de la calorimétrie.** — La calorimétrie est la mesure des quantités de chaleur dont l'absorption ou le dégagement correspondent à des effets déterminés.

Nous diviserons l'étude de la calorimétrie en trois parties: 1° l'étude des *chaleurs spécifiques*, ou quantités de chaleur nécessaires pour produire, sur les divers corps, des variations de température déterminées; 2° l'étude des *chaleurs latentes*, ou quantités de chaleur nécessaires pour produire les changements d'état, sans variation de température; 3° l'étude des *chaleurs de combinaison*, ou quantités de chaleur dégagées ou absorbées dans la formation ou la destruction des composés chimiques.

556. **Unité de chaleur : calorie.** — Dans l'évaluation des quantités de chaleur qui correspondent aux divers phénomènes, on prend pour *unité de chaleur*, ou *calorie*, la quantité de chaleur nécessaire pour élever la température d'un gramme d'eau de 0° à 1°.

Nous ferons cependant, dès maintenant, une remarque importante. — L'expérience montre que, lorsqu'on mélange un gramme d'eau à 0° avec un gramme d'eau à 2°, le mélange prend la température de 1°, ce qui prouve que le second gramme, en se refroidissant de 2° à 1°, a abandonné une calorie; ou, inversement, que pour échauffer un gramme d'eau de 1° à 2°, il faut encore une calorie. — De même, lorsqu'on mélange un gramme d'eau à 0° avec un gramme d'eau à 4°, le mélange prend la température de 2°, ce qui prouve, en raisonnant comme plus haut, que, pour échauffer un gramme d'eau de 2° à 4°, il faut 2 calories. — En étendant ainsi ces résultats de proche en proche, on trouve que la quantité de chaleur nécessaire pour élever d'un degré la température d'un gramme d'eau est toujours sensiblement la même, *quelle que soit la température initiale*, pourvu que cette température soit comprise entre 0° et 100°.



On peut donc dire encore que la calorie est la quantité de chaleur nécessaire pour élever de  $t$  degrés à  $t+1$  degrés la température de 1 gramme d'eau, et cela avec d'autant plus d'exactitude que la température  $t$  est plus voisine de  $0^{\circ}$ .

L'unité de chaleur ainsi définie est la *petite calorie*. — On emploie souvent, comme unité pratique, la *grande calorie* qui vaut 1000 petites calories : c'est donc la quantité de chaleur nécessaire pour élever de degrés à  $t+1$  degrés, la température de 1 kilogramme d'eau.

I. — MESURE DES CHALEURS SPÉCIFIQUES.

537. **Définition des chaleurs spécifiques.** — Des poids égaux de corps différents exigent, en général, pour s'échauffer d'un même nombre de degrés, des quantités différentes de chaleur.

Si, par exemple, on plonge 1 kilogramme de cuivre à  $100^{\circ}$ , dans 1 kilogramme d'eau à  $0^{\circ}$ , on trouve que le mélange prend une température de  $9^{\circ}$  environ. — Le kilogramme de cuivre a donc éprouvé un abaissement de température de 91 degrés. D'autre part, la quantité de chaleur qu'il a abandonnée n'a élevé la température du kilogramme d'eau que de 9 degrés : elle est représentée par 9 grandes calories. — On peut donc dire, en raisonnant sur des poids mille fois plus petits, que 9 petites calories suffisent pour élever de 91 degrés la température d'un gramme de cuivre; en d'autres termes, un gramme de cuivre exige environ dix fois moins de chaleur qu'un gramme d'eau, pour éprouver une même variation de température.

On appelle *chaleur spécifique* d'un corps, la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1 degré la température de 1 gramme de ce corps.

Si l'on rapproche cette définition de celle de l'unité de chaleur (536), on voit que la *chaleur spécifique de l'eau est égale à l'unité*.

538. **Expression de la quantité de chaleur qui correspond à une variation déterminée de température, pour un corps déterminé.** — Proposons-nous, par exemple, de calculer la quantité de chaleur qu'il faut fournir à un morceau de cuivre pesant 5 grammes, pour l'échauffer de  $0^{\circ}$  à  $100^{\circ}$ ; soit 0,095 la chaleur spécifique du cuivre. — D'après la définition même de la chaleur spécifique, 1 gramme de cuivre, pour s'échauffer d'un degré, exige  $0^{\text{e}1},095$ ; 5 grammes, pour s'échauffer d'un degré, prendront  $0^{\text{e}1},095 \times 5$ ; pour s'échauffer de 100 degrés, ces 5 grammes exigeront 100 fois cette dernière quantité, c'est-à-dire  $0^{\text{e}1},095 \times 5 \times 100$ , ou  $47^{\text{e}1},5$ .

En général, soit  $p$  le poids d'un corps,  $c$  sa chaleur spécifique : la quantité  $q$  de chaleur qu'il absorbe en s'élevant de  $t$  à  $t'$ , ou qu'il abandonne en s'abaissant de  $t'$  à  $t$ , est :

$$q = pc(t' - t).$$

539. **Capacité calorifique d'un corps.** — Dans l'expression précédente, si l'on considère le cas particulier où la variation de température ( $t' - t$ ) est de 1 degré, la quantité de chaleur correspondante est exprimée numériquement par le produit  $pc$ . Ce produit est ce qu'on nomme la *capacité calorifique* du corps considéré : c'est le nombre de calories nécessaire pour faire éprouver, au corps tout entier, une variation de température de 1 degré.

Si l'on désigne par  $C$  la capacité calorifique d'un corps, et par  $\theta$  une variation de température déterminée, on voit que la quantité de chaleur correspondante sera représentée par l'expression

$$q = C\theta.$$

540. **Méthode de la fusion de la glace pour la détermination des chaleurs spécifiques.** — Lavoisier et Laplace ont employé, pour déterminer les chaleurs spécifiques des corps solides, une méthode d'une grande simplicité, au moins quant à son principe.

Un poids connu  $P$  du corps étant chauffé à une température connue  $T$ , on le met en présence d'une masse de glace à  $0^{\circ}$ , et l'on mesure le poids  $\pi$  de glace dont il détermine la fusion, en s'abaissant lui-même jusqu'à la température zéro. — Or, si l'on désigne par  $x$  la chaleur spécifique inconnue, le corps, en se refroidissant de  $T$  degrés, aura perdu  $PxT$ ; d'autre part, nous verrons plus loin que 1 gramme de glace absorbe, pour fondre sans changer de température, 80 calories : le poids  $\pi$  aura donc absorbé un nombre de calories représenté par  $\pi \times 80$ . La quantité de chaleur abandonnée par le corps étant égale à celle qui a été absorbée par la glace, on a l'équation

$$PxT = \pi \times 80;$$

d'où l'on tire la valeur de  $x$ .

Le principal défaut de cette méthode, c'est que le poids  $\pi$  de l'eau de fusion est toujours très petit par rapport au poids  $P$  du corps. Il faudrait donc évaluer ce poids  $\pi$  avec une très grande exactitude, pour obtenir la chaleur spécifique  $x$  avec une approximation suffisante. — Nous allons voir que c'est là un résultat difficile à atteindre.

541. **Emploi du puits de glace.** — Le meilleur procédé, pour appliquer la méthode qui vient d'être indiquée, consiste à employer un *puits de glace*, c'est-à-dire une cavité pratiquée dans un bloc de glace compacte, sur laquelle on applique un autre morceau de glace formant couvercle (fig. 251). Après avoir essuyé les parois de la cavité, on y introduit le corps chaud, et l'on replace le couvercle; au bout d'un

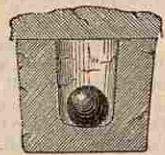


Fig. 251.  
Puits de glace.

temps suffisant, on recueille l'eau de fusion, avec du papier buvard : l'accroissement de poids du papier représente le poids  $\pi$  de cette eau.

Mais cette valeur de  $\pi$  ne peut jamais être considérée comme rigoureusement exacte; car on peut toujours craindre, ou que le papier ne recueille qu'incomplètement l'eau de fusion, ou que le frottement ne provoque la fusion d'une nouvelle quantité d'eau. — Enfin, plus le bloc est compact, plus il est à craindre que sa température intérieure ne soit sensiblement inférieure à  $0^\circ$ , ce qui constitue une nouvelle cause d'erreur (\*).

**542. Calorimètre de Bunsen.** — Dans le calorimètre de glace de Bunsen, on évalue la quantité de chaleur cédée à l'appareil, par la mesure de la contraction qui accompagne la fusion d'une certaine masse de glace, et qui lui est proportionnelle.

L'appareil, représenté par la figure 252, est placé dans une caisse entourée d'une autre caisse plus grande; l'intervalle des deux enveloppes est rempli de neige à  $0^\circ$ , qui maintient constante la température du calorimètre. — La partie supérieure de la grande branche R contient de l'eau; le reste contient du mercure jusqu'en un point du tube horizontal T, lequel est divisé en parties d'égales capacités. — On commence par faire circuler dans le moufle A de l'alcool très froid, de manière à déterminer la congélation de l'eau. Puis on procède à la mesure de la quantité dont rétrograde le mercure dans le tube horizontal, pour une calorie cédée à l'appareil. A cet effet, on verse dans le moufle A une masse d'eau égale à  $\pi\pi$ , dont la température  $t$  est connue; une portion de la glace fond, et le mercure se déplace de  $n$  divisions, pour les  $\pi t$  calories cédées; pour une seule

Fig. 252.  
Calorimètre de Bunsen.

(\*) Lavoisier et Laplace faisaient usage d'un appareil assez volumineux, et composé de trois enceintes métalliques. L'enceinte intérieure, formée par un vase en toile métallique, recevait le corps chauffé. L'enceinte intermédiaire contenait la glace dont le corps devait déterminer la fusion: on recueillait l'eau de fusion par un robinet. Enfin, l'enceinte extérieure contenait de la glace, destinée uniquement à préserver l'enceinte intermédiaire de la chaleur qui aurait pu lui être cédée par le milieu ambiant: l'eau qui provenait de la fusion de cette glace n'intervenait pas dans la pesée. — On voit qu'on admet ici que les fragments de glace de l'enceinte intermédiaire retiennent, soit avant, soit après l'expérience, la même quantité d'eau interposée dans leurs interstices, ce qui est certainement loin de la réalité. — L'appareil est aujourd'hui abandonné.

calorie, il se déplacerait de  $\frac{n}{\pi t} = k$  divisions. Ce nombre  $k$  est la constante du calorimètre.

Soit maintenant un corps quelconque, de masse  $P\pi$ , à la température  $T$ . On le projette dans le moufle; si le mercure rétrograde de  $N$  divisions, on en conclut que le nombre de calories cédées par le corps est  $\frac{N}{k}$ , et l'on a :

$$PxT = \frac{N}{k};$$

d'où l'on tire la valeur de  $x$ .

**543. Méthode des mélanges.** — L'une des méthodes les plus exactes, pour déterminer les chaleurs spécifiques, est la méthode des mélanges, qui est due au physicien écossais Black.

On chauffe, à une température déterminée  $T$ , un poids connu  $P$  du corps soumis à l'expérience; puis, on plonge ce corps dans une masse d'eau  $M$  dont on connaît la température  $t$ . Quand l'équilibre de température est établi, on note la température  $\theta$  du mélange. On exprime alors que la quantité de chaleur perdue par le corps est égale à la quantité de chaleur gagnée par l'eau.

Soit  $x$  la chaleur spécifique inconnue; le corps s'étant refroidi d'un nombre de degrés  $(T - \theta)$ , la quantité de chaleur qu'il a perdue est exprimée (558) par  $Px(T - \theta)$ ; l'eau s'étant échauffée d'un nombre de degrés  $(\theta - t)$ , la quantité de chaleur qu'elle a gagnée est  $M(\theta - t)$ . En égalant ces deux quantités de chaleur, on a

$$(1) \quad Px(T - \theta) = M(\theta - t);$$

d'où l'on tire la valeur de  $x$ .

Mais, pour que le résultat soit exact, il est nécessaire d'effectuer plusieurs corrections, que nous allons maintenant indiquer.

**544. Corrections à faire subir aux résultats précédents.** — Le raisonnement qui précède suppose que toute la chaleur abandonnée par le corps a été absorbée par l'eau. En réalité, l'eau est contenue dans un vase de laiton, ou calorimètre (fig. 255), qui a pris une portion de cette chaleur. — Désignons par  $p$  le poids du calorimètre et par  $c$  la chaleur spécifique du laiton, supposée connue par une expé-

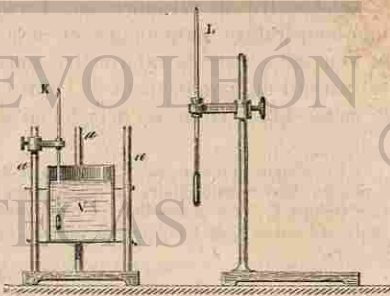


Fig. 255.

rience préliminaire; la quantité de chaleur que le calorimètre a gagnée est  $pc(0-t)$ , quantité qui doit être ajoutée au second membre de l'équation (1) (\*).

D'autre part, si le corps soumis à l'expérience est en petits fragments, on le place dans une enveloppe à parois minces. Soit  $p_1$  le poids de cette enveloppe et  $c_1$  sa chaleur spécifique, supposée connue; la quantité de chaleur que l'enveloppe abandonne à l'eau est  $p_1c_1(T-0)$ , quantité qui doit être ajoutée au premier membre de l'équation (1).

On obtient ainsi, pour déterminer  $x$ , l'équation plus exacte :

$$(2) \quad (Px + p_1c_1)(T-0) = (M + pc)(0-t) (**).$$

345. **Appareil de Regnault.** — La disposition adoptée par Regnault, pour l'application de la méthode des mélanges, a l'avantage de donner la température initiale avec une grande exactitude, et d'atténuer les causes d'erreur des différentes phases de l'expérience.

Le corps est placé dans une corbeille de fil de laiton très mince C (fig. 254); dans l'axe de cette corbeille vient se loger le réservoir d'un thermomètre T. Pour chauffer le corps, on suspend la corbeille, par un fil de soie, dans une étuve à vapeur d'eau EE. L'étuve repose sur une sorte de caisse métallique coudée LHG, qui contient de l'eau à la température du laboratoire; la portion horizontale de cette caisse est traversée par une ouverture qui correspond à la chambre centrale de l'étuve, et qu'on tient fermée, pendant l'échauffement du corps, au moyen d'un registre P. — Le calorimètre K est placé sur un support qui pourra glisser le long d'une coulisse de bois RR', de manière à venir se placer au-dessous de l'étuve.

Pour faire une expérience, on tient l'écran MN baissé pendant tout le temps qu'on chauffe le corps dans l'étuve, de manière à préserver le calorimètre du rayonnement. Lorsque le thermomètre T indique une température stationnaire, on lève l'écran, on retire le registre P et l'on fait glisser le calorimètre sous l'étuve (dans cette position, il est garanti du rayonnement de l'étuve et de la chaudière à vapeur par la caisse LHG); enfin, on détache en  $n$  le fil qui soutient la corbeille,

(\*) L'expérience préliminaire, destinée à la détermination de la quantité  $c$ , consiste à plonger dans le calorimètre un poids connu  $P_1$  de laiton, chauffé à une température connue  $T_1$ , et à déterminer la température finale  $t_1$  du mélange. Si  $M_1$  est le poids de l'eau et  $t_1$  sa température initiale, en raisonnant comme précédemment, on aura

$$P_1c(T_1 - t_1) = (M_1 + pc)(t_1 - t_1),$$

équation où la seule inconnue est  $c$ .

(\*\*) Dans les recherches précises, on tient compte aussi de la chaleur absorbée par le thermomètre, qui reste plongé dans l'eau pendant l'expérience. Il suffit, pour cela, de connaître la chaleur spécifique du mercure et celle du verre.

de manière à la laisser descendre dans le calorimètre, on ramène le calorimètre vers R' et l'on abaisse de nouveau l'écran MN. Le thermomètre  $t$  monte d'abord très vite, puis plus lentement, et enfin il

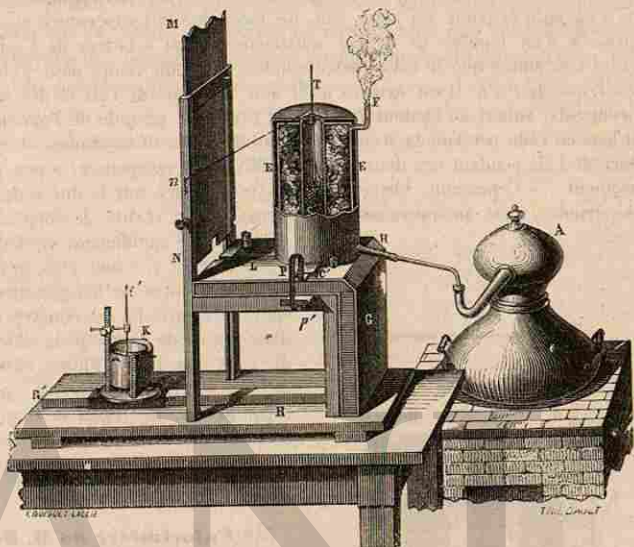


Fig. 254. — Détermination des chaleurs spécifiques. (Appareil de Regnault.)

atteint un maximum, pour redescendre ensuite à cause du refroidissement extérieur : c'est ce maximum qui constitue la température  $\theta$ , relative à l'état d'équilibre entre l'eau et le corps immergé.

346. **Détails de construction du calorimètre.** — Dès que la température du calorimètre s'élève au-dessus de la température extérieure, il perd de la chaleur, soit par rayonnement, soit par le contact de l'air, soit par la conductibilité des supports. Pour atténuer l'influence de ces causes d'erreur, on prend les précautions suivantes.

On polit la surface extérieure du calorimètre, pour diminuer son pouvoir émissif. — On entoure le calorimètre d'un second vase de laiton, poli intérieurement, qui lui renvoie par réflexion presque toute la chaleur émise, et qui le préserve des agitations de l'air (fig. 254). — Enfin, on le fait reposer sur deux fils de soie, tendus en croix à une petite distance du fond du vase extérieur: la chaleur transmise par la conductibilité des supports est alors négligeable.

347. **Méthode des compensations, pour diminuer l'influence des pertes de chaleur éprouvées par le calorimètre.** — Malgré les précautions que nous venons d'indiquer, les pertes de chaleur qu'éprouve

le calorimètre ne sont jamais annulées. On peut en diminuer encore l'influence, en employant la *méthode des compensations*, qui est due à Rumford.

On fait en sorte que la température initiale  $t$  de l'eau du calorimètre soit inférieure, de 2 ou 3 degrés, à la température  $t'$  de l'air environnant, et on règle à l'avance le poids de cette eau, de façon que la température finale  $\theta$  surpasse  $t'$  d'un nombre de degrés sensiblement égal à l'excès de  $t'$  sur  $t$  alors, si l'on admet que le calorimètre emploie le même temps pour s'élever de  $t$  à  $t'$  que de  $t'$  à  $\theta$ , il est évident qu'il doit recevoir, de l'air et des corps environnants, autant de chaleur pendant la première période de l'opération qu'il leur en cède pendant la seconde, et les effets dus au rayonnement et au contact de l'air pendant ces deux périodes doivent se compenser, à peu près exactement. — Cependant, l'hypothèse que l'on fait ici, sur la durée de ces deux périodes, n'est qu'approximativement exacte. En réalité, le corps cède

d'autant plus rapidement sa chaleur à l'eau, qu'il y a une plus grande différence entre sa température et celle de l'eau : le calorimètre met donc moins de temps pour s'élever de  $t$  à  $t'$  que pour s'élever ensuite de  $t'$  à  $\theta$ . Il est préférable, pour cette raison, de régler la quantité d'eau de manière que la différence  $\theta - t'$  atteigne seulement à peu près à la moitié de  $t' - t$ .

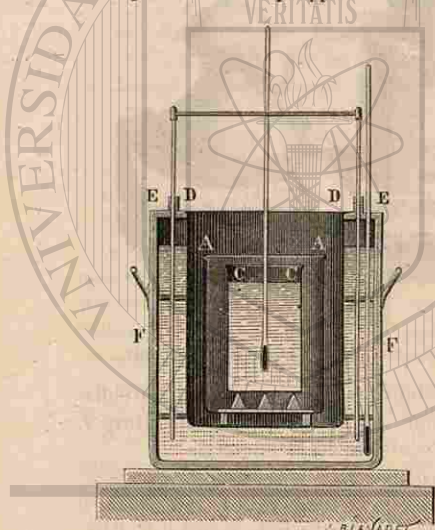


Fig. 255. — Calorimètre de M. Berthelot.

548. **Calorimètre de M. Berthelot.** — Le calorimètre employé par M. Berthelot rend inutile toute espèce de corrections relatives au rayonnement. Le calorimètre CC, en platine, est muni d'un couvercle, qui laisse passer la tige du thermomètre (fig. 255); il repose par trois pointes de liège sur le fond d'une enveloppe protectrice AA en laiton argenté à l'intérieur; cette première enceinte est au centre d'un cylindre à doubles parois DE en fer-blanc; l'intervalle des deux parois est rempli d'eau; ce cylindre est encore recouvert d'un carton qui laisse passer la tige du thermomètre; enfin le tout est entouré d'un feutre épais. — Grâce au feutre et à la grande masse d'eau de l'enceinte DE, le calorimètre est protégé contre toute cause extérieure de refroidissement ou de réchauffement, notamment contre le rayonnement dû au voisinage de l'observateur. L'expérience montre que la température finale  $\theta$  demeure très longtemps stationnaire.

549. **Résultats. — Chaleurs spécifiques moyennes.** — Le tableau suivant donne les chaleurs spécifiques de quelques corps solides et liquides, d'après Regnault.

Tous les nombres de ce tableau sont inférieurs à 1, excepté celui qui représente la chaleur spécifique de l'eau, prise pour une unité. — Il en résulte que, de tous les corps solides ou liquides, c'est l'eau qui a la plus grande chaleur spécifique. C'est là une remarque importante, comme on le verra, au point de vue du rôle que joue l'eau dans la répartition des températures à la surface du globe, et dans un grand nombre d'autres phénomènes.

| CHALEURS SPÉCIFIQUES.              |         | CHALEURS SPÉCIFIQUES.  |         |
|------------------------------------|---------|------------------------|---------|
| Acier. . . . .                     | 0,11848 | Fer. . . . .           | 0,11579 |
| Antimoine. . . . .                 | 0,05077 | Fonte blanche. . . . . | 0,12985 |
| Argent. . . . .                    | 0,05701 | Iode. . . . .          | 0,05412 |
| Arsenic. . . . .                   | 0,08140 | Laiton. . . . .        | 0,09591 |
| Bismuth. . . . .                   | 0,05084 | Mercure. . . . .       | 0,05552 |
| Cadmium. . . . .                   | 0,05669 | Nickel. . . . .        | 0,10865 |
| Carbone (charbon de bois). . . . . | 0,24150 | Or. . . . .            | 0,05244 |
| — (diamant). . . . .               | 0,24680 | Palladium. . . . .     | 0,05927 |
| — (plombagine). . . . .            | 0,21800 | Phosphore. . . . .     | 0,18870 |
| Cobalt. . . . .                    | 0,10796 | Platine. . . . .       | 0,05245 |
| Cuivre battu à froid. . . . .      | 0,09530 | Plomb. . . . .         | 0,05140 |
| — fondu. . . . .                   | 0,09470 | Sélénium. . . . .      | 0,08570 |
| — recuit. . . . .                  | 0,09470 | Soufre. . . . .        | 0,20259 |
| Eau. . . . .                       | 1,00000 | Verre. . . . .         | 0,19768 |
| Essence de térébenthine. . . . .   | 0,42535 | Zinc. . . . .          | 0,09555 |
| Étain. . . . .                     | 0,05625 |                        |         |

On remarquera qu'un même corps (le carbone ou le cuivre), sous des états physiques différents, peut présenter des variations sensibles dans la valeur de sa chaleur spécifique.

Enfin, Dulong et Petit avaient constaté déjà que, si l'on détermine la chaleur spécifique d'un corps au moyen d'une expérience effectuée entre  $0^{\circ}$  et  $100^{\circ}$ , et qu'on détermine ensuite la chaleur spécifique du même corps au moyen d'une expérience effectuée entre  $0^{\circ}$  et  $200^{\circ}$ , la seconde expérience fournit, en général, un résultat sensiblement plus grand que la première. — Les nombres déterminés par les méthodes précédentes n'expriment donc, pour chaque corps, que la *chaleur spécifique moyenne*, entre les deux températures extrêmes par lesquelles ce corps a passé dans chaque expérience. — Pour la plupart des corps et surtout pour les liquides, la chaleur spécifique augmente, lorsque la température s'élève.

550. **Chaleurs spécifiques des gaz, sous pression constante.** — La méthode des mélanges peut également servir à déterminer les chaleurs spécifiques des gaz *sous pression constante*.

On peut concevoir, en effet, qu'une masse de gaz un peu considérable ayant été portée à une température assez élevée et exactement connue, on lui fasse traverser progressivement un serpentin environné d'eau froide, et qu'on mesure l'élévation de température de l'eau. Si

L'appareil est disposé de manière que le gaz conserve la même pression. un calcul semblable à celui qui a été effectué plus haut (544) fera connaître la chaleur spécifique à *pression constante*.

C'est une méthode de ce genre qui a été appliquée par Regnault, en perfectionnant un procédé qui avait été employé, dès le commencement de ce siècle, par Delaroche et Bérard. — Voici, d'après les expériences de Regnault, les *chaleurs spécifiques* des principaux gaz sous la pression de l'atmosphère, c'est-à-dire les quantités de chaleur nécessaires pour élever d'un degré la température de l'unité de masse de chacun d'eux, la *pression étant restée constante*.

CHALEURS SPÉCIFIQUES DE QUELQUES GAZ, SOUS LA PRESSION CONSTANTE  
D'UNE ATMOSPHÈRE

|                            |         |                             |         |
|----------------------------|---------|-----------------------------|---------|
| Acide carbonique . . . . . | 0,20246 | Brome (vapeur de) . . . . . | 0,05352 |
| — chlorhydrique . . . . .  | 0,18520 | Chlore . . . . .            | 0,12099 |
| — sulfhydrique . . . . .   | 0,24518 | Hydrogène . . . . .         | 5,40900 |
| — sulfureux . . . . .      | 0,43351 | — bicarboné . . . . .       | 0,40400 |
| Air . . . . .              | 0,25770 | — proto-carboné . . . . .   | 0,39285 |
| Ammoniaque . . . . .       | 0,50856 | Oxyde de carbone . . . . .  | 0,24500 |
| Azote . . . . .            | 0,24580 | Oxygène . . . . .           | 0,21751 |
| Bioxyde d'azote . . . . .  | 0,25175 | Protoxyde d'azote . . . . . | 0,34740 |

551. **Chaleurs spécifiques des gaz à volume constant.** — **Chaleur de dilatation.** — On peut envisager la chaleur spécifique d'un gaz sous un point de vue différent de celui qui précède.

Quand l'unité de masse d'un gaz éprouve, comme nous venons de le supposer, un *accroissement de température* d'un degré, sans variation de pression, ce gaz éprouve en même temps, par cela même, un *accroissement de volume*, et la quantité de chaleur qui lui a été fournie doit être considérée comme ayant produit à la fois ces deux effets. — Or, on peut imaginer que ces deux effets, au lieu de se produire simultanément, soient réalisés d'une manière successive. En d'autres termes, on peut concevoir la succession des deux phénomènes suivants :

1° L'unité de poids d'un gaz, assujettie d'abord à conserver un volume constant, recevra une quantité de chaleur capable d'élever sa température de 1 degré : cette quantité de chaleur est ce qu'on nommera la *chaleur spécifique à volume constant* : nous savons que la pression du gaz augmentera ; — 2° on fera éprouver ensuite à ce gaz un accroissement de volume tel, que la pression reprenne sa valeur primitive, sans que la température s'abaisse : il faudra, pour cela, lui communiquer une nouvelle quantité de chaleur, que l'on peut appeler *chaleur de dilatation*. — L'effet définitif étant évidemment le même que si le gaz avait été chauffé en conservant toujours la même pression, on voit que la *chaleur spécifique à pression constante* est la somme de la *chaleur spécifique à volume constant* et de la *chaleur de dilatation*.

Si l'on désigne ces trois quantités de chaleur respectivement par  $C$ ,  $c$  et  $l$ , on a

$$C = c + l.$$

Le tableau précédent donne, pour chaque gaz en particulier, la valeur de  $C$  ; si l'on pouvait déterminer la valeur de  $c$ , on en déduirait la valeur de  $l$ , ou réciproquement.

Or, il serait extrêmement difficile d'appliquer, à la détermination directe de la *chaleur spécifique à volume constant*  $c$ , une méthode semblable aux précédentes. En effet, il faudrait enfermer le gaz dans une enveloppe solide, rendant ses variations de volume sensiblement nulles ; le porter d'abord à une température connue, et l'introduire ensuite, avec son enveloppe, dans un calorimètre dont on mesurerait l'élévation de température. Or, il arriverait que, le poids de l'enveloppe étant nécessairement beaucoup plus grand que celui du gaz, le gaz n'exercerait sur les variations de température qu'une influence à peu près inappréciable. — La détermination directe de la *chaleur de dilatation*  $l$  présenterait des difficultés plus grandes encore. — Une méthode extrêmement ingénieuse, due à Laplace, et appliquée par Clément et Desormes, permet de résoudre la question, en fournissant la valeur du rapport des deux chaleurs spécifiques  $\frac{C}{c}$  pour un même gaz.

L'expérience a montré que la valeur de ce rapport est sensiblement la même pour tous les gaz simples, et qu'elle est égale à 1,4 ; elle est un peu différente pour les gaz composés. On obtiendra donc les chaleurs spécifiques des divers gaz à volume constant, en divisant les nombres du tableau précédent par 1,4.

Ainsi, pour l'air,  $C$  étant égal à 0,2577, la *chaleur spécifique à volume constant* serait  $\frac{0,2577}{1,4}$ , ou sensiblement 0,1697. — En employant une méthode plus précise, fondée sur la mesure de la vitesse du son dans les gaz, Dulong a obtenu le nombre 0,1688.

552. **Méthode de Laplace.** — Soit 1 gramme d'un gaz à 0°, occupant un volume  $V$  ; donnons-lui  $C$  calories, sa chaleur spécifique à pression constante, et supposons qu'il se dilate à pression constante ; le volume devient  $V + \alpha V$ , et la température finale est 1°. Si nous comprimons ce gaz jusqu'à ce que le volume redevienne  $V$ , sa température s'élèvera d'une certaine quantité  $\omega$  ; elle deviendra  $1 + \omega$ . — Ainsi, quand on fournit à ce gaz  $C$  calories, si le volume reste constant, la température s'élève de  $1 + \omega$  degrés. Par définition, si on lui donnait  $c$  calories, c'est-à-dire sa chaleur spécifique à volume constant, la variation de la température serait exactement de 1 degré. Les quantités de chaleur  $C$  et  $c$  sont proportionnelles aux variations de température  $1 + \omega$  et 1 ; on a donc, en désignant par  $\gamma$  le rapport des deux chaleurs spécifiques :

$$\gamma = \frac{C}{c} = 1 + \omega.$$

Remarquons que l'élevation de température  $\omega$  correspond à la diminution  $\alpha V$  du volume  $V + \alpha V$ ; la diminution de l'unité de volume, ou *compression*, qui a produit cette élévation de température  $\omega$ , est égale au rapport  $\frac{\alpha V}{V + \alpha V} = \frac{\alpha}{1 + \alpha}$ , ou sensiblement  $\alpha$ , en négligeant  $\frac{1}{275}$  vis-à-vis de l'unité.

Voici maintenant l'expérience, telle qu'elle sera effectivement réalisable. On prendra une masse de gaz occupant un volume quelconque  $V$ ; on réduira instantanément son volume d'une petite quantité  $v$ , c'est-à-dire que l'on comprimera l'unité de volume de  $\frac{v}{V}$ , et on déterminera l'élévation de température  $\theta$ , qui résultera de cette compression. La grandeur de l'échauffement sera proportionnelle à la grandeur de la compression, c'est-à-dire qu'on aura  $\frac{\omega}{\theta} = \frac{\alpha}{\left(\frac{v}{V}\right)}$ , d'où l'on tirera la valeur de  $\omega$ , et par suite le rapport  $\gamma$ , si  $\theta$  et  $\frac{v}{V}$  sont mesurés avec précision.

555. **Expérience de Clément et Desormes.** — Un ballon de verre, d'une très grande capacité (50 à 40 litres), communique avec un tube ver-

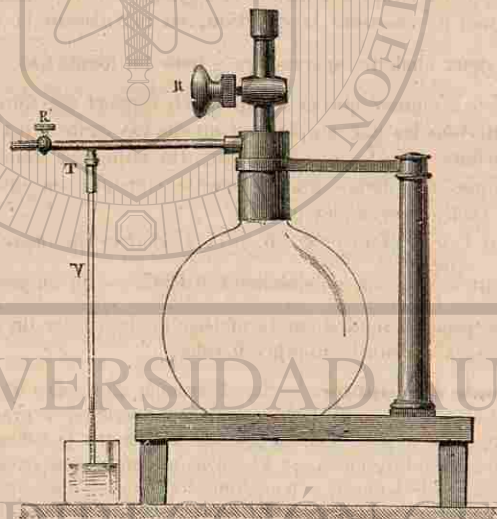


Fig. 256. — Expérience de Clément et Desormes.

tical V (fig. 256), qui plonge dans une cuvette contenant de l'acide sulfurique concentré, ou tout autre liquide non volatil. — Le robinet supérieur R étant fermé, on fait d'abord communiquer le ballon avec une pompe à main, par l'intermédiaire du robinet latéral R', et on enlève une très petite quantité d'air. On ferme ensuite ce robinet, et on attend quelque temps, jusqu'à ce

que l'air intérieur, un peu refroidi par la raréfaction, ait repris la température extérieure, que nous supposons être  $0^\circ$ . Soit alors P la pression barométrique, et soit P' la pression de l'air intérieur, mesurée au moyen de l'ascension du liquide dans le tube V.

L'expérience étant ainsi préparée, on ouvre et on referme immédiatement le robinet supérieur R : ce robinet étant très gros, cette opération a suffi pour laisser entrer dans le ballon la petite quantité d'air capable de rétablir instantanément l'égalité des niveaux à l'intérieur et à l'extérieur du tube V. — Mais l'air extérieur, en pénétrant dans le ballon, a comprimé l'air qui y était primitivement contenu, et l'a échauffé; en sorte que, à mesure que le gaz revient à la température ambiante, la pression intérieure diminue. On voit le liquide s'élever lentement dans le tube V, et conserver finalement un niveau stationnaire. Soit alors P'' la pression intérieure, fournie par l'observation de ce niveau : elle est plus petite que la pression extérieure P, mais plus grande que P', puisque l'appareil contient, à la température extérieure, un peu plus d'air qu'au commencement de l'expérience. — La connaissance de ces trois pressions P, P', P'', va nous suffire pour calculer : 1° la *compression* produite sur l'air primitivement contenu dans le ballon, par la rentrée de l'air extérieur; 2° l'*élévation de température* due à cette compression.

Soit V le volume du ballon, v le volume occupé par l'air extérieur qui a pénétré dans le ballon, lors de l'ouverture du robinet R; le volume de la *masse d'air primitive* a donc diminué de v; la compression a été  $\frac{v}{V}$ ; soit  $\theta$  l'élévation de température. — En reprenant les phases successives de l'expérience, on voit que la masse d'air primitive occupait d'abord le volume V, sous la pression P' et à la température  $0^\circ$ ; immédiatement après la compression, elle a occupé le volume  $V - v$ , sous la pression P, à la température  $\theta$ ; enfin, une fois l'équilibre établi, elle occupe le volume  $V - v$ , sous la pression P'', à la température  $0^\circ$ . — Les conditions relatives aux trois états successifs sont donc :

|     |         |     |             |
|-----|---------|-----|-------------|
| (1) | V       | P'  | $0^\circ$ . |
| (2) | $V - v$ | P   | $\theta$ .  |
| (3) | $V - v$ | P'' | $0^\circ$ . |

La comparaison du premier et du troisième état donne, d'après la loi de Mariotte, l'équation

$$(1) \quad VP' = (V - v)P'';$$

la comparaison du deuxième et du troisième état donne, d'après la loi de Gay-Lussac :

$$(2) \quad P = P''(1 + \alpha\theta).$$

De ces deux équations, on tire :

$$\frac{v}{V} = \frac{P'' - P'}{P''} \quad \alpha\theta = \frac{P - P''}{P''}.$$

et enfin :

$$\omega = \frac{\alpha\theta}{v} = \frac{P - P''}{P'' - P'}.$$

En remplaçant P, P' et P'' par les valeurs que fournit l'expérience, on trouve sensiblement, pour l'air et tous les gaz simples :  $\omega = 0,4$ . On a donc :

$$\gamma = 1,4, \quad C = c \times 1,4 \quad \text{et} \quad c = \frac{C}{1,4}$$

**554. Loi de Dulong et Petit, relative aux chaleurs spécifiques des corps simples solides ou liquides.** — Après avoir mesuré les chaleurs spécifiques d'un grand nombre de *corps simples*, solides ou liquides, Dulong et Petit ont été conduits à cette loi, que, pour la plupart de ces corps, le produit de la chaleur spécifique par l'équivalent chimique est un nombre constant et égal à 5,2; pour quelques-uns seulement, le produit est égal à 6,4. Cette loi n'est qu'approchée, ainsi que le montre le tableau suivant; pour le carbone notamment, l'écart est considérable.

| CORPS SIMPLES.      | E   | c     | cE  | CORPS SIMPLES.      | E   | c     | cE  |
|---------------------|-----|-------|-----|---------------------|-----|-------|-----|
| Carbone . . . . .   | 6   | 0,25  | 1,5 | Phosphore . . . . . | 51  | 0,19  | 5,9 |
| Magnésium . . . . . | 12  | 0,25  | 5   | Potassium . . . . . | 59  | 0,165 | 6,4 |
| Soufre . . . . .    | 16  | 0,20  | 5,2 | Brome . . . . .     | 80  | 0,08  | 6,4 |
| Fer . . . . .       | 28  | 0,11  | 5,1 | Argent . . . . .    | 108 | 0,057 | 6,2 |
| Cuivre . . . . .    | 52  | 0,095 | 5   | Iode . . . . .      | 127 | 0,051 | 6,9 |
| Zinc . . . . .      | 55  | 0,095 | 5,1 |                     |     |       |     |
| Or . . . . .        | 98  | 0,052 | 5,1 |                     |     |       |     |
| Mercure . . . . .   | 100 | 0,055 | 5,5 |                     |     |       |     |

Admettons avec Ampère que, la masse de l'atome d'hydrogène étant prise pour unité, les masses des atomes de phosphore, de potassium, de brome, d'argent et d'iode soient égales à leurs équivalents chimiques respectifs, 51, 59, 80, 108 et 127; que, pour les autres corps simples, en plus grand nombre, la masse de l'atome soit représentée par le double de l'équivalent chimique. La masse de l'atome ou *poide atomique* sera alors  $A = E$  pour quelques corps simples,  $A = 2E$  pour la plupart des corps simples. On pourra dire que le produit  $cA$  de la chaleur spécifique par le poids atomique est un nombre constant, égal à 6,4, pour les corps simples solides ou liquides.

Pour donner à la loi de Dulong et Petit un sens philosophique, remarquons que, d'après l'hypothèse d'Ampère, les masses des corps simples, 24 de magnésium, 52 de soufre, 56 de fer, 200 de mercure, 59 de potassium, 108 d'argent, etc., contiennent le même nombre d'atomes N, que 1 gramme d'hydrogène. Alors il résulte de la loi de Dulong et Petit que, pour échauffer de 1 degré le même nombre d'atomes N d'un corps simple quelconque, solide ou liquide, il faut lui donner la même quantité de chaleur, 6<sup>cal</sup>,4; en d'autres termes, tous les atomes des corps simples à l'état solide ou à l'état liquide ont la même capacité calorifique.

**555. Loi de Neumann, relative aux chaleurs spécifiques des corps composés solides ou liquides.** — Pour les *corps composés*, on trouve encore que le produit de la chaleur spécifique par le poids atomique est un nombre constant, mais à la condition de ne comparer entre eux que des corps ayant une *composition chimique analogue*. — Ainsi, pour tous les oxydes ayant la formule générale MO (M désignant le poids atomique d'un métal quelconque, et O le poids atomique de l'oxygène qui est égal à 16), le

produit est toujours peu différent de 11,5. — Pour les protochlorures métalliques, il est peu différent de 18,7, etc. — Cette extension de la loi de Dulong et Petit a été formulée par Neumann, et vérifiée par Regnault pour les principaux groupes de corps composés.

**556. Loi de Wœstyn.** — La capacité calorifique d'un corps composé, à l'état solide ou à l'état liquide, est égale à la somme des capacités calorifiques de ses éléments, considérés sous le même état physique que le composé. — Ainsi, 44 grammes de sulfure de fer contiennent 28 grammes de fer et 16 grammes de soufre, dont les chaleurs spécifiques sont respectivement 0,11 et 0,20; si l'on désigne par  $x$  la chaleur spécifique du sulfure de fer, on doit avoir :  $44 \times x = 28 \times 0,11 + 16 \times 0,20$ ; d'où  $x = 0,14$ ; c'est en effet le résultat que donne la détermination expérimentale.

L'exactitude de la loi de Wœstyn est bien mieux établie que celle de la loi de Dulong et Petit. Connaissant la chaleur spécifique d'un oxyde métallique et celle du métal qui entre dans sa constitution, on peut, en s'appuyant sur la loi de Wœstyn, calculer la chaleur spécifique de l'oxygène, à l'état solide; ce calcul, effectué sur un oxyde quelconque, fournit toujours le même résultat.

**557. Application de la loi de Dulong et Petit aux gaz simples.** — On a été conduit à admettre que des volumes égaux des gaz simples, pris à la même température et sous la même pression, contiennent le même nombre de molécules tétraatomiques. Des volumes égaux des gaz simples, sous la pression atmosphérique et à la température 0°, contiennent donc le même nombre d'atomes; et si, de même qu'à l'état solide, la capacité calorifique est la même pour l'atome de chaque gaz simple, la capacité calorifique de l'unité de volume des divers gaz simples doit être la même. C'est ce que Delaroche et Bérard avaient constaté approximativement; c'est aussi ce que les expériences ultérieures ont vérifié d'une manière plus précise, au moins pour les gaz simples suffisamment éloignés de leur point de liquéfaction.

Cette loi est encore exacte pour les gaz composés, tels que le bioxyde d'azote, qui se forment sans contraction.

On sait que 11 litres d'hydrogène à 0° et sous la pression de 76 centimètres pèsent 1 gramme. Pour les autres gaz simples, à volume égal, les masses sont : 14<sup>gr</sup> pour l'azote; 35<sup>gr</sup>,5 pour le chlore; 16<sup>gr</sup> pour l'oxygène. Si nous admettons l'hypothèse faite sur la constitution des gaz, ces mêmes nombres représentent les poids atomiques de l'azote, du chlore et de l'oxygène. — Soit A le poids atomique d'un gaz simple et C sa chaleur spécifique, le produit CA doit être le même pour tous les gaz simples. Ce produit représente la capacité calorifique de 11 litres de chacun de ces gaz, le volume étant mesuré à 0° et sous la pression atmosphérique; il représente encore la capacité calorifique de N atomes à l'état gazeux, N étant le nombre d'atomes contenus dans 1 gramme d'hydrogène ou dans A grammes d'un corps simple quelconque. Le tableau suivant montre que la loi est vérifiée, sauf pour le chlore.

|                     | A  | C     | CA    |                   | A    | C     | CA    |
|---------------------|----|-------|-------|-------------------|------|-------|-------|
| Hydrogène . . . . . | 1  | 5,409 | 5,409 | Oxygène . . . . . | 16   | 0,217 | 5,472 |
| Azote . . . . .     | 14 | 0,214 | 5,416 | Chlore . . . . .  | 35,5 | 0,121 | 4,295 |

Il est à remarquer que la capacité calorifique de l'atome simple n'est pas la même, suivant que le corps est solide ou gazeux; la capacité calorifique

de  $N$  atomes simples, groupés à l'état solide ou à l'état liquide, est  $6^{m},4$  quand ces mêmes atomes sont groupés à l'état gazeux, leur capacité calorifique n'est plus que  $3,4$ .

II. — MESURE DES CHALEURS DE FUSION ET DE VAPORISATION.

558. **Chaleur de fusion.** — On nomme *chaleur latente de fusion* d'un corps, ou simplement *chaleur de fusion*, la quantité de chaleur qu'absorbe 1 gramme de ce corps, pour fondre sans élévation de température. — Ainsi, la chaleur de fusion de la glace est la quantité de chaleur qu'il faut fournir à 1 gramme de glace à  $0^{\circ}$ , pour le transformer en eau liquide, à la même température.

559. **Détermination de la chaleur de fusion de la glace.** — Pour déterminer la chaleur de fusion de la glace, on peut employer la méthode des mélanges.

Dans un calorimètre  $V$  (fig. 255), contenant un poids connu d'eau  $M$ , à une température  $t$  supérieure de quelques degrés à celle de l'air environnant, on plonge un morceau de glace à  $0^{\circ}$ , après l'avoir essuyé avec du papier buvard; on agite le liquide pour hâter la fusion, et l'on note la température finale  $\theta$  du mélange. Quant au poids  $P$  de la glace, on ne peut songer à l'obtenir avant l'expérience, par une pesée directe, pendant laquelle il serait impossible d'éviter la fusion: on le détermine, une fois l'expérience terminée, par l'accroissement de poids du calorimètre. — Nous exprimerons que la quantité de chaleur abandonnée par l'eau et par le calorimètre, qui se sont refroidis ensemble de  $t$  à  $\theta$ , a été employée, d'une part à fondre la glace, d'autre part à échauffer de  $0$  à  $\theta$  l'eau provenant de la fusion.

La quantité de chaleur abandonnée par l'eau est  $M(t - \theta)$ ; quant au calorimètre, si l'on désigne par  $p$  son poids et par  $c$  la chaleur spécifique du laiton, il a perdu  $pc(t - \theta)$ . D'autre part, si l'on désigne par  $x$  la chaleur de fusion de la glace, le poids  $P$  a absorbé, en fondant, une quantité de chaleur  $Px$ ; les  $P$  grammes d'eau qui proviennent de la fusion ont absorbé ensuite, en s'échauffant de  $0$  à  $\theta$ , une quantité de chaleur  $P\theta$ . On aura donc l'équation

$$(M + pc)(t - \theta) = Px + P\theta,$$

d'où l'on tirera la valeur de  $x$ .

En opérant ainsi, MM. de la Provostaye et Desains ont trouvé, pour la chaleur de fusion de la glace, le nombre 79,25.

560. **Méthode de Bunsen.** — Le calorimètre à glace de Bunsen, qui a été décrit plus haut (542), peut aussi servir à déterminer la chaleur de fusion de la glace. Soit  $k$  la constante du calorimètre, c'est-à-dire le nombre de divisions

dont rétrograde le mercure dans le tube gradué, quand on cède à l'appareil une calorie;  $k$  est déterminé par une expérience calorimétrique; un jaugeage fera connaître le volume  $v$  d'une division du tube;  $kv$  est donc la contraction qui correspond à une calorie. — Bunsen a déterminé la diminution de volume que subit 1 gramme de glace à  $0^{\circ}$ , au moment de la fusion; il a trouvé  $0^{m},09069$ . Cette contraction correspond à l'absorption de  $x$  calories,  $x$  désignant la chaleur de fusion; on a donc la proportionnalité

$$\frac{x}{1} = \frac{0,09069}{kv};$$

en remplaçant  $kv$  par sa valeur, on trouve  $x = 80,45$ .

561. **Détermination des chaleurs de fusion des diverses substances.** — Proposons-nous maintenant de déterminer, par la méthode des mélanges, la chaleur de fusion d'un corps qui soit solide à la température ordinaire, et dont le point de fusion ne soit pas très supérieur à  $100^{\circ}$ , de manière que ce corps puisse être introduit en fusion dans l'eau, sans donner naissance à un dégagement appréciable de vapeur d'eau. On introduira un poids connu  $P$  de ce corps, à une température  $T$  supérieure à son point de fusion, dans une masse d'eau  $M$  à une température  $t$ , et on déterminera la température finale  $\theta$ . — On obtiendra l'équation du problème en égalant: d'une part, la quantité de chaleur gagnée par l'eau et le calorimètre, en s'échauffant de  $t$  à  $\theta$ ; d'autre part, la somme des quantités de chaleur que le corps a perdues,  $1^{\circ}$  en se refroidissant depuis la température  $T$  jusqu'à la température  $T'$  de sa solidification,  $2^{\circ}$  en se solidifiant,  $3^{\circ}$  en se refroidissant de  $T'$  à  $\theta$  degrés. — En désignant par  $\gamma$  et  $\gamma'$  les chaleurs spécifiques du corps à l'état liquide et à l'état solide, on aura

$$(M + pc)(\theta - t) = P\gamma(T - T') + Px + P\gamma'(T' - \theta).$$

Si les chaleurs spécifiques  $\gamma$  et  $\gamma'$  ne sont pas connues, on fera deux autres expériences, avec des poids notablement différents; on aura ainsi, en tout, trois équations, qui serviront à calculer  $x$ ,  $\gamma$  et  $\gamma'$ .

Voici quelques-uns des résultats obtenus:

|                     | POINT<br>DE FUSION. | CHALEUR<br>DE FUSION. | CHALEUR SPÉCIFIQUE<br>A L'ÉTAT |          |
|---------------------|---------------------|-----------------------|--------------------------------|----------|
|                     |                     |                       | solide.                        | liquide. |
| Bismuth . . . . .   | 262*                | 13,64                 | 0,051                          | 0,056    |
| Eau . . . . .       | 0                   | 79,25                 | 0,504                          | 1,000    |
| Étain . . . . .     | 250                 | 14,25                 | 0,056                          | 0,064    |
| Mercure . . . . .   | -40                 | 2,82                  | 0,052                          | 0,055    |
| Phosphore . . . . . | 44                  | 5,05                  | 0,19                           | 0,20     |
| Plomb . . . . .     | 320                 | 9,57                  | 0,051                          | 0,040    |
| Soufre . . . . .    | 110                 | 9,57                  | 0,205                          | 0,254    |
| Zinc . . . . .      | 430                 | 28,15                 | 0,095                          | —        |



362. **Chaleur de vaporisation.** — On nomme *chaleur latente de vaporisation* d'un liquide, ou simplement *chaleur de vaporisation*, à une température déterminée, la quantité de chaleur qu'absorbe 1 gramme de ce liquide, à cette température, pour se transformer en vapeur saturante. — Ainsi, la chaleur de vaporisation de l'eau, à 100°, est la quantité de chaleur qu'il faut donner à 1 gramme d'eau, déjà chauffé à 100°, pour le transformer en vapeur saturante à la même température.

365. **Détermination de la chaleur de vaporisation de l'eau à 100°.** — Les premières expériences précises sur la chaleur de vapo-

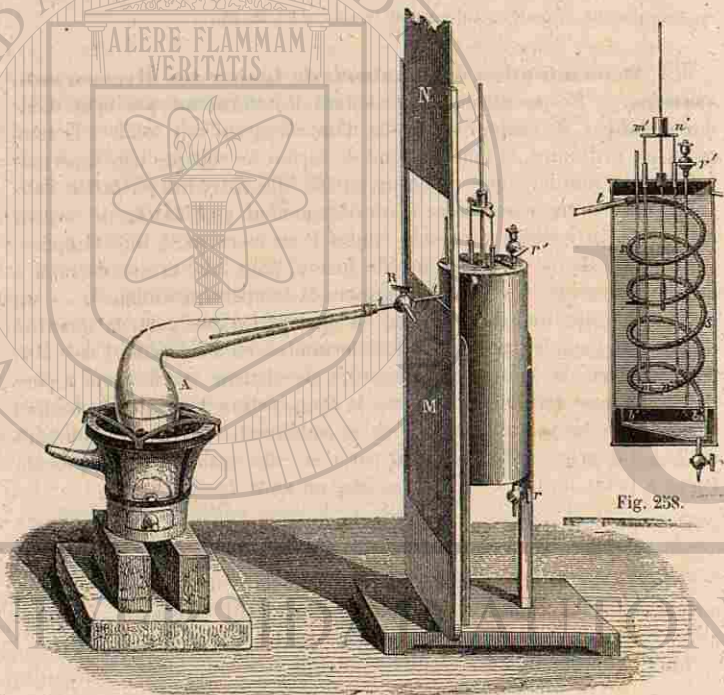


Fig. 257. — Chaleur de vaporisation de l'eau. (Appareil de Despretz.)

risation de l'eau ont été faites par Despretz, au moyen de l'appareil représenté par la figure 257.

La cornue A contient de l'eau, qu'on portera à l'ébullition; elle communique par le tube *tt* avec un calorimètre, dont la coupe est représentée par la figure 258; *ss* est un serpentin qui vient s'ouvrir dans une boîte métallique *bb'*, entourée de tous côtés par l'eau du calorimètre. Un agitateur *mm'n'* sert à rendre uniforme la température de

cette eau : l'écran MN (fig. 257) préserve le calorimètre contre le rayonnement du fourneau.

Pour que la pression intérieure reste constamment égale à la pression atmosphérique, on a adapté à la partie supérieure de la boîte *bb'* (fig. 258) un petit tube métallique vertical; le robinet *r'* qui le termine reste ouvert pendant l'expérience actuelle. La vapeur arrive dans le serpentin, où elle se liquéfie; l'eau provenant de cette condensation se rassemble dans la caisse *bb'* et y prend la température du calorimètre. Lorsqu'on met fin à l'expérience, on note la température du calorimètre; puis, ouvrant le robinet *r*, on recueille l'eau condensée et on en détermine le poids (\*). — On exprime alors que la quantité de chaleur gagnée par l'eau et par le calorimètre est égale à la somme des quantités de chaleur cédées, 1° par la vapeur en se liquéfiant, 2° par l'eau condensée en se refroidissant depuis 100° jusqu'à la température finale.

Soit *t* la température initiale du calorimètre, *M* le poids de l'eau qu'il contient, *p* le poids du serpentin et du calorimètre, et *c* la chaleur spécifique du cuivre; soit *P* le poids de la vapeur condensée, *T* la température d'ébullition, *x* la chaleur de vaporisation de l'eau, et *θ* la température finale; on aura l'équation

$$(M + pc)(\theta - t) = Px + P(T - \theta),$$

d'où l'on tirera la valeur de *x*.

Despretz a trouvé, pour la chaleur de vaporisation de l'eau à 100°, le nombre 540. — Des expériences plus précises de Regnault ont donné 537.

364. **Chaleur de vaporisation de l'eau à diverses températures.** — Pour déterminer la chaleur de vaporisation de l'eau à des températures autres que 100°, il suffit d'augmenter ou de diminuer la pression, de manière à faire bouillir l'eau à la température voulue; c'est à quoi l'on arrive en faisant communiquer l'intérieur de l'appareil, par l'intermédiaire du robinet *r'*, soit avec une pompe de compression, soit avec une machine pneumatique, selon que l'on veut obtenir l'ébullition au-dessus de 100° ou au-dessous de 100°.

(\*) Il importe d'éviter que la vapeur n'entraîne mécaniquement avec elle, dans le calorimètre, des particules d'eau liquide; dans ce but, on incline le tube de prise de vapeur, comme le montre la figure 257, et on le fait plonger assez avant dans la cornue. La vapeur qui y pénètre se trouve ainsi, sur une portion de son parcours, protégée contre le refroidissement par la vapeur qui l'enveloppe; s'il s'en liquéfie un peu, elle retombe à l'état liquide dans la cornue.

Il est nécessaire, enfin, de n'admettre la vapeur dans le calorimètre que lorsque l'eau est en pleine ébullition. A cet effet, on a placé sur le tube *tt'* un robinet *R* à trois voies, semblable à celui que représente la figure 156; il permet de faire communiquer à volonté la cornue avec l'extérieur ou avec le serpentin. On établit d'abord la première communication; puis, quand l'eau est en pleine ébullition, on tourne le robinet, de manière à faire arriver la vapeur dans le calorimètre.

565. **Chaleur totale de vaporisation de l'eau.** — On nomme *chaleur totale de vaporisation de l'eau à une température déterminée t*, la quantité de chaleur qu'il faut fournir à 1 gramme d'eau liquide à 0°, pour le transformer en vapeur saturante à la température t.

La chaleur spécifique de l'eau liquide étant toujours sensiblement égale à l'unité, si la chaleur de vaporisation était une constante  $\lambda$ , indépendante de la température de vaporisation, la chaleur totale de vaporisation à t degrés serait toujours exprimée par la somme  $t + \lambda$ . — Les expériences de Regnault ont montré qu'il n'en est pas rigoureusement ainsi, mais que la chaleur totale de vaporisation de l'eau à une température t peut, en général, être représentée par la formule empirique :

$$\text{Chal. tot.} = 606,5 + 0,505 t.$$

Si l'on en retranche la quantité de chaleur nécessaire pour élever 1 gramme d'eau de 0° à t, c'est-à-dire le nombre t lui-même, on obtient pour valeur de la chaleur latente de vaporisation  $\lambda$ , à la température t :

$$\lambda = 606,5 - 0,695 t.$$

566. **Chaleurs de vaporisation des divers liquides.** — Des méthodes semblables, appliquées à divers liquides, ont donné pour les valeurs de la chaleur de vaporisation, sous la pression de l'atmosphère, les résultats suivants :

|                                   | POINTS<br>D'ÉBULLITION. | CHALEURS<br>DE VAPORISATION. |
|-----------------------------------|-------------------------|------------------------------|
| Acide acétique . . . . .          | 120°                    | 102                          |
| Alcool . . . . .                  | 78,5                    | 208                          |
| Eau . . . . .                     | 100,0                   | 557                          |
| Esprit de bois . . . . .          | 66,5                    | 264                          |
| Essence de térébenthine . . . . . | 161,0                   | 69                           |
| Éther sulfurique . . . . .        | 53,5                    | 91                           |

De tous les liquides, l'eau est, comme on le voit, celui pour lequel la chaleur de vaporisation a la plus grande valeur.

### III. — MESURE DES CHALEURS DE COMBINAISON.

567. **Quantités de chaleur dégagées ou absorbées dans les phénomènes chimiques.** — Lorsque deux ou plusieurs corps, mis en présence à une même température  $t_0$ , arrivent à se combiner entre eux, l'expérience montre qu'il y a toujours élévation de température, c'est-à-dire que la réaction chimique produit un *dégagement de chaleur*. — Or, supposons que l'expérience soit disposée de façon que toute cette chaleur puisse se communiquer aux corps environnants, en sorte que les produits de la réaction reviennent à la température initiale  $t_0$  : la mesure de la quantité de chaleur qui aura été absorbée

par les corps environnants fournira une évaluation de la chaleur dégagée par la combinaison elle-même.

Quant à la disposition expérimentale à employer pour mesurer ces quantités de chaleur, on voit qu'il suffira d'effectuer les réactions au sein d'un calorimètre ayant une masse assez considérable pour que la température finale, commune au calorimètre et aux produits de la réaction, ait une valeur  $t'$  peu différente de la température initiale  $t_0$ . — En tenant compte des chaleurs spécifiques des produits de la réaction, on obtiendra une équation qui donnera la valeur de la quantité de chaleur dégagée ou absorbée, pour l'unité de poids de l'un des corps employés. — Il sera facile enfin d'en déduire la *chaleur de combinaison* du composé formé; on appelle ainsi la quantité de chaleur correspondant à la formation de E grammes du composé, E représentant son équivalent chimique. La chaleur de combinaison est le plus souvent assez considérable; aussi, l'exprime-t-on habituellement en grandes calories. Par exemple, la chaleur de combinaison de l'eau à l'état liquide est 54500 calories, ou, en grandes calories, 54<sup>cal</sup>.5.

568. — Lorsque, parmi les éléments ou les produits de la réaction, se trouvent des gaz ou des vapeurs, on doit faire usage d'un calorimètre du genre de celui qui a été employé par MM. Favre et Silbermann (*fig. 259*).

Les gaz sont amenés, par des tubes tels que BB' et CC', dans un cylindre métallique A, où s'effectue la réaction; un tube plus large FK, fermé à sa partie supérieure par une plaque de verre, permet à l'opérateur de voir ce qui se passe dans l'appareil. Les produits gazeux de la réaction traversent, avant de s'échapper dans l'atmosphère, le serpentín H, à la partie inférieure duquel se trouve une petite boîte G destinée à recueillir les liquides résultant de la condensation des vapeurs. Le cylindre A et le serpentín sont placés dans une masse d'eau, contenue dans un vase calorimétrique mm: c'est la variation de température de cette eau qui servira à évaluer la quantité de chaleur correspondante à la réaction. — Pour éviter la déperdition de chaleur, on place le calorimètre

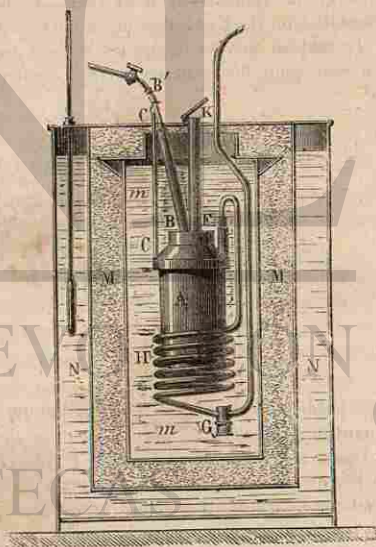


Fig. 259.  
Calorimètre de MM. Favre et Silbermann.

dans une enceinte métallique MM, contenant du duvet de cygne. Enfin, le tout est placé dans un vase NN, rempli d'eau, pour éliminer l'influence des variations de la température ambiante : un thermomètre permet de s'assurer que la température de cette eau est restée constante pendant l'expérience.

Cette disposition expérimentale a été perfectionnée par M. Berthelot, de manière à faire disparaître à peu près complètement les causes d'erreur.

Pour les réactions dans lesquelles n'intervient aucun corps gazeux, MM. Favre et Silbermann ont fait usage d'un calorimètre disposé à peu près comme le calorimètre de glace de Bunsen (542), mais dans lequel le corps calorimétrique est une masse considérable de mercure, qui indique, par ses variations de volume, les variations de température qu'elle éprouve.

Il est préférable d'employer le calorimètre de glace de Bunsen (542). On introduit dans le moufle les substances dont la réaction dégage de la chaleur, et on note la rétrogradation du mercure dans le tube horizontal; le nombre de calories dégagées dans la réaction s'obtient en faisant le produit du nombre de divisions observé, par la constante du calorimètre.

**569. Chaleur de combustion des principaux corps combustibles.** — Parmi les résultats qu'a fournis l'étude des diverses réactions chimiques, nous signalerons, en particulier, ceux qui sont relatifs aux quantités de chaleur dégagées dans les combustions, c'est-à-dire dans les phénomènes de combinaison directe des corps avec l'oxygène. — Nous appellerons *chaleur de combustion* d'un corps, le nombre de calories dégagées par la combinaison de 1 gramme de ce corps avec l'oxygène.

Le tableau suivant donne les valeurs approximatives de la chaleur de combustion, pour les principaux corps combustibles.

|  | CHALEURS<br>DE COMBUSTION. |
|--|----------------------------|
| Hydrogène (produisant de l'eau à l'état liquide) . . . . .       | 51 500                     |
| — — — — — à l'état gazeux) . . . . .                             | 29 400                     |
| Carbone (produisant de l'acide carbonique) . . . . .             | 7 850                      |
| Soufre (produisant de l'acide sulfurique) . . . . .              | 2 260                      |
| Phosphore (produisant de l'acide phosphorique) . . . . .         | 5 870                      |
| Protocarbure d'hydrogène C <sup>2</sup> H <sup>2</sup> . . . . . | 45 425                     |
| Bicarbure d'hydrogène C <sup>2</sup> H <sup>4</sup> . . . . .    | 11 860                     |
| Essence de térébenthine . . . . .                                | 10 850                     |
| Huile d'olive . . . . .  | 9 860                      |
| Alcool . . . . .   | 7 180                      |
| Ether . . . . .  | 9 050                      |

A poids égal, c'est donc l'hydrogène qui dégage, en brûlant, la plus grande quantité de chaleur.

Quant aux corps qu'on emploie le plus fréquemment comme combustibles, la houille, le coke, le bois, la tourbe, les nombres qui représentent leurs chaleurs de combustion sont extrêmement variables, suivant le degré de pureté de ces corps. — Ainsi, pour la houille, suivant qu'elle contient plus ou moins d'hydrogène, la chaleur de combustion peut varier de 7500 à 8900. — Pour le coke, suivant qu'il est plus ou moins pur, la chaleur de combustion varie de 6500 à 7500. — Les diverses qualités de bois, préalablement desséchées, fournissent des nombres qui varient entre 2600 et 5000. — Enfin, les chaleurs de combustion de la tourbe varient entre 5000 et 5400.

## CHAPITRE X

### CHAUFFAGE ET MACHINES A VAPEUR

#### I. — NOTIONS SUR LES DIVERS MODÉS DE CHAUFFAGE.

**570. Appareils de chauffage usuels. — Foyers découverts. poêles.** — Les appareils employés le plus ordinairement pour le chauffage de nos habitations peuvent se rapporter à deux types principaux : les *foyers découverts* et les *poêles*.

Dans les *foyers découverts*, ou cheminées d'appartements, on n'utilise que la chaleur rayonnée par le combustible : l'air et les gaz qui s'échappent par la cheminée emportent avec eux une grande quantité de chaleur, qui ne contribue pas au chauffage.

Les *poêles* utilisent une fraction beaucoup plus considérable de la chaleur dégagée par le combustible : en effet, leurs parois, et celles des tuyaux placés dans l'appartement, transmettent une grande quantité de chaleur, soit sous forme de chaleur rayonnante, soit en échauffant par contact l'air qui se renouvelle sans cesse autour d'eux.

Mais, si les poêles donnent ainsi un chauffage plus économique que les foyers découverts, ils ne présentent généralement pas les mêmes avantages, au point de vue de l'hygiène. En effet, pour entretenir des conditions de salubrité suffisantes dans les pièces habitées, c'est-à-dire pour fournir la quantité d'oxygène nécessaire à la respiration, et enlever les émanations produites par la transpiration pulmonaire ou cutanée, il faut assurer un renouvellement de l'air correspondant au moins à 6 ou 8 mètres cubes par individu et par heure. Or, les ouvertures des poêles ne livrent généralement passage qu'à la quantité d'air nécessaire à la combustion; aussi l'usage en est-il insalubre, quand la ventilation n'est pas assurée d'une autre manière.

Il n'est pas de même des foyers découverts, dont les larges ouvertures produisent un appel d'air beaucoup plus considérable. — On peut d'ailleurs mieux utiliser la chaleur produite, en établissant, autour des parois du foyer, des espaces où l'on fait arriver l'air extérieur, par

dans une enceinte métallique MM, contenant du duvet de cygne. Enfin, le tout est placé dans un vase NN, rempli d'eau, pour éliminer l'influence des variations de la température ambiante : un thermomètre permet de s'assurer que la température de cette eau est restée constante pendant l'expérience.

Cette disposition expérimentale a été perfectionnée par M. Berthelot, de manière à faire disparaître à peu près complètement les causes d'erreur.

Pour les réactions dans lesquelles n'intervient aucun corps gazeux, MM. Favre et Silbermann ont fait usage d'un calorimètre disposé à peu près comme le calorimètre de glace de Bunsen (542), mais dans lequel le corps calorimétrique est une masse considérable de mercure, qui indique, par ses variations de volume, les variations de température qu'elle éprouve.

Il est préférable d'employer le calorimètre de glace de Bunsen (542). On introduit dans le moufle les substances dont la réaction dégage de la chaleur, et on note la rétrogradation du mercure dans le tube horizontal; le nombre de calories dégagées dans la réaction s'obtient en faisant le produit du nombre de divisions observé, par la constante du calorimètre.

**569. Chaleur de combustion des principaux corps combustibles.** — Parmi les résultats qu'a fournis l'étude des diverses réactions chimiques, nous signalerons, en particulier, ceux qui sont relatifs aux quantités de chaleur dégagées dans les combustions, c'est-à-dire dans les phénomènes de combinaison directe des corps avec l'oxygène. — Nous appellerons *chaleur de combustion* d'un corps, le nombre de calories dégagées par la combinaison de 1 gramme de ce corps avec l'oxygène.

Le tableau suivant donne les valeurs approximatives de la chaleur de combustion, pour les principaux corps combustibles.

|  | CHALEURS<br>DE COMBUSTION. |
|--|----------------------------|
| Hydrogène (produisant de l'eau à l'état liquide) . . . . .       | 51 500                     |
| — — — — à l'état gazeux) . . . . .                               | 29 400                     |
| Carbone (produisant de l'acide carbonique) . . . . .             | 7 850                      |
| Soufre (produisant de l'acide sulfurique) . . . . .              | 2 260                      |
| Phosphore (produisant de l'acide phosphorique) . . . . .         | 5 870                      |
| Protocarbure d'hydrogène C <sup>2</sup> H <sup>2</sup> . . . . . | 45 425                     |
| Bicarbure d'hydrogène C <sup>2</sup> H <sup>4</sup> . . . . .    | 11 860                     |
| Essence de térébenthine . . . . .                                | 10 850                     |
| Huile d'olive . . . . .  | 9 860                      |
| Alcool . . . . .   | 7 180                      |
| Ether . . . . .  | 9 050                      |

A poids égal, c'est donc l'hydrogène qui dégage, en brûlant, la plus grande quantité de chaleur.

Quant aux corps qu'on emploie le plus fréquemment comme combustibles, la houille, le coke, le bois, la tourbe, les nombres qui représentent leurs chaleurs de combustion sont extrêmement variables, suivant le degré de pureté de ces corps. — Ainsi, pour la houille, suivant qu'elle contient plus ou moins d'hydrogène, la chaleur de combustion peut varier de 7500 à 8900. — Pour le coke, suivant qu'il est plus ou moins pur, la chaleur de combustion varie de 6500 à 7500. — Les diverses qualités de bois, préalablement desséchés, fournissent des nombres qui varient entre 2600 et 5000. — Enfin, les chaleurs de combustion de la tourbe varient entre 5000 et 5400.

## CHAPITRE X

### CHAUFFAGE ET MACHINES A VAPEUR

#### I. — NOTIONS SUR LES DIVERS MODÉS DE CHAUFFAGE.

**570. Appareils de chauffage usuels. — Foyers découverts. poêles.** — Les appareils employés le plus ordinairement pour le chauffage de nos habitations peuvent se rapporter à deux types principaux : les *foyers découverts* et les *poêles*.

Dans les *foyers découverts*, ou cheminées d'appartements, on n'utilise que la chaleur rayonnée par le combustible : l'air et les gaz qui s'échappent par la cheminée emportent avec eux une grande quantité de chaleur, qui ne contribue pas au chauffage.

Les *poêles* utilisent une fraction beaucoup plus considérable de la chaleur dégagée par le combustible : en effet, leurs parois, et celles des tuyaux placés dans l'appartement, transmettent une grande quantité de chaleur, soit sous forme de chaleur rayonnante, soit en échauffant par contact l'air qui se renouvelle sans cesse autour d'eux.

Mais, si les poêles donnent ainsi un chauffage plus économique que les foyers découverts, ils ne présentent généralement pas les mêmes avantages, au point de vue de l'hygiène. En effet, pour entretenir des conditions de salubrité suffisantes dans les pièces habitées, c'est-à-dire pour fournir la quantité d'oxygène nécessaire à la respiration, et enlever les émanations produites par la transpiration pulmonaire ou cutanée, il faut assurer un renouvellement de l'air correspondant au moins à 6 ou 8 mètres cubes par individu et par heure. Or, les ouvertures des poêles ne livrent généralement passage qu'à la quantité d'air nécessaire à la combustion; aussi l'usage en est-il insalubre, quand la ventilation n'est pas assurée d'une autre manière.

Il n'est pas de même des foyers découverts, dont les larges ouvertures produisent un appel d'air beaucoup plus considérable. — On peut d'ailleurs mieux utiliser la chaleur produite, en établissant, autour des parois du foyer, des espaces où l'on fait arriver l'air extérieur, par

des conduits s'ouvrant au dehors de l'édifice; cet air, après s'être échauffé, vient se rendre dans l'appartement par des *bouches de chaleur*.

**571. Chauffage des grands édifices.** — Dans les grands édifices, on préfère souvent installer un système général de chauffage : ces systèmes sont assez nombreux; nous en indiquerons seulement les principes généraux.

Le chauffage par l'air chaud consiste à introduire, dans les pièces, de l'air pris au dehors, mais préalablement échauffé dans des tuyaux qui traversent un calorifère placé dans les caves de l'édifice. Ce mode de chauffage n'est avantageux que si l'air échauffé n'a pas un trop long trajet à parcourir, avant d'arriver aux pièces dans lesquelles il doit être distribué.

Le chauffage par circulation d'eau chaude exige un appareil plus compliqué; la figure 260 en indique les dispositions essentielles. Il se compose : 1° d'une chaudière A, placée dans les caves; 2° d'un tuyau d'ascension BC, partant du sommet de la chaudière et débouchant dans un réservoir D établi dans les combles; 3° d'une première série de tuyaux descendants *efg, hil*, qui distribuent l'eau du réservoir D dans des poêles E, F; 4° d'une autre série de tuyaux descendants *mno, rst*, qui ramènent l'eau des poêles à la chaudière.

La chaudière A est ordinairement en forme de cloche, et à foyer intérieur, afin de présenter une surface de chauffe aussi grande que possible; elle est entièrement pleine d'eau, de même que le réservoir D, les poêles et les tuyaux. Le réservoir D, qu'on nomme *vase d'expansion*, est muni d'une soupape *s* analogue à celle de la marmite de Papin (fig. 251); cette soupape sert à livrer passage à l'air qui se dégage de l'eau sous l'influence de la chaleur, et à régler la pression dans l'appareil. — Chacun des poêles E, F, est formé de deux parois cylindriques concentriques : l'espace compris entre les deux parois renferme de

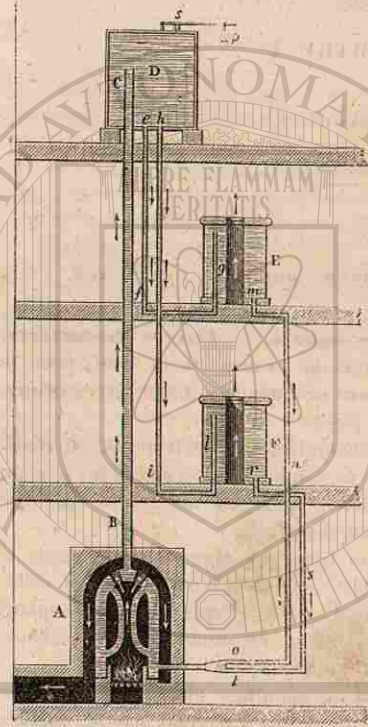


Fig. 260.

Chauffage par circulation d'eau chaude.

l'eau; dans le cylindre intérieur s'échauffe l'air amené du dehors par des tuyaux placés sous le plancher.

L'eau échauffée dans la chaudière monte dans le tuyau BC, et gagne la partie supérieure du vase d'expansion; en même temps, l'eau moins chaude dont elle prend la place descend par les tubes *efg, hil*, et se rend aux poêles. Enfin, la circulation se complète par les tubes *mno, rst*, qui ramènent l'eau à la chaudière.

L'eau étant le corps qui a la plus grande chaleur spécifique (549), les variations qui peuvent se produire dans l'activité du foyer n'ont que peu d'influence sur la température d'une masse d'eau aussi considérable. Pour la même raison, cette masse d'eau peut abandonner des quantités de chaleur très grandes, sans éprouver un grand abaissement de température. — Aussi, ces appareils offrent-ils l'avantage d'entretenir une température douce et constante. Mais les frais d'établissement en sont considérables, en raison de la résistance que doivent avoir leurs diverses parties, pour supporter les pressions qu'elles éprouvent de la part de la colonne d'eau qui les surmonte.

Pour le chauffage par la vapeur d'eau, on emploie des appareils dont la disposition générale est analogue à la précédente. Ils se composent : 1° d'une chaudière à vapeur; 2° de tuyaux qui conduisent la vapeur dans des poêles à condensation; 3° de tuyaux destinés à ramener à la chaudière l'eau de condensation. — L'efficacité de ce mode de chauffage résulte de la grande quantité de chaleur qu'abandonne la vapeur au moment de la liquéfaction (566).

## II. — CHAUDIÈRES A VAPEUR.

**572. Des moteurs à vapeur, en général.** — Un moteur à vapeur comprend, en général : d'une part, un *générateur* de vapeur, ou *chaudière*; d'autre part, une *machine* dans laquelle la tension de cette vapeur est utilisée, pour produire un mouvement qui est ensuite transmis à divers organes.

**573. Chaudière à bouilleurs.** — Une chaudière à bouilleurs se compose essentiellement d'un gros cylindre horizontal A (fig. 261 et 262), qui est le *corps* de la chaudière, et de deux cylindres plus petits N, N', qui sont les *bouilleurs*; la communication entre le corps et les bouilleurs est établie par une paire de tubulures C, D, ou *évents*. L'eau remplit les bouilleurs et une partie du corps de la chaudière. Le foyer O est placé au-dessous de l'une des extrémités de la chaudière. — Pour augmenter la surface de chauffe, on emploie généralement la disposition suivante. Une voûte horizontale, construite au niveau de l'axe des bouilleurs, partage tout le fourneau en deux étages (fig. 262), et l'étage

supérieur est lui-même divisé en deux galeries, par une cloison verticale qui n'est interrompue qu'à son extrémité la plus voisine du foyer.

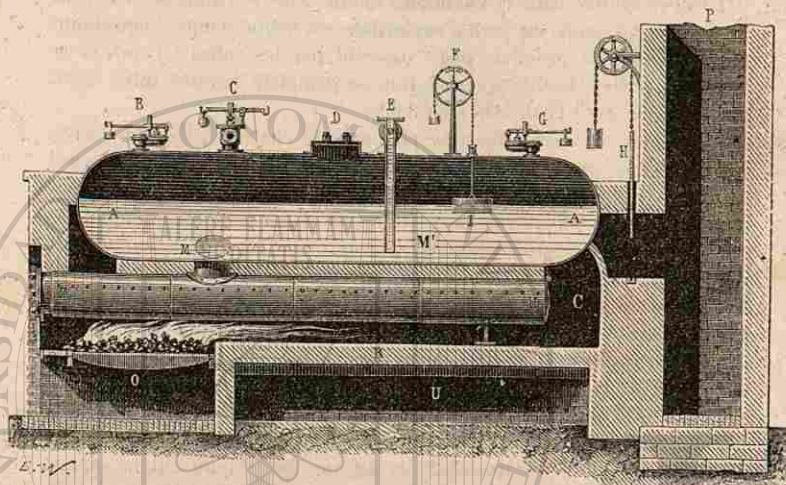


Fig. 261. — Chaudière à bouilleurs.

La flamme et les gaz chauds qui viennent du foyer, après avoir parcouru une première fois toute la longueur du fourneau d'avant en arrière, dans l'étage inférieur (*premier carneau*), reviennent d'arrière en avant par l'un des compartiments ménagés dans l'étage supérieur (*deuxième carneau*); enfin ils retournent par l'autre compartiment (*troisième carneau*) vers la cheminée P. C'est l'ensemble de toutes ces parties qui constitue la *surface de chauffe*.

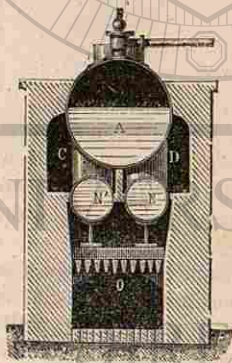


Fig. 262.

#### 374. Appareils indicateurs du niveau de l'eau.

— Il est indispensable que le niveau de l'eau dans la chaudière ne s'abaisse jamais de manière à laisser à découvert une portion de paroi directement chauffée. En effet, une portion de paroi qui serait en contact avec la flamme par sa surface extérieure, et qui ne serait pas en contact

avec l'eau par sa surface intérieure, arriverait rapidement à l'incandescence; quand on viendrait à introduire dans la chaudière une nouvelle quantité d'eau, il y aurait production brusque d'une énorme quantité de vapeur, et danger d'explosion. — Le chauffeur doit donc

avoir des moyens de vérifier, à chaque instant, la position du niveau de l'eau dans la chaudière.

L'un des moyens les plus simples consiste dans l'emploi d'un tube de cristal, dont les extrémités communiquent, l'une avec la partie inférieure du corps de la chaudière, l'autre avec sa partie supérieure. Le niveau de l'eau, dans ce tube, est toujours sur le même plan horizontal que dans la chaudière elle-même.

On emploie également un flotteur I (fig. 261), fixé à l'extrémité d'une chaîne qui passe sur une poulie extérieure F, et se termine par un contrepoids : l'axe de la poulie porte une aiguille, dont la position indique le niveau de l'eau à l'intérieur.

Enfin, le *sifflet d'alarme* (fig. 265) est destiné à avertir le chauffeur, alors même qu'il serait inattentif, de l'abaissement du niveau de l'eau dans la chaudière. — Tant

que le niveau de l'eau est suffisamment haut, le flotteur A éprouve une poussée qui, par l'intermédiaire du levier ABC, applique le bouchon a sur l'extrémité du conduit b. Mais si le niveau de l'eau vient à descendre plus qu'il ne doit le faire, le flotteur A s'abaisse, et entraîne la branche BA du levier; le bouchon a démasquant alors l'ouverture du conduit, il se produit un jet de vapeur qui vient se briser sur les bords du timbre d et le fait résonner tant qu'on n'a pas ramené dans la chaudière une nouvelle quantité d'eau (\*).

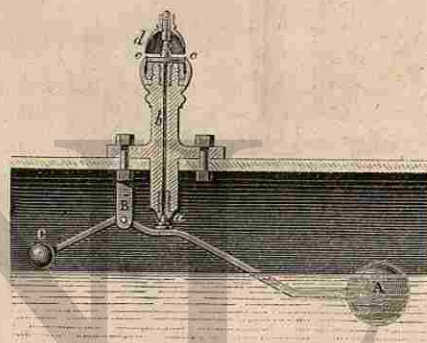


Fig. 265. — Sifflet d'alarme.

575. **Alimentation des chaudières.** — L'alimentation de la chaudière, c'est-à-dire l'introduction de la quantité d'eau nécessaire pour remplacer progressivement celle qui se convertit en vapeur, doit toujours se faire par le fond même de la chaudière : si cette eau plus froide était introduite par la partie supérieure, elle déterminerait, au moment de son arrivée, une condensation de la vapeur, et, par suite, une perturbation dans la marche de la machine. — Cette eau ne peut pénétrer dans la chaudière qu'à la condition d'être refoulée avec une pression assez considérable. On a d'abord employé une pompe foulante,

(\*) Dans les locomotives, le chauffeur peut aussi faire résonner le sifflet, en y amenant la vapeur au moyen d'un robinet placé à sa portée, de manière à produire des signaux d'avertissement, réglementés par la police des chemins de fer.

dite *pompe d'alimentation*, mise en jeu par la machine elle-même, comme on le verra plus loin (587). — Depuis quelques années, la pompe d'alimentation, dont le fonctionnement exige une dépense de force assez grande, est remplacée presque généralement par l'*injecteur Giffard*.

376. **Injecteur Giffard.** — Cet appareil extrêmement ingénieux, dont la figure 264 représente la coupe, est adapté au tube même qui sert au dégagement de la vapeur de la chaudière. Quand son robinet E est ouvert, une certaine quantité de vapeur pénètre par de petites ouvertures *d, d*, et vient former un jet animé d'une grande vitesse, par l'ouverture d'une tuyère F, placée dans le tube convergent *aa*; une tige *e*, terminée en pointe, qu'on

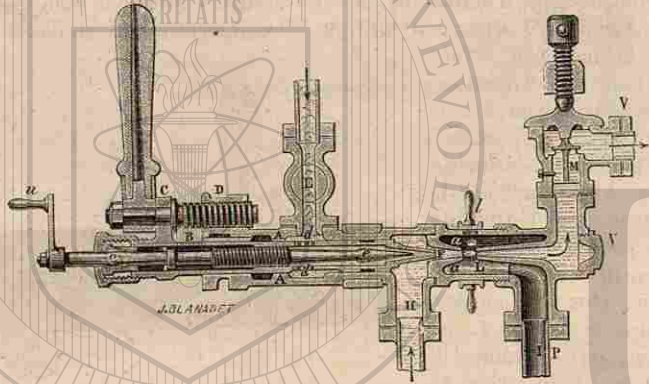


Fig. 264. — Injecteur Giffard.

appelle l'*aiguille*, et qu'on peut faire pénétrer plus ou moins dans la tuyère à l'aide d'une vis commandée par la manivelle extérieure *u*, permet de rétrécir plus ou moins le passage offert à l'arrivée de la vapeur. L'orifice d'échappement F correspond à la partie supérieure d'un tuyau H, dont l'extrémité inférieure plonge dans un réservoir à eau : la condensation partielle de la vapeur détermine l'ascension de l'eau dans ce tube, et cette eau, entraînée par le mouvement du jet, pénètre d'abord dans le tube convergent *aa*, puis dans le tube divergent qui est situé en face, à une petite distance : l'eau acquiert dans ce dernier tube une vitesse progressivement décroissante, et arrive au fond de la chaudière par le conduit *W*. Un clapet M, situé sur le trajet de ce conduit, empêche l'eau de la chaudière de revenir à l'injecteur, si la pression dans l'injecteur venait à diminuer. — Enfin, l'espace élargi L, qui environne l'extrémité du tube convergent et celle du tube divergent, sert à recueillir l'air qui se dégage de l'eau arrivant du réservoir, et l'excès d'eau qui n'est point entraîné dans le tube divergent; ce mélange d'air et d'eau s'écoule à l'extérieur par le tuyau P. — L'avantage de l'injecteur Giffard est de produire un appel d'eau continu, tant que la vapeur pénètre dans la tuyère : on le règle, en faisant pénétrer plus ou moins l'aiguille à l'aide

de la manivelle *u*. — L'appareil occupe d'ailleurs très peu de place : il n'a guère qu'une longueur de 20 centimètres.

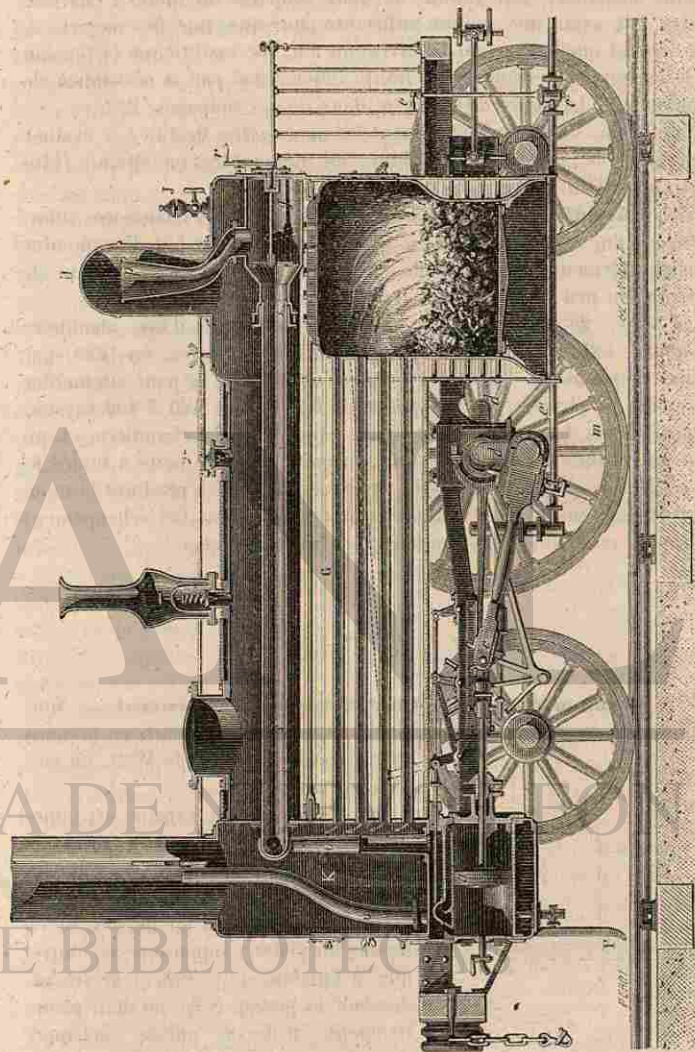


Fig. 265. — Coupe longitudinale d'une locomotive du système Stephenson.

377. **Soupapes de sûreté. — Manomètres.** — Les *soupapes de sûreté*, destinées à donner issue à la vapeur lorsque sa tension devient

supérieure à celle que la chaudière peut supporter, sont semblables à celle de la marmite de Papin (fig. 251). Les réglemens exigent que chaque chaudière soit munie de deux soupapes au moins : chacune d'elles doit avoir une section suffisante pour que, une fois ouverte, à elle seule et quelle que soit l'activité du feu, elle maintienne la tension de la vapeur au-dessous de la limite déterminée par la résistance de la chaudière. La figure 261 montre deux de ces soupapes, B, G.

Nous avons décrit précédemment les *manomètres* destinés à évaluer la pression de la vapeur (145 à 146) : les manomètres métalliques (146) sont aujourd'hui presque les seuls employés.

**578. Chaudières tubulaires.** — L'invention des chaudières tubulaires est due à Marc Séguin, en 1826; elle a eu pour but d'augmenter considérablement la surface de chauffe, de manière à permettre de produire en peu de temps une très grande quantité de vapeur.

La figure 265 représente la section longitudinale d'une chaudière tubulaire, telle qu'elle a été appliquée aux locomotives, en 1829, par Robert Stephenson. — Le foyer est placé à l'arrière, et pour augmenter la surface de chauffe, on fait passer la flamme par 120 à 150 tuyaux, disposés dans toute la longueur du *corps* G de la chaudière, et qui sont environnés par l'eau. Les gaz se rendent dans la boîte à fumée K, où se dégage, par la tuyère U, la vapeur qui a servi à produire le mouvement de la machine, comme on le verra plus loin. Cet échappement de vapeur contribue puissamment à activer le tirage.

III. — MACHINES A VAPEUR.

**579. Organes d'une machine à vapeur, en général.** — Nous indiquerons les organes essentiels d'une machine à vapeur, en prenant pour type la machine de Watt, ou *machine à balancier*.

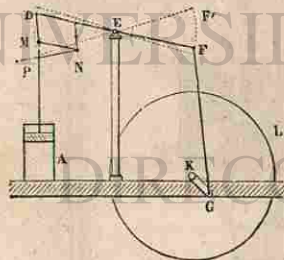


Fig. 266.

La force élastique de la vapeur imprimera au piston un mouvement de va-et-vient; il reste à transformer ce mouvement en un mouvement

*de rotation continu.* — Dans la machine à balancier, cette transformation de mouvements s'effectue de la manière suivante :

La tige qui est fixée au piston, glissant à frottement doux dans une boîte à cuir placée dans la base supérieure du cylindre, vient se lier à l'extrémité d'un *balancier* DF, mobile autour de son milieu E (\*). Le mouvement de va-et-vient du piston fait ainsi décrire au point F l'arc de cercle FF', alternativement dans un sens et dans l'autre : le point F est relié, par l'intermédiaire d'une *bielle* FG, à l'extrémité d'une *manivelle* KG, et la manivelle est ainsi animée d'un mouvement de rotation continu, autour de son axe K. Cet axe est celui de l'*arbre de couche*, sur lequel passent les courroies qui transmettent le mouvement à tous les organes de l'usine : il porte un *volant* L, c'est-à-dire une roue d'un rayon très grand et d'un poids considérable, qui sert à régulariser le mouvement (585).

**580. Condenseur.** — Nous avons supposé que, au moment où la vapeur arrive de la chaudière par le tube *t* dans la partie inférieure D du cylindre (fig. 267), la partie supérieure C laisse échapper dans l'atmosphère, par le tube *t'*, la vapeur qu'elle contenait, et réciproquement. — Or, supposons que la pression dans la chaudière soit, par exemple, de trois atmosphères : pendant que cette pression s'exerce sur la face inférieure du piston, la pression atmosphérique s'exerce sur la face supérieure, en sorte que le piston n'est sollicité que par une pression résultante, égale à deux atmosphères. — On peut supprimer presque entièrement cette perte de force, par l'emploi du condenseur, qui est dû à Watt.

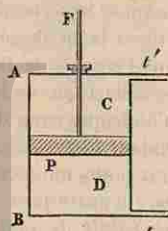


Fig. 267.

Le *condenseur* est une enceinte hermétiquement close, et vide d'air, dans laquelle pénètre, sous forme de pluie, un jet continu d'eau froide; au moment où la vapeur de la chaudière arrive dans le cylindre, par le tube *t*, le tube *t'* est mis en communication avec le condenseur. Or, si la température dans le condenseur est, par exemple, de 45°, la tension de la vapeur d'eau y sera seulement d'un dixième d'atmosphère environ : dans ces conditions, la vapeur contenue dans l'espace C doit affluer dans le condenseur, et s'y liquéfier jusqu'à ce que la tension ne

(\*) Cette liaison se fait par l'intermédiaire d'un parallélogramme de tiges métalliques, dit *parallélogramme articulé*, et destiné à éviter les flexions qu'éprouverait la tige, pendant les mouvements du balancier, si elle était articulée directement elle-même au point D. Les quatre sommets de ce parallélogramme sont articulés, de sorte que les angles peuvent varier sans que les longueurs des côtés varient : le sommet N est relié à un point fixe P par une tige rigide, mobile elle-même autour de P, de sorte que N est assujéti à décrire un arc de cercle dont le centre est en P; ce mode de liaison, imaginé par Watt, a pour résultat, comme la théorie le démontre, de faire décrire sensiblement une *ligne droite* à l'extrémité M de la tige du piston, pendant que l'extrémité D du balancier décrit un arc de cercle.



soit plus que d'un dixième d'atmosphère. — Le phénomène de l'abaissement de pression est d'ailleurs tellement instantané, qu'on peut considérer la pression résistante comme étant toujours égale à un dixième d'atmosphère, c'est-à-dire égale à la tension correspondante à la température des parties les plus froides de l'espace qui contient la vapeur. C'est le principe connu sous le nom de *principe de Watt*. — L'utilité du condenseur est donc manifeste (\*).

581. **Détente.** — Lorsque le cylindre reste en communication avec la chaudière pendant toute la course du piston, la vapeur agit sur le piston, pendant tout ce temps, avec une tension constante, et s'échappe ensuite dans l'atmosphère. — Watt a eu l'idée d'intercepter l'arrivée de la vapeur avant la fin de la course du piston : la continuation de la course du piston produit alors, sur la vapeur enfermée dans le cylindre, un accroissement de volume, et par suite une diminution de force élastique, ou une détente; mais, pourvu que l'accroissement de volume ne soit pas trop considérable, la vapeur conserve encore une force élastique supérieure à la pression qui s'exerce sur l'autre face du piston.

Il est facile de montrer, par un raisonnement simple, qu'on trouve dans l'emploi de la détente une économie réelle. — Supposons que la force élastique de la vapeur dans la chaudière soit de 2 atmosphères, et qu'à chaque coup de piston on laisse la vapeur arriver dans le cylindre pendant la première moitié seulement de la course du piston. On dépensera, pour un même nombre de coups de piston, moitié moins de vapeur; d'autre part, il est facile de voir que l'effet sur le piston ne sera pas réduit de moitié. En effet, la force motrice de 2 atmosphères agira toujours pendant les premières moitiés des courses du piston, ce qui constitue déjà la moitié de l'effet qui se serait produit sans l'emploi de la détente; mais, en outre pendant les secondes moitiés des courses, le piston sera encore soumis à l'action d'une force motrice variant entre 2 atmosphères et 1 atmosphère, force toujours supérieure à la force résistante qui agit sur l'autre face. — Donc, pour une même dépense de vapeur, il y aura augmentation de l'effet produit.

L'immense majorité des machines fonctionne aujourd'hui avec détente. — On emploie fréquemment les degrés de détente  $\frac{1}{5}$ ,  $\frac{1}{10}$ , c'est-à-dire qu'on laisse arriver la vapeur pendant le cinquième, le dixième de chaque course de piston. Enfin, avec des machines présentant une grande perfection, on a pu employer la détente à  $\frac{1}{25}$  et même à  $\frac{1}{50}$ .

582. **Distribution de la vapeur. — Tiroir.** — Pour que les mouvements d'allée et de venue du piston puissent se produire, il faut que la vapeur vienne presser sur le piston tantôt d'un côté, tantôt de

(\*) On reconnaît immédiatement une machine sans condenseur, à ce qu'on voit la vapeur s'échapper dans l'atmosphère, et former une sorte de panache blanc, qui apparaît par saccades, à chaque coup de piston. Il ne se produit rien de semblable dans une machine à condenseur.

l'autre. — Voici comment on réalise ces conditions à l'aide du tiroir :

La vapeur arrive de la chaudière par le tube F, dans la boîte à vapeur FG (fig. 268), fixée sur le côté du cylindre : à l'intérieur de cette boîte se trouvent les ouvertures a, b, de deux conduits aA, bB, qui viennent aboutir chacun à l'une des extrémités du cylindre. Dans l'intervalle, se trouve l'ouverture K d'un autre conduit qui va déboucher dans l'atmosphère ou dans le condenseur. Enfin une pièce mobile mn, à laquelle sa forme a fait donner le nom de tiroir, vient s'appliquer sur ces ouvertures, mais elle n'a que la longueur nécessaire pour couvrir deux d'entre elles. — Quand le piston arrive au haut de sa course, le tiroir se place dans la position indiquée par la figure 268 : la vapeur qui vient de la chaudière pénètre par aA dans la partie supérieure du cylindre : d'autre part, la vapeur qui se trouvait au-dessous du piston s'échappe par le conduit bB et par le conduit K, dans l'atmosphère ou dans le condenseur. Le piston se met donc en mouvement du haut en bas. —

Quand le piston arrive au bas de sa course, la tige E amène le tiroir dans la position indiquée par la figure 269 : la vapeur pénètre, par bB, dans la partie inférieure du cylindre; la vapeur qui se trouvait au-dessus du piston peut s'échapper par le conduit aA et par le conduit K dans l'atmosphère ou dans le condenseur; le piston se met donc en mouvement de bas en haut, et ainsi de suite.

Pour que la machine marche avec détente, il suffit de régler la marche ou les dimensions du tiroir, de manière que l'arrivée de la vapeur dans le cylindre soit interceptée, pendant la course du piston, avant que la communication de l'autre partie du cylindre avec le condenseur soit interrompue (\*).

583. **Machines à basse pression, à moyenne pression, et à haute pression.** — Au point de vue de la valeur de la tension que

(\*) Dans les machines puissantes, quand on veut employer les degrés de détente  $\frac{1}{25}$  ou  $\frac{1}{50}$ , on substitue au tiroir un autre mode de distribution de la vapeur.

Quatre orifices sont ménagés dans la paroi du cylindre : deux, A et B, à la partie supérieure; les deux autres, A' et B', à la partie inférieure. Les ouvertures A et A' servent à l'entrée de la vapeur, qui vient de la chaudière; par les ouvertures B et B', la vapeur se rend, du cylindre dans l'atmosphère, ou dans le condenseur. Ces quatre orifices sont, au moment voulu, couverts ou découverts, par quatre pièces mobiles mues par des cames, et dont la forme est variable d'un type de machine à l'autre. Par exemple, dans les machines du type Sulzer, ce sont des soupapes à tige, qu'une roue à cames soulève brusquement, et qu'un puissant ressort fait refermer quand la came cesse d'agir.

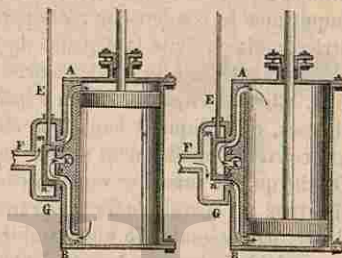


Fig. 268.

Fig. 269.

possède la vapeur en arrivant de la chaudière, on distingue les machines en trois groupes :

1° Les machines à *basse pression*, dans lesquelles la tension de la vapeur ne dépasse guère une atmosphère et demie. — L'emploi du condenseur est particulièrement nécessaire dans ces machines, afin que la vapeur conserve une action suffisante sur le piston.

2° Les machines à *moyenne pression*, dans lesquelles la tension est de 3 à 5 atmosphères.

3° Les machines à *haute pression*, où la tension de la vapeur dépasse 5 atmosphères. — Dans les machines à haute pression, il y a avantage à supprimer le condenseur : on perd une atmosphère comme force motrice, mais on évite la dépense de travail nécessaire pour renouveler incessamment l'eau du condenseur.

584. **Cheval-vapeur.** — On exprime, en général, la puissance des machines, en indiquant leur *force en chevaux*. C'est là une expression toute conventionnelle, dont il faut connaître la signification.

On dit qu'une machine vaut un *cheval-vapeur*, lorsqu'elle est capable d'effectuer un travail de 75 kilogrammètres par seconde, c'est-à-dire d'élever, par seconde, 75 kilogrammes à 1 mètre de hauteur. Une machine vaut 2, 5 chevaux, lorsqu'elle est capable d'effectuer, par seconde, un travail de 2, 5 fois 75 kilogrammètres (\*).

585. **Organes régulateurs du mouvement. — Volant et régulateur à boules.** — Le plus ordinairement, les résistances que doit vaincre une machine varient d'un instant à l'autre, et parfois d'une manière brusque : c'est ainsi, par exemple, qu'une machine à vapeur employée à faire fonctionner les diverses machines-outils d'un atelier éprouve des résistances variables, selon qu'on met en communication avec l'arbre de couche un nombre plus ou moins grand de ces outils, ou que chacun d'eux est appliqué à des matériaux plus ou moins résistants. — Pour atténuer les variations brusques de vitesse que pourrait ainsi éprouver la machine, on adapte, sur l'arbre de couche, un *volant*, c'est-à-dire une grande roue de fonte L (fig. 266 et 271), ayant une masse M très considérable à sa circonférence, et par conséquent une très grande force vive  $\frac{1}{2}Mv^2$ . Si la résistance opposée à la machine vient à varier, la force vive du volant variera en sens inverse, d'une quantité égale à la variation du travail résistant (25) ; mais la variation de la vitesse v sera d'autant plus petite que la masse M du volant sera plus considérable.

(\*) La puissance d'une machine, en chevaux-vapeur, ne représente pas le nombre de chevaux qu'il faudrait employer pour remplacer la machine elle-même. — Pour faire fonctionner, d'une manière continue, une machine ayant une puissance de 10 chevaux-vapeur, il faudrait employer 55 chevaux ordinaires, de force moyenne, fonctionnant d'une manière alternative, avec les intervalles de repos qu'il est indispensable de leur laisser prendre.

586. — Cependant, si la machine continuait à n'éprouver, pendant un temps assez long, que des résistances assez faibles, son mouvement pourrait finir par devenir trop rapide : elle arriverait à *s'emporter*.

Pour parer à cet inconvénient, on emploie le *régulateur à boules*, qui est représenté par la figure 270. — Il se compose d'un système de deux sphères pesantes P, P, fixées à deux tiges métalliques articulées en A à l'extrémité de la tige verticale B. Le mouvement de rotation de l'arbre de la machine est transmis, par l'intermédiaire d'une courroie sans fin *tt* (fig. 271) et des roues d'angles T, à la tige B (fig. 270), en sorte que, pendant le mouvement, les boules tendent à s'écarter de cette tige, d'autant plus que la vitesse de rotation est plus grande : elles soulèvent alors, par l'intermédiaire des tiges articulées AD, DC, une bague CC qui glisse librement le long de B ; l'extrémité G du levier coudé EFG tire alors horizontalement la tige GH, la-

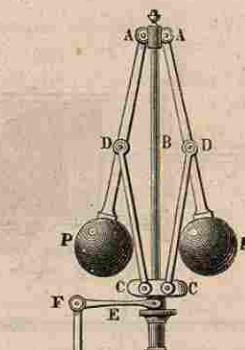


Fig. 270.  
Régulateur à boules.

quelle agit à son tour comme le montre la figure 271, et tend à fermer une valve *a* placée sur le tuyau d'arrivée de la vapeur dans le cylindre. Le mouvement de la machine tend alors à se ralentir de lui-même. — Au contraire, si le mouvement de la machine devient trop lent, le poids des boules les rapproche de la tige B, et la bague CC redescend ; la valve *a* s'ouvrant davantage, l'arrivée de vapeur augmente, et le mouvement recommence à s'accélérer.

587. **Pompes adjointes à la machine.** — Dans la machine de Watt, on trouve un système de trois pompes destinées à entretenir une sorte de circulation de l'eau, indispensable à la marche régulière de la machine. Ce système de pompes devra : 1° amener continuellement une pluie d'eau froide dans la chambre à condensation (*pompe à eau froide*) ; 2° enlever de cette chambre l'eau qui s'y est échauffée par la condensation de la vapeur, et l'air que la diminution de pression a dégagé de l'eau (*pompe à air*) ; 3° prendre une partie de cette eau pour alimenter la chaudière à vapeur (*pompe d'alimentation*). — Ces trois pompes ont leurs tiges reliées au balancier, en sorte qu'elles sont mises en mouvement par la machine elle-même : la figure 271 représente la coupe de diverses capacités dans lesquelles elles mettent l'eau en mouvement.

La *pompe à eau froide* *q* (fig. 271) puise l'eau dans un puits ou dans un cours d'eau, et la verse en *r* dans un vaste réservoir RR, qui doit être toujours plein d'eau. Cette eau, environnant le condenseur *e*, contribue à le refroidir. En raison de la raréfaction produite dans le

condenseur, par la condensation même, l'eau froide y arrive d'une manière continue par le robinet *g*.

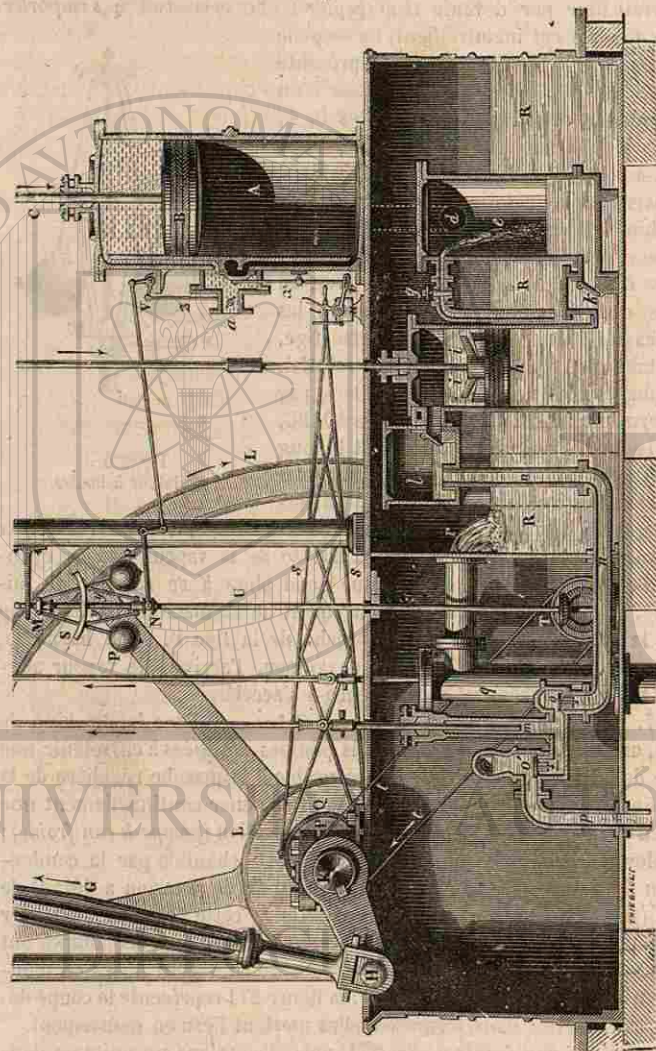


Fig. 271. — Machine de Watt.

La pompe à air *h* aspire l'eau chaude du condenseur, et l'air que cette eau a dégagé : l'eau aspirée franchit les soupapes *i, i* du piston, et est déversée dans un petit réservoir *l*

La pompe d'alimentation *m* aspire une partie de cette eau chaude, par le conduit *nn* et la soupape *o*; elle la refoule ensuite, par la soupape *o'* et le conduit *p*, jusque dans la chaudière, où elle sert à remplacer l'eau qui s'est convertie en vapeur (\*).

588. **Mouvement du tiroir.** — **Excentrique circulaire.** — Voici comment se produisent les déplacements du tiroir (582).

La tige *x*, qui porte le tiroir (fig. 271), est articulée avec l'un des bras d'un petit levier coudé *wt*, dont l'autre bras s'articule en *t* avec le système de tiges *ss* : ce système se termine par un collier *Q*, qui presse légèrement sur le contour d'un disque circulaire *P*, fixé sur l'arbre de couche *K*. Mais le centre du disque *P* n'est pas sur l'axe de l'arbre de couche : il est, comme le montre la figure, en dehors de l'axe, et du côté opposé à la manivelle; de là, le nom d'*excentrique circulaire* donné à la pièce *P*. Dès lors, pendant chaque rotation de l'arbre de couche, le collier entraîne les tiges *ss* et le point *t* successivement vers la droite et vers la gauche; ces mouvements, se transmettant à la tige *x* par le levier coudé *wt*, ont pour effet de faire successivement descendre et monter le tiroir. — Comme à chaque tour complet de l'arbre *K* correspond une allée et venue du piston, on voit que les rapports de position du piston et du tiroir, une fois établis convenablement, se conservent indéfiniment.

589. **Divers types de machines.** — Nous avons pris comme exemple la machine de Watt, dans laquelle la transmission du mouvement du piston à l'arbre de couche se fait par l'intermédiaire d'un balancier, d'une bielle et d'une manivelle (fig. 266).

Cette machine, dont la figure 271 représente tous les organes, sauf le balancier, est construite pour fonctionner à basse pression : elle est remarquable par la régularité de sa marche (\*\*). — Mais les machines de ce type sont encombrantes, coûteuses, et consomment, à force égale, beaucoup plus de charbon que des machines plus simples.

On verra, dans la Théorie mécanique de la chaleur (415), qu'il y a

(\*) On remplace le plus souvent aujourd'hui la pompe d'alimentation par l'*injecteur Giffard*, qui a été décrit plus haut (576).

(\*\*) Les machines *Compound*, ou machines de Wolf, présentent une régularité plus grande encore. — Deux cylindres, de diamètres très inégaux, sont placés l'un à côté de l'autre; les tiges des deux pistons sont articulées avec une même extrémité du balancier, de manière qu'elles montent ou descendent simultanément. Le petit cylindre est le seul qui reçoive la vapeur de la chaudière : quand la vapeur a agi sur une face du petit piston, elle est amenée, par un conduit, à la face opposée du piston de l'autre cylindre, et pénètre progressivement dans ce cylindre pendant le mouvement de son piston; elle agit donc sur le gros piston par une véritable détente, dont le travail s'ajoute à celui qu'elle avait déjà produit sur le petit piston. Puis la vapeur retourne au condenseur.

Ces machines sont celles qui exigent le plus de précision dans l'ajustement; ce sont aussi les plus coûteuses. Mais la régularité de leur marche se prête aux opérations industrielles les plus délicates.

avantage, au point de vue économique, à employer des machines fonctionnant à haute température, et, par conséquent, à *moyenne pression* ou à *haute pression*.

En outre, la tendance actuelle de l'industrie est de diminuer le nombre des organes des machines, de manière à en rendre la construction moins délicate et l'installation moins encombrante. — C'est ainsi que l'on construit aujourd'hui un grand nombre de *machines à action directe*, dans lesquelles, en supprimant le balancier, on articule directement la tige du piston avec la bielle, et quelquefois même avec la manivelle qui imprime la rotation à l'arbre de couche.

590. **Locomobiles.** — Comme exemple de machines horizontales, on peut citer les *locomobiles*, qui sont des machines offrant l'avantage

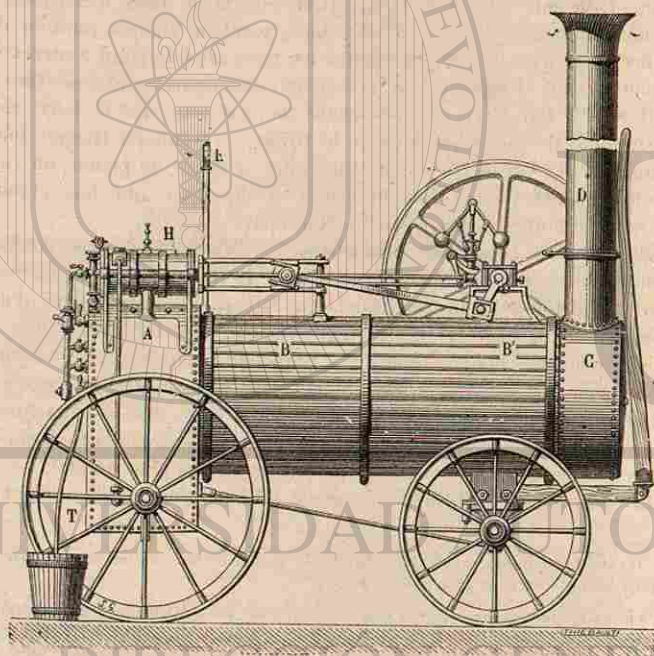


Fig. 272. — Locomobile.

de pouvoir être transportées sur le lieu même où elles doivent effectuer temporairement un certain travail.

Deux paires de roues portent à la fois la chaudière, avec son foyer et sa cheminée, et la machine avec son volant (fig. 272).

La chaudière est une chaudière tubulaire, comme celles des loco-

tives (578), avec cette différence que les tubes sont plus gros, plus courts, et moins nombreux : le foyer A est placé à l'arrière, la cheminée D à l'avant, en sorte que l'ensemble offre une ressemblance grossière avec une locomotive.

La machine, dont on voit le cylindre en II, est une machine *horizontale, à action directe* (la tige du piston s'articule directement avec la bielle), fonctionnant à *haute pression*, et *sans condenseur*. — Les locomobiles ont généralement une puissance de 4 à 6 chevaux : ce sont des machines de petites dimensions, que l'on réduit aux éléments essentiels, de manière à en diminuer le poids et à en faciliter la manœuvre (\*).

591. **Locomotives.** — Dans les *locomotives*, l'action de la vapeur est employée à faire tourner une ou plusieurs paires de roues, qui contribuent à porter le châssis sur lequel est installée la machine. C'est l'adhérence de ces roues pour les rails qui détermine le mouvement de tout le système : on leur donne le nom de *roues motrices* pour les distinguer des autres, qui sont les *roues porteuses*. — Le système dont la coupe a été représentée plus haut (fig. 265) est celui de la locomotive Stephenson, dans lequel l'action motrice de la machine s'exerce sur une seule paire de roues, la paire du milieu.

La figure 265 montre comment s'effectue la *prise de vapeur* : la vapeur formée dans la chaudière se rend dans le *dôme à vapeur* D, et pénètre dans un tuyau p qui la conduit, par la série de tubes *ssu*, aux cylindres dont elle doit faire mouvoir les pistons. On voit que ces conduits sont environnés, pendant tout le trajet *pss*, par la vapeur qui se dégage de la chaudière : cette disposition a pour objet d'empêcher que la vapeur contenue dans les conduits soit mélangée de gouttelettes liquides entraînées. — L'admission de la vapeur du dôme dans le tuyau *ss* se fait par une sorte de clef, qui est disposée à l'extrémité de la tige g, et que le chauffeur manœuvre au moyen de la manette r.

La vapeur agit sur un système de deux pistons placés à l'avant de la machine, l'un à droite, l'autre à gauche : ce sont comme deux machines, dont les actions concordent pour faire tourner l'essieu, auquel sont *invariablement fixées les roues motrices*. La figure 265 montre, en a, l'un de ces deux pistons : la tige, guidée entre des glissières, s'articule avec la bielle *ec*, qui vient elle-même s'articuler avec une sorte de manivelle d, formée par une partie coudée de l'essieu.

Nous n'avons décrit ici que les pièces essentielles d'une locomotive, celles qui permettent de comprendre comment se produit le mouvement. Les locomotives présentent d'autres pièces qui permettent de satisfaire à toutes les exigences de l'arrêt ou de la marche. — Elles présentent en outre des différences de construction, suivant qu'elles doivent être

(\*) Les locomobiles de la force de 4 à 5 chevaux ont un poids qui atteint déjà 2000 kilogrammes.

employées pour la marche à grande vitesse, ou pour remorquer un grand nombre de wagons.

592. **Machines à gaz. — Machine Lenoir et machine Hugon.** — On désigne sous le nom de *machines à gaz*, des machines où le mouvement est produit par la combustion d'un mélange gazeux, combustion s'effectuant dans le cylindre lui-même. — Le seul mélange qui ait été vraiment utilisé jusqu'ici est le mélange de gaz d'éclairage et d'air. On fait en sorte que l'air soit toujours en excès, le gaz d'éclairage n'entrant dans le mélange que pour 7 centièmes environ : on obtient alors, non pas une violente explosion, mais une combustion qui s'effectue, pour ainsi dire, par conches successives.

Le piston aspire lui-même dans le cylindre, une fois la machine lancée, le gaz combustible et l'air extérieur ; quand le piston arrive en un point déterminé de sa course, le tiroir, qui avait permis l'admission du mélange gazeux, ferme la lumière : c'est alors qu'on produit l'inflammation, qui donne naissance à une pression de 5 ou 6 atmosphères.

Quant à la manière de produire l'inflammation du mélange gazeux, au moment précis où elle doit avoir lieu, elle diffère d'une machine à l'autre. — Dans la *machine Lenoir*, une étincelle électrique, produite par une petite bobine de Ruhmkorff (livre III), jaillit dans l'intérieur du cylindre. — Dans la *machine Hugon*, l'inflammation est produite par des becs de gaz, installés dans deux petites cavités ménagées dans le tiroir. Chacun de ces becs, en pénétrant dans la boîte, allume le mélange et s'éteint lui-même par l'explosion ; il sort alors de la boîte, et vient rallumer à un bec fixe, placé à l'extérieur : il rentre ensuite dans la boîte, au moment où il doit allumer de nouveau le mélange, et ainsi de suite (\*).

En raison du prix, relativement élevé, du gaz d'éclairage, les machines à gaz sont moins économiques que les machines à vapeur, lorsqu'il s'agit d'un travail qui doit se continuer longtemps d'une manière régulière. — Elles sont précieuses surtout pour les travaux intermittents, puisqu'il suffit de quelques minutes pour les mettre en mouvement, et qu'on n'a pas à supporter de dépense de combustible dans les intervalles de repos de la machine.

(\*) Dans les machines à gaz en général, la combustion, qui s'effectue dans le cylindre lui-même, donne lieu à un dégagement de chaleur considérable : aussi est-il nécessaire, pour éviter une trop grande élévation de température qui rendrait le graissage défectueux et détruirait les joints, de faire circuler constamment un courant d'eau froide autour du cylindre, dans une double enveloppe.

## CHAPITRE XI

### NOTIONS SUR LA THÉORIE MÉCANIQUE DE LA CHALEUR

#### I. — ÉQUIVALENCE ENTRE LE TRAVAIL MÉCANIQUE ET LA CHALEUR.

595. **Apparition de chaleur, accompagnant la disparition d'une force vive de translation.** — Pour faire concevoir la relation générale qui existe entre les phénomènes du mouvement et les phénomènes de la chaleur, prenons d'abord un exemple particulièrement simple, celui d'un corps pesant, de masse  $m$ , tombant d'une hauteur  $h$  et venant rencontrer un plan horizontal, *parfaitement rigide*, comme un plan de marbre.

Si l'on choisit d'abord, pour cette expérience, un corps *parfaitement élastique*, comme une bille d'ivoire, on le voit remonter, suivant la verticale, à la hauteur même dont il était tombé, c'est-à-dire revenir à son point de départ, avec une vitesse nulle. Envisageons séparément chacun de ces deux mouvements en sens contraire. — Dans le mouvement de descente, le corps a *acquis*, au moment où il rencontre le plan rigide, une certaine vitesse  $v$ , et par suite une certaine force vive  $\frac{1}{2}mv^2$ . Cette force vive est égale, comme nous l'avons vu (25), au travail *moteur* de la force qui le sollicite, c'est-à-dire de son poids  $p = mg$ , l'expression de ce travail est  $mgh$ . — Dans le mouvement d'ascension, le corps est d'abord renvoyé par le plan rigide, avec une vitesse égale et contraire à la vitesse primitive : il possède donc, à l'origine de ce mouvement de bas en haut, une force vive  $\frac{1}{2}mv^2$ , égale à celle qu'il possédait au moment de rencontrer ce plan. Or, il perd successivement toute cette force vive, en parcourant de bas en haut le même chemin  $h$ , puisque sa vitesse redevient nulle lorsqu'il arrive au haut de sa course ; à cette *perte de force vive* correspond un *travail résistant*, qui est encore représenté, en valeur absolue, par  $mgh$ , c'est-à-dire égal en grandeur à celui qui avait été dépensé pendant la chute.

En résumé, pendant la descente, *dépense d'un travail moteur* et

employées pour la marche à grande vitesse, ou pour remorquer un grand nombre de wagons.

592. **Machines à gaz. — Machine Lenoir et machine Hugon.** — On désigne sous le nom de *machines à gaz*, des machines où le mouvement est produit par la combustion d'un mélange gazeux, combustion s'effectuant dans le cylindre lui-même. — Le seul mélange qui ait été vraiment utilisé jusqu'ici est le mélange de gaz d'éclairage et d'air. On fait en sorte que l'air soit toujours en excès, le gaz d'éclairage n'entrant dans le mélange que pour 7 centièmes environ : on obtient alors, non pas une violente explosion, mais une combustion qui s'effectue, pour ainsi dire, par conches successives.

Le piston aspire lui-même dans le cylindre, une fois la machine lancée, le gaz combustible et l'air extérieur ; quand le piston arrive en un point déterminé de sa course, le tiroir, qui avait permis l'admission du mélange gazeux, ferme la lumière : c'est alors qu'on produit l'inflammation, qui donne naissance à une pression de 5 ou 6 atmosphères.

Quant à la manière de produire l'inflammation du mélange gazeux, au moment précis où elle doit avoir lieu, elle diffère d'une machine à l'autre. — Dans la *machine Lenoir*, une étincelle électrique, produite par une petite bobine de Ruhmkorff (livre III), jaillit dans l'intérieur du cylindre. — Dans la *machine Hugon*, l'inflammation est produite par des becs de gaz, installés dans deux petites cavités ménagées dans le tiroir. Chacun de ces becs, en pénétrant dans la boîte, allume le mélange et s'éteint lui-même par l'explosion ; il sort alors de la boîte, et vient rallumer à un bec fixe, placé à l'extérieur : il rentre ensuite dans la boîte, au moment où il doit allumer de nouveau le mélange, et ainsi de suite (\*).

En raison du prix, relativement élevé, du gaz d'éclairage, les machines à gaz sont moins économiques que les machines à vapeur, lorsqu'il s'agit d'un travail qui doit se continuer longtemps d'une manière régulière. — Elles sont précieuses surtout pour les travaux intermittents, puisqu'il suffit de quelques minutes pour les mettre en mouvement, et qu'on n'a pas à supporter de dépense de combustible dans les intervalles de repos de la machine.

(\*) Dans les machines à gaz en général, la combustion, qui s'effectue dans le cylindre lui-même, donne lieu à un dégagement de chaleur considérable : aussi est-il nécessaire, pour éviter une trop grande élévation de température qui rendrait le graissage défectueux et détruirait les joints, de faire circuler constamment un courant d'eau froide autour du cylindre, dans une double enveloppe.

## CHAPITRE XI

### NOTIONS SUR LA THÉORIE MÉCANIQUE DE LA CHALEUR

#### I. — ÉQUIVALENCE ENTRE LE TRAVAIL MÉCANIQUE ET LA CHALEUR.

595. **Apparition de chaleur, accompagnant la disparition d'une force vive de translation.** — Pour faire concevoir la relation générale qui existe entre les phénomènes du mouvement et les phénomènes de la chaleur, prenons d'abord un exemple particulièrement simple, celui d'un corps pesant, de masse  $m$ , tombant d'une hauteur  $h$  et venant rencontrer un plan horizontal, *parfaitement rigide*, comme un plan de marbre.

Si l'on choisit d'abord, pour cette expérience, un corps *parfaitement élastique*, comme une bille d'ivoire, on le voit remonter, suivant la verticale, à la hauteur même dont il était tombé, c'est-à-dire revenir à son point de départ, avec une vitesse nulle. Envisageons séparément chacun de ces deux mouvements en sens contraire. — Dans le mouvement de descente, le corps a *acquis*, au moment où il rencontre le plan rigide, une certaine vitesse  $v$ , et par suite une certaine force vive  $\frac{1}{2}mv^2$ . Cette force vive est égale, comme nous l'avons vu (25), au travail *moteur* de la force qui le sollicite, c'est-à-dire de son poids  $p = mg$ , l'expression de ce travail est  $mgh$ . — Dans le mouvement d'ascension, le corps est d'abord renvoyé par le plan rigide, avec une vitesse égale et contraire à la vitesse primitive : il possède donc, à l'origine de ce mouvement de bas en haut, une force vive  $\frac{1}{2}mv^2$ , égale à celle qu'il possédait au moment de rencontrer ce plan. Or, il perd successivement toute cette force vive, en parcourant de bas en haut le même chemin  $h$ , puisque sa vitesse redevient nulle lorsqu'il arrive au haut de sa course ; à cette *perte de force vive* correspond un *travail résistant*, qui est encore représenté, en valeur absolue, par  $mgh$ , c'est-à-dire égal en grandeur à celui qui avait été dépensé pendant la chute.

En résumé, pendant la descente, *dépense d'un travail moteur* et

apparition d'une force vive correspondante; pendant l'ascension, disparition de cette force vive, et accomplissement d'un travail résistant correspondant.

Si maintenant on répète la même expérience avec un corps mou, c'est-à-dire avec un corps qui, au lieu de rebondir comme la bille d'ivoire, reste appliqué sur le plan, il semble, au premier abord, qu'il y ait annulation de la force vive acquise pendant la chute sans qu'il y ait un travail résistant correspondant. — Mais, dans tous les cas de ce genre, outre la déformation permanente qu'éprouve le corps, il se produit un nouveau phénomène, en apparence très différent des phénomènes de mouvement: il y a *dégagement de chaleur*. — Ainsi, quand une balle de fusil rencontre la plaque d'une cible, elle ne prend, après le choc, qu'une vitesse insensible en sens contraire; mais il se produit un dégagement de chaleur qui la rend brûlante. — Les boulets, quand ils sont tirés sur des plaques de blindage, éprouvent une élévation de température qui les porte à l'incandescence. — Dans l'exemple particulier que nous avons choisi d'abord, d'un corps perdant par le choc la force vive qui lui avait été communiquée par la simple action de son poids, le dégagement de chaleur n'est bien manifeste que pour des hauteurs de chute assez considérables: cependant il peut être constaté déjà pour des hauteurs de 5 à 4 mètres.

**594. Notion générale de l'équivalence, entre une quantité de chaleur et une quantité de force vive ou de travail.** — Les phénomènes du choc ne sont pas les seuls où l'on constate la production d'une certaine quantité de chaleur, accompagnant la perte d'une certaine quantité de force vive ou de travail.

Le *frottement* des corps les uns contre les autres, en diminuant à chaque instant la vitesse dont ils étaient animés, développe de la chaleur. — Ainsi, le frottement du moyeu d'une roue contre l'essieu, quand l'essieu n'est pas suffisamment enduit de matière grasse, arrive à rendre la roue brûlante, et peut même parfois y mettre le feu. — C'est par le frottement que nous amenons l'extrémité d'une allumette chimique à la température de combustion du phosphore.

A ces observations vulgaires il convient d'ajouter la belle expérience exécutée à Munich en 1798 par Rumford. Il fit construire un appareil dans lequel un cône d'acier trempé, mis en mouvement autour de son axe par deux chevaux, venait frotter contre les parois d'une cavité pratiquée dans une pièce de fer; le tout était plongé dans une caisse de sapin, contenant environ 10 litres d'eau froide. Au bout de deux heures et demie, l'eau était en pleine ébullition (\*).

(\*) Rumford tira de cette expérience la conclusion, bien digne de remarque, si l'on se reporte à l'époque où elle fut formulée, que le dégagement de chaleur ne devait être qu'un phénomène de mouvement; c'est la conclusion à laquelle sont arrivés également les savants modernes, comme nous le verrons plus loin.

On imite cette expérience, dans les cours, au moyen d'une disposition due à M. Tyndall. — Un tube métallique, rempli d'éther, T (fig. 275), est disposé de manière qu'on puisse lui imprimer un mouvement de rotation rapide autour de son axe, à l'aide de la roue R et de la courroie sans fin CC. Pendant ce mouvement, on serre fortement le tube entre deux plaques de bois P, P'. La chaleur dégagée par le frottement amène bientôt l'éther à une température telle, que le bouchon B est chassé par la force élastique de la vapeur.

Les phénomènes de *compression*, et en particulier la compression

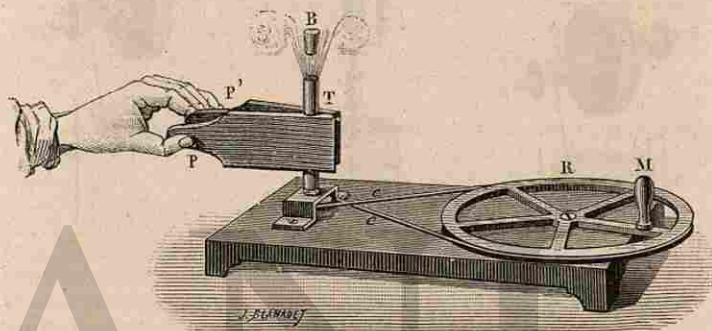


Fig. 275. — Expérience de Tyndall.

des gaz, donnent lieu à un dégagement de chaleur, que l'on utilise dans le briquet à air (fig. 17); dans ce cas, le dégagement de chaleur est le résultat de la dépense de travail qu'il a fallu effectuer pour mettre le piston en mouvement.

*Inversement*, l'observation d'une machine à vapeur en activité montre la dépense d'une certaine quantité de la chaleur produite par le combustible, s'accompagnant d'une production de force vive communiquée aux organes de la machine, ou d'un travail résistant effectué.

En présence de ces résultats, on a dû se demander si, dans tous ces divers phénomènes, il n'existe pas un rapport constant entre la quantité de chaleur produite ou dépensée, et la quantité de force vive ou de travail dépensée ou produite. S'il en est ainsi, on en devra conclure qu'il y a *équivalence* entre une quantité déterminée de chaleur et une quantité déterminée d'énergie. — Nous allons indiquer quelques-unes des expériences qui ont permis d'arriver à ce résultat.

**595. Transformation de travail en chaleur. — Expériences de M. Joule sur le frottement.** — On doit à M. Joule, de Manchester, un grand nombre d'expériences, dans lesquelles on a employé une quantité déterminée de travail, pour produire, par le frottement de

corps solides ou liquides les uns contre les autres, une quantité de chaleur que l'on mesurait avec précision. Les parties principales de l'appareil sont les suivantes :

Deux masses de plomb  $M, M'$  (fig. 274), de poids égaux  $P$ , suspendues à des cordons qui s'enroulent sur les axes  $B, B'$  de deux poulies, sont abandonnées sous l'action de la pesanteur; elles impriment un mouvement

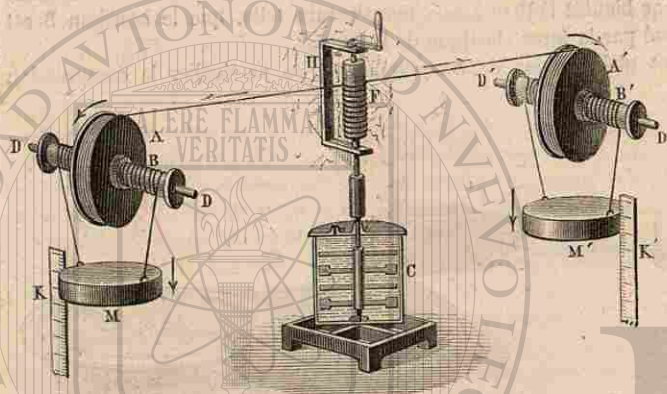


Fig. 274. — Expérience de Joule.

de rotation à ces deux poulies, dont les gorges portent des fils qui viennent s'enrouler sur le cylindre de bois  $F$  et l'entraînent dans leur mouvement; sur l'axe vertical autour duquel tourne le cylindre, sont montées des palettes de laiton, qui se meuvent au milieu d'une masse d'eau contenue dans un calorimètre. — Le frottement de l'eau, contre les palettes et contre la paroi du calorimètre, a pour effet de rendre le mouvement uniforme, au bout de quelques instants. A partir de ce moment, au travail moteur des poids  $P$  ne correspond aucun accroissement de force vive, mais une élévation de température de l'eau et des pièces solides du calorimètre, c'est-à-dire la production d'une certaine quantité de chaleur.

On déterminait, au moyen d'un thermomètre très sensible, l'élévation de température du calorimètre à la fin de l'expérience: on en déduisait, au moyen des chaleurs spécifiques connues, la quantité de chaleur produite  $Q$ , évaluée en grandes calories. — Le travail  $W$ , effectué pendant la chute des deux poids, était égal au produit de leur valeur totale  $2P$ , évaluée en kilogrammes, par la hauteur de chute  $H$ , évaluée en mètres.

La moyenne des expériences effectuées par M. Joule, en employant l'eau et le laiton, donna, pour le rapport  $\frac{W}{Q}$ , le nombre 424,9, ou sen-

siblement 425. — M. Joule fit d'ailleurs un grand nombre d'autres expériences, soit par la même méthode, en remplaçant l'eau par le mercure, et le laiton par le fer; soit par une méthode toute différente, en exerçant sur une masse d'eau une pression qui la forçait à traverser un diaphragme d'argile poreuse, et observant l'échauffement produit. Le nombre obtenu fut toujours sensiblement le même. — On peut donc affirmer que, dans les phénomènes de frottement, à la production d'une quantité de chaleur égale à une grande calorie, correspond la dépense d'une quantité de travail constante, et exprimée en nombre rond, par 425 kilogrammètres.

Ce nombre 425 est ce que nous nommerons, dès maintenant, l'équivalent mécanique de la chaleur, ou ce qu'on pourrait appeler plus correctement l'équivalent mécanique de la grande calorie.

596. **Détails de l'expérience de Joule.** — Pour obtenir un accroissement sensible de température, une seule expérience ne suffisait pas: on renouvelait l'expérience jusqu'à vingt fois. A chaque fois, pour remonter les poids sans entraîner les palettes à l'intérieur du calorimètre, on commençait par immobiliser le treuil  $F$ , et on séparait son axe de celui des palettes; alors, au moyen de la manivelle, on remontait les poids, et on rétablissait la liaison entre les deux parties de l'axe pour procéder à l'expérience suivante. Après vingt expériences, on divisait par 20 la quantité de chaleur produite, ce qui donnait la quantité de chaleur  $Q$  correspondante à une seule expérience.

Il faut remarquer, d'autre part, que le travail  $2P \times H$  n'avait pas été employé tout entier à produire l'échauffement du calorimètre. En effet, chacun des poids  $P$ , au moment où il venait rencontrer le sol avec une certaine vitesse  $v$ , perdait par le choc la force vive qu'il possédait. On observait donc, au moyen de règles divisées, la vitesse  $v$  du mouvement sensiblement uniforme des poids, dans les instants qui précédaient le choc; en remarquant que la masse totale des deux poids moteurs est  $\frac{2P}{g}$ , on connaissait la force vive perdue par le

choc, savoir  $\frac{P}{g} v^2$ . — Il fallait, en outre, retrancher de  $2PH$  le travail  $w$  qui était employé à vaincre les frottements des pièces extérieures au calorimètre. Une dernière expérience faisait connaître cette quantité  $w$ . Le treuil  $F$  étant détaché du calorimètre, on changeait le sens de l'enroulement du fil sur la poulie  $A'$ ; la masse  $M'$  étant au bas de sa course, et la masse  $M$  au point  $K$ , on déterminait, par tâtonnements, quelle masse  $m$  il fallait ajouter du côté de  $M$ , pour que le poids additionnel  $p$  de cette masse communiquât au système la vitesse  $v$  observée dans les expériences principales; on avait évidemment  $w = pH$ . On avait donc, en définitive, une quantité de chaleur  $Q$ , équivalente au travail mécanique

$$W = 2PH - \frac{P}{g} v^2 - pH.$$

Si  $P$  et  $p$  sont évalués en kilogrammes,  $v$ ,  $g$  et  $H$  en mètres, et  $Q$  en grandes



calories, on trouve que  $\frac{W}{Q} = 425$ ; l'équivalent mécanique de la grande calorie est donc 425 kilogrammètres.

Dans le système d'unités C. G. S, le travail  $W$  sera évalué en ergs, et  $Q$  en petites calories. Remplaçons  $P$  et  $p$  par leurs valeurs  $Mg$  et  $mg$ , il vient :

$$W = 2MgH - Mv^2 - mgH.$$

$M$  et  $m$  sont évalués en grammes;  $g$  et  $H$  en centimètres. Alors  $\frac{W}{Q} = 41700000$ . L'équivalent mécanique de la petite calorie est donc égal à 41700000 ergs.

**597. Transformation de chaleur en travail. — Expériences de M. Hirn sur la machine à vapeur.** — Considérons une machine à vapeur, au moment où elle est arrivée à une période d'activité régulière, c'est-à-dire où la température maintenue dans la chaudière par l'action du foyer demeure constante, et où il en est de même de la température maintenue dans le condenseur par l'injection de l'eau froide.

La mesure des dimensions du cylindre permet de connaître la quantité de vapeur qu'il reçoit, pour un nombre déterminé de coups de piston : par suite, connaissant aussi la température de la vapeur dans la chaudière, on en déduit la quantité de chaleur  $Q$  qui est consommée pendant un temps donné, pendant cinq minutes, par exemple, pour transformer en vapeur l'eau empruntée au condenseur (564). — D'autre part, la mesure de la quantité d'eau froide qu'on doit injecter dans le condenseur pendant le même temps, pour y maintenir une température constante, donne la quantité de chaleur  $Q'$  qui est absorbée par cette eau (538), c'est-à-dire abandonnée par la vapeur qui s'y condense. — Or, on trouve que la quantité  $Q'$  est toujours moindre que  $Q$ , c'est-à-dire que *la vapeur ne rapporte pas au condenseur toute la chaleur qu'elle avait prise à la chaudière.*

La perte de chaleur  $Q - Q'$  (\*) correspond au travail *moteur* de la pression qu'exerce la vapeur sur le piston. — Pour mesurer ce travail, M. Hirn avait déterminé directement les valeurs successives de la pression exercée par la vapeur, en divers points de la course du piston. Or, en considérant un certain nombre de points suffisamment voisins les uns des autres, on peut supposer que le piston passe, de chacun d'eux au suivant, sous l'action d'une force constante (égale à la différence des pressions qui s'exercent à ce moment sur ses deux faces); le travail correspondant à ce petit déplacement s'obtient en multipliant cette force par le déplacement lui-même. Une série de termes semblables donne le travail pendant la durée de la course tout entière, et par

(\*) Il est bien entendu qu'on a fait subir à ces nombres les corrections dues aux pertes de chaleur par rayonnement ou par conductibilité.

suite le *travail total*  $W$ , évalué en kilogrammètres, pendant l'intervalle de temps que l'on aura choisi pour l'expérience.

Les expériences de M. Hirn ont fourni, pour valeur moyenne du quotient  $\frac{W}{Q - Q'}$ , le nombre 415 : résultat dont l'accord avec ceux de M. Joule (595) est plus grand qu'on n'aurait pu l'espérer, quand on songe aux difficultés de pareilles expériences.

**598. Conclusions relatives à l'équivalent mécanique de la chaleur.** — Sans multiplier davantage les exemples de déterminations numériques de l'équivalent mécanique de la chaleur, nous considérerons comme démontrées les deux conclusions suivantes :

1° Une certaine quantité de chaleur, consommée sans déterminer une élévation de température dans les corps auxquels elle a été fournie, produit une certaine quantité de travail résistant, savoir 425 kilogrammètres par grande calorie;

2° Une certaine quantité de travail moteur dépensé sans effectuer aucun travail mécanique apparent, produit une certaine quantité de chaleur, savoir  $\frac{1}{425}$  de grande calorie par kilogrammètre.

Cette *équivalence*, entre la chaleur dépensée ou produite, et le travail produit ou dépensé, doit être considérée comme un résultat expérimental, indépendamment de toute hypothèse sur la nature de la chaleur. — Nous allons maintenant chercher à faire concevoir comment la *thermodynamique* ou *théorie mécanique de la chaleur* établit, entre les phénomènes de la chaleur et ceux du mouvement, une identité complète.

## II. — INTERPRÉTATION MÉCANIQUE DES DIVERS EFFETS PRODUITS PAR LA CHALEUR.

### 599. La chaleur envisagée comme un mode de mouvement.

— Reprenons l'énumération des phénomènes qui se produisent lorsqu'un corps, animé d'une certaine vitesse, vient à rencontrer un obstacle rigide. — On observe trois effets, qui semblent, au premier abord, très différents les uns des autres :

1° Le corps prend un *mouvement de translation*, dans une direction différente de sa direction primitive, mouvement dans lequel ne se retrouve, en général, qu'une partie de la force vive initiale.

2° Il se produit un *son*, c'est-à-dire un mouvement vibratoire, en vertu duquel certaines portions du corps oscillent autour de leur position d'équilibre. — On doit donc regarder une partie de la force vive primitive de translation comme ayant été employée à accomplir un travail, en écartant les points vibrants de la position où les actions moléculaires tendaient à la maintenir. Cet écart une fois produit, les actions moléculaires ramènent les points vibrants vers leurs positions

relatives initiales, positions qu'ils dépassent en vertu de leur vitesse acquise, et ainsi de suite (\*).

5° Enfin il y a un *dégagement de chaleur*, et nous avons montré que, dans le cas actuel, ce dégagement de chaleur correspond à la disparition d'une partie de la force vive de translation (593).

Les deux premiers effets sont des effets de mouvement, dans chacun desquels se trouve une partie de la force vive primitive. — L'hypothèse fondamentale de la thermodynamique consiste à considérer le troisième effet, c'est-à-dire l'effet produit par le dégagement de chaleur, comme étant encore un *phénomène de mouvement*. — Dans cette théorie, on admet que les molécules des corps sont constamment animées de mouvements vibratoires, mais que, pour chaque corps, à mesure que la *température s'élève*, les mouvements vibratoires deviennent plus rapides, et par suite la force vive de chaque molécule devient plus grande (\*\*).

Avant d'aller plus loin, nous ferons remarquer que, s'il en est ainsi, une quantité de chaleur n'est autre chose qu'une quantité de force vive, et l'*équivalence* entre le travail dépensé et la chaleur produite devient une *conséquence nécessaire* du principe *des forces vives* (25).

400. **Effets de la chaleur sur un gaz soumis à une pression constante. — Travail extérieur. — Variation de la chaleur sensible.** — Supposons que l'on fournisse de la chaleur à une masse gazeuse, dans des conditions telles que la *pression reste constante*.

Soit, par exemple, une masse d'air contenue dans un ballon de verre A (fig. 275), et séparée de l'air extérieur par une bulle de liquide B, introduite dans un tube horizontal. L'expérience constate à la fois : 1° un *accroissement de volume* du gaz, mesuré ici par le volume de la portion du tube BB' que la bulle liquide parcourt en se déplaçant (\*\*); 2° une *élévation de température*, que l'on peut constater en plaçant un

(\*) Ce mouvement, qui durerait indéfiniment dans le vide, s'éteint plus ou moins rapidement dans l'air, parce que la force vive des points vibrants se transmet progressivement à l'air.

(\*\*) Ces vibrations *calorifiques*, que l'on pourrait être tenté d'assimiler aux vibrations sonores, s'en distinguent par des caractères essentiels. — Les vibrations *sonores* consistent, comme nous le verrons, en des déformations périodiques qui se produisent inégalement dans les diverses parties du corps ébranlé : ces déformations sont souvent assez prononcées pour être perceptibles à la vue; en imprimant à l'air des déplacements correspondants, elles deviennent sensibles à notre oreille par la transmission des vibrations aux nerfs acoustiques. — Les vibrations *calorifiques* affectent, d'une manière égale, tous les points d'un corps dans lequel la température est devenue uniforme; le mouvement périodique qui les constitue est devenu un mouvement intime, inappréciable à la vue, et ne se manifestant au sens du toucher que par la sensation spéciale que nous désignons par l'expression de *chaleur*.

(\*\*\*) Nous considérons comme négligeable l'accroissement de volume dû à la dilatation du verre, accroissement qui est très petit. Il s'agit d'ailleurs ici, comme on va le voir, non pas d'une expérience destinée à fournir des mesures précises, mais d'une disposition qui nous permette d'exposer, d'une manière simple, les résultats obtenus par des méthodes plus compliquées.

thermomètre sensible *t* au sein de la masse. Ces deux effets sont simultanés; examinons séparément chacun d'eux.

1° L'*accroissement de volume* du gaz détermine le déplacement d'une partie de la paroi de l'enceinte, qui est soumise extérieurement à la pression atmosphérique. Il y a donc un travail résistant accompli; c'est

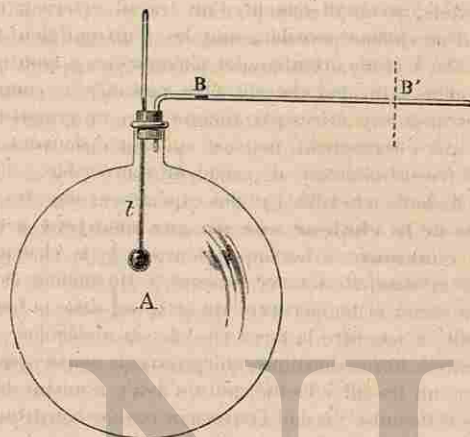


Fig. 275.

ce qu'on nomme le *travail extérieur*. — Dans la disposition actuelle, a valeur de ce travail, en kilogrammètres, s'obtiendrait en multipliant la pression de l'atmosphère sur une surface égale à la section du tube (pression évaluée en kilogrammes), par la longueur du chemin parcouru par la bulle (longueur évaluée en mètres) (\*).

2° L'*élévation de température* du gaz, au point de vue de la théorie actuelle, consiste en un *accroissement de force vive* dans les mouvements de ses molécules. — On peut évaluer, en grandes calories, la quantité de chaleur correspondante. En effet, les expériences calorimétriques ont montré que, pour échauffer 1 kilogramme d'air de 1 degré (sans variation de volume), il faut lui fournir 0<sup>m</sup>.1688. Dans le cas actuel, il suffira donc de multiplier ce nombre par le poids de l'air et

(\*) L'expression du *travail extérieur* peut encore être présentée sous une autre forme. — Soient *s* la section du tube, *b* la longueur BB' dont la bulle se déplace, et *p* la pression de l'atmosphère sur l'unité de surface. La pression sur la surface de la bulle est  $p \times s$ ; par suite, le travail accompli est  $p \times s \times b$ ; mais en remarquant que le produit  $s \times b$  n'est autre chose que l'accroissement de volume *u* de la masse gazeuse, on peut représenter le travail extérieur par  $p \times u$ , c'est-à-dire qu'il est égal au produit du nombre qui représente la pression de l'atmosphère sur l'unité de surface (pression évaluée en kilogrammes), par l'accroissement de volume du gaz (volume évalué en mètres cubes). — On démontre que cette expression convient également au cas où l'accroissement de volume de gaz se fait par le déplacement des diverses parties de la paroi, dans diverses directions.

par l'élévation de température, pour obtenir la quantité de chaleur qui correspond uniquement à la variation de température du gaz. — Cette *quantité de chaleur*, qui donne au gaz la propriété d'exercer une action nouvelle sur les instruments thermométriques, est ce qu'on nomme l'accroissement de *chaleur sensible*.

Ces deux effets, accomplissement d'un travail extérieur résistant et accroissement de chaleur sensible, sont les seuls qui aient ici une valeur appréciable. L'étude attentive des phénomènes a montré, en effet, que les molécules d'un gaz doivent être considérées comme n'étant assujetties les unes aux autres par aucune force de grandeur sensible, d'où résulte que l'écartement nouveau qu'elles éprouvent ne correspond à *aucun travail intérieur*, de grandeur appréciable. — C'est d'ailleurs ce que M. Joule a vérifié, par des expériences directes.

**401. Effets de la chaleur sur un gaz assujéti à conserver un volume constant.** — Lorsqu'on fournit de la chaleur à un gaz dont le volume est assujéti à rester constant, cette chaleur est employée uniquement à élever la température du gaz, ou, dans le langage de la théorie actuelle, à accroître la force vive de ses molécules. — Quant à l'accroissement de force élastique qu'éprouve la masse gazeuse, il ne représente pas un travail effectué, puisqu'il n'y a aucun déplacement des parois de l'enceinte. On doit l'envisager comme constituant simplement une manifestation de l'accroissement de force vive des molécules, manifestation différente de l'action exercée sur un thermomètre (\*).

Dès lors, toute la chaleur fournie au gaz restant ici à l'état de *chaleur sensible*, on comprend que la quantité de chaleur nécessaire, pour produire sur une même masse de gaz une même élévation de température, doit être moindre que dans le cas où il y a en même temps accroissement de volume, c'est-à-dire production d'un travail extérieur

(\*) Daniel Bernouilli a émis, dès 1758, une hypothèse sur la constitution des gaz, qui permet de se rendre compte de leurs diverses propriétés, et, entre autres, de celle dont il s'agit ici. — D'après Bernouilli, les molécules gazeuses, n'exerçant les unes sur les autres aucune action sensible, sont animées de mouvements rectilignes dans tous les sens, avec une vitesse constante pour chacune d'elles, et la valeur de cette vitesse dépend de la température elle-même. La *pression* qu'une masse gazeuse exerce sur la paroi qui la contient, est due à la succession des chocs de ses molécules, qui viennent s'y heurter pour prendre un mouvement en sens contraire. — Dès lors, une addition de chaleur communiquée à une masse gazeuse, sous volume constant, en augmentant la vitesse des molécules, donne à la fois à ce gaz la propriété d'accuser une *température plus élevée*, ce qui est la manifestation ordinaire de l'accroissement de force vive intérieure, et la propriété d'exercer sur les parois de son enceinte une *pression plus grande*, résultant de ce que les molécules viennent choquer la paroi avec une vitesse plus grande, et à des intervalles plus fréquents.

Cette hypothèse de Bernouilli, qui s'introduit dans le calcul avec une extrême simplicité, rend compte de toutes les propriétés des gaz; loi de Mariotte, loi de Gay-Lussac, etc. Elle peut donc être considérée comme ayant une grande valeur, mais elle n'est *nullement nécessaire* à la théorie mécanique de la chaleur; cette théorie subsisterait tout entière, alors même que certains faits viendraient rendre inadmissible l'hypothèse de Bernouilli sur la constitution des gaz.

résistant. — Ainsi s'explique, dans la théorie actuelle, ce fait que la chaleur spécifique d'un gaz à *volume constant* est plus petite que sa chaleur spécifique à *pression constante*.

Nous allons montrer maintenant comment la comparaison des valeurs numériques de ces deux chaleurs spécifiques conduit à une nouvelle détermination de l'*équivalent mécanique de la chaleur*.

**402. Détermination de l'équivalent mécanique de la chaleur, au moyen des propriétés connues des gaz.** — Pour échauffer de 1 degré 1 kilogramme d'air, sans faire varier son volume, on a vu (531) qu'il faut lui fournir une quantité de chaleur représentée par  $0^{\text{cal}},4688$ . — Pour échauffer de 1 degré 1 kilogramme d'air, en laissant son volume varier de manière que sa pression reste constante, on a vu (350) qu'il faut lui fournir une quantité de chaleur plus grande, représentée par  $0^{\text{cal}},2577$  en prenant pour unité la grande calorie. — Si l'on admet que, dans les variations de volume de l'air, le travail intérieur est nul (400), la différence  $0^{\text{cal}},0689$  entre les deux nombres qui précèdent représente la quantité de chaleur qui est équivalente au *travail extérieur* résistant, quand l'air prend l'accroissement de volume qui correspond à une élévation de température de 1 degré, sans variation de pression.

Évaluons ce travail extérieur, en supposant que la température initiale de l'air soit  $0^{\circ}$ , et que la pression soit égale à celle d'une colonne de mercure de 76 centimètres. La pression  $p$  sur 1 mètre carré, est 10 533 kilogrammes. D'autre part, le poids du mètre cube d'air étant  $1^{\text{kg}},295$ , le volume occupé par 1 kilogramme d'air dans les conditions initiales, volume évalué en mètres cubes, est  $\frac{1}{1,295}$ , c'est-à-dire  $0^{\text{m}},7754$ ; l'accroissement de volume  $u$ , pour une élévation de température de 1 degré, s'obtiendra en multipliant ce nombre par le coefficient de dilatation 0,00567; donc le travail extérieur, égal au produit  $p \times u$  (note de la page 525), est  $10\,533 \times 0,7754 \times 0,00567$ , ou 29,5290. — En divisant la valeur de ce travail par la quantité de chaleur qui a été dépensée pour le produire, on obtient

$$\frac{29,5290}{0,0689} = 425,68.$$

Telle est la valeur numérique de l'équivalent mécanique de la grande calorie, déterminée au moyen des propriétés de l'air (\*).

(\*) Le même calcul, appliqué à d'autres gaz, conduit à des résultats numériques très voisins, tant qu'il s'agit de gaz très éloignés de leur point de liquéfaction, comme l'hydrogène, l'oxygène ou l'azote. On trouve des nombres beaucoup plus grands, quand on l'applique à l'acide carbonique ou au protoxyde d'azote. On doit en conclure que, pour ces derniers gaz, le travail intérieur qui accompagne les changements de volume ne peut plus être regardé comme négligeable. — En d'autres termes, les

**403. Effets de la chaleur sur les corps solides ou liquides. Travail intérieur, accompagnant la variation de volume.** — Lorsqu'on fournit une certaine quantité de chaleur à un corps *solide* ou *liquide*, elle produit, comme dans un gaz, des effets de diverses natures; mais les proportions relatives de chaleur qui correspondent à chacun de ces effets sont tout autres.

Fournissons à un bloc de fer, ayant pour volume 1 décimètre cube, la quantité de chaleur nécessaire pour élever sa température de 100 degrés. — Le coefficient de dilatation cubique du fer étant beaucoup moindre que celui des gaz, l'accroissement de volume est beaucoup plus petit qu'il ne serait pour un gaz. Par suite, le *travail extérieur* résistant, qui correspond au déplacement de la surface pressée par l'atmosphère, est très petit. Mais c'est surtout par comparaison avec le travail intérieur, que le travail extérieur actuel va nous apparaître comme une quantité négligeable. — Si en effet on voulait produire, sur ce même bloc de fer maintenu à sa température primitive, un accroissement de volume pareil à celui que produit ici la chaleur, l'expérience montre qu'il faudrait exercer, sur chacune de ses faces, une traction de plusieurs centaines de mille kilogrammes. Dès lors, les molécules de ce corps doivent être considérées comme maintenues à des distances déterminées, par des forces considérables. La chaleur, en écartant les molécules les unes des autres, accomplit donc ici un *travail intérieur* résistant, qu'il est difficile d'évaluer avec précision, mais dont la valeur est très grande. — En outre, la masse de fer ayant maintenant acquis la propriété d'exercer sur le thermomètre une action différente de son action primitive, il y a eu accroissement de *chaleur sensible*, c'est-à-dire accroissement des forces vives de ses molécules.

En général, on peut dire qu'une quantité de chaleur déterminée, fournie à un corps solide ou liquide, se répartit de la manière suivante : — 1° Une partie de cette chaleur est employée à l'accomplissement du travail extérieur résistant; mais ce n'est là qu'une quantité généralement négligeable, dans les conditions ordinaires. — 2° Une autre partie est employée à accomplir un *travail intérieur* résistant, c'est-à-dire à produire l'écartement des molécules malgré les forces moléculaires; c'est la partie la plus considérable. — 3° La partie complémentaire reste à l'état de *chaleur sensible*: c'est l'équivalent calorifique de l'accroissement des forces vives des molécules (\*).

actions moléculaires ne peuvent être considérées comme nulles, que pour un corps qui présenterait l'état gazeux parfait.

(\*) Rappelons ici quelques faits bien connus, qui montrent la grandeur des effets mécaniques que peuvent produire les corps solides ou liquides, lorsqu'ils éprouvent des variations de température, dans des conditions où des obstacles résistants tendent à s'opposer à leurs variations de volume.

Des barres de fer, scellées à leurs deux extrémités dans la pierre, peuvent occasionner, par leurs variations de température, des ruptures dans les édifices les plus

**404. Passage de l'état solide à l'état liquide. — Chaleur de fusion.** — Quand un corps solide atteint une température déterminée, une nouvelle addition de chaleur le fait passer, en totalité ou en partie, à l'état liquide; c'est le phénomène de la fusion.

Or, de ce que la température reste constante pendant tout le temps que dure la fusion, on doit conclure qu'aucune partie de la chaleur fournie ne reste à l'état de *chaleur sensible*. Par suite, pendant la fusion, la somme des forces vives moléculaires du corps n'est pas modifiée. Toute la force vive cédée au corps a donc disparu. — Quant au travail extérieur, il est négligeable, lorsque le corps est placé dans l'atmosphère, eu égard à la petitesse de la variation de volume (\*).

La chaleur fournie pendant la fusion correspond donc presque tout entière à un *travail intérieur* résistant; malgré les actions moléculaires, les molécules ont été amenées dans des positions relatives différentes de celles qu'elles avaient à l'état solide, à la même température. — Cette chaleur absorbée a d'abord reçu le nom de *chaleur latente*, pour indiquer qu'elle n'est pas sensible au thermomètre: il est préférable de l'appeler *chaleur de fusion*.

**405. Passage de l'état liquide à l'état de vapeur. — Chaleur de vaporisation.** — Un liquide auquel on fournit des quantités de chaleur graduellement croissantes, et dont la surface est soumise à une pression invariable, atteint en général une température à laquelle il entre en ébullition: à partir de ce moment, la température reste constante, toute la chaleur fournie étant employée à convertir le liquide en vapeur. — Voyons comment cette chaleur est utilisée.

Et d'abord, la température ne s'élevant pas, aucune partie de la chaleur communiquée ne reste à l'état de *chaleur sensible*, c'est-à-dire que toute la force vive communiquée au liquide a disparu.

Quant au *travail extérieur* résistant, il n'est pas négligeable comme

solides. — Les feuilles de plomb ou de zinc, qui sont employées pour les toitures, arrachent les clous qui les fixent, lorsque le froid de l'hiver les fait contracter: on est obligé de les superposer comme des tuiles, pour permettre à la dilatation de se produire. — On comprend de même la nécessité de ménager des intervalles entre les rails successifs d'une voie ferrée; si ces intervalles sont insuffisants, les chaleurs de l'été arrivent à produire des déformations de la voie.

Lorsqu'un vase de verre a été entièrement rempli d'un liquide, et hermétiquement bouché, il suffit d'une élévation de température de quelques degrés pour briser le vase, alors même qu'il présente une grande résistance.

(\*) Au moment de la fusion, la variation de volume est d'ailleurs tantôt un accroissement, comme cela a lieu pour la plupart des corps, tantôt une diminution, comme cela a lieu pour l'eau et pour quelques autres substances. Le travail extérieur, dû au déplacement de la surface qui supporte les pressions extérieures, est donc tantôt résistant, tantôt moteur: il est toujours négligeable dans les circonstances ordinaires. Quand on lui donne des valeurs assez grandes, en augmentant la pression extérieure, les phénomènes deviennent plus complexes: il y a à la fois variation dans la quantité de chaleur nécessaire pour produire la fusion, et modification de la température de fusion, comme on l'a indiqué (271).

il l'était dans le cas de la fusion, puisque la vapeur acquiert un volume bien supérieur à celui du liquide. Ce travail doit donc correspondre à une partie notable de la chaleur absorbée par le corps, pendant l'ébullition. — L'autre partie de la chaleur fournie correspond à un *travail intérieur* résistant; malgré les actions moléculaires qui s'exerçaient dans le liquide, les molécules ont été amenées à des distances telles, que leurs actions réciproques deviennent négligeables.

Si l'on prend comme exemple l'ébullition de l'eau, on peut montrer, par un calcul simple, que la *chaleur de vaporisation*, c'est-à-dire la quantité de chaleur employée à la transformation du liquide en vapeur, correspond, pour  $\frac{1}{15}$  de sa valeur, à l'accomplissement du travail extérieur, dû à la pression atmosphérique; pour les  $\frac{14}{15}$ , à l'accomplissement du travail intérieur, dû aux actions moléculaires qui s'exerçaient dans le liquide (\*).

### III. — CONSERVATION ET TRANSFORMATIONS DE L'ÉNERGIE.

#### 406. Énergie actuelle, énergie potentielle, énergie totale. —

Dans les divers phénomènes que nous venons de passer en revue, on a pu constater que l'addition d'une certaine quantité de chaleur à un corps quelconque produit, en général, trois effets : *travail extérieur* résistant, *travail intérieur* résistant, et *accroissement de force vive des molécules* (chaleur sensible, élévation de la température). — On peut comprendre ces trois effets sous une même dénomination, en disant qu'une addition de chaleur à un corps lui communique, sous des formes diverses, un *accroissement d'énergie*. L'énergie d'un corps, est la faculté que possède ce corps de produire du travail (51). L'*énergie totale* se compose de l'*énergie actuelle* et de l'*énergie potentielle*.

On appelle *énergie actuelle* d'un corps, la force vive qui s'y manifeste, soit par un mouvement de translation commun à tous ses points, soit par des mouvements relatifs des points les uns par rapport aux autres. — Quand, à la suite d'une addition de chaleur, la

(\*) Voici ce calcul. — En tenant compte de la densité de la vapeur d'eau, par rapport à l'eau liquide, on trouve facilement que le volume occupé par 1 kilogramme de vapeur à 100° est égal à environ 1700 fois celui de l'eau qui l'a produite. Pour obtenir le travail *extérieur* résistant, il suffit de multiplier la pression  $p$  sur l'unité de surface, savoir 10553 kilogrammes, par l'accroissement de volume  $u$  exprimé en mètres cubes, savoir 1<sup>m</sup>.699; on trouve 17556 kilogrammètres. Pour évaluer la *quantité de chaleur* que représente ce travail extérieur, il suffit de diviser ce nombre par l'équivalent mécanique 425, ce qui donne 41 calories : en comparant cette quantité à la quantité totale de chaleur absorbée par l'eau pendant la vaporisation, 357 calories, on voit qu'elle en est environ la treizième partie. — Le reste de la chaleur fournie pendant l'ébullition, c'est-à-dire 496 calories (ou les  $\frac{14}{15}$  de la quantité totale), représente le travail *intérieur* résistant des actions moléculaires qui s'exerçaient dans le liquide.

température d'un corps s'élève, la force vive de chacune de ses molécules augmente, c'est-à-dire que l'*énergie actuelle* du corps s'accroît.

L'*énergie potentielle*, ou *énergie de position*, dépend de la position relative des molécules du corps. — Quand un corps passe d'un état déterminé à un autre état, si le travail des forces moléculaires ou le travail des pressions extérieures est *moteur*, c'est-à-dire si les molécules obéissent aux forces qui les sollicitent, l'énergie potentielle du corps *diminue*, puisque sa faculté de produire du travail diminue d'autant. Mais inversement, si, à la suite d'une addition de chaleur, le passage de l'état initial à l'état final est accompagné d'un travail *résistant* des forces moléculaires ou des pressions extérieures, l'énergie potentielle du corps *augmente* d'autant.

407. **Conservation et transformations de l'énergie, dans les phénomènes physiques.** — Envisageons, au point de vue qui vient d'être indiqué, quelques-uns des phénomènes physiques les plus simples.

Soit, par exemple, 1 kilogramme de glace à 0°, que l'on plonge dans une masse d'eau chaude, à une température suffisante pour déterminer la fusion de la masse de glace tout entière. — La glace fond sans élévation de température, c'est-à-dire que la force vive moléculaire de l'eau de fusion reste la même; en d'autres termes, cette eau n'éprouve aucun accroissement d'énergie actuelle. Toute la chaleur que la glace absorbe est employée au travail intérieur résistant, correspondant au déplacement de ses molécules par rapport à leurs positions moyennes primitives (404) : l'eau de fusion acquiert donc simplement un accroissement d'*énergie potentielle*, capable de reparaitre à l'état de chaleur sensible si cette même eau revenait à l'état solide. — Quant à la masse d'eau chaude dans laquelle la glace est plongée, on y constate : 1° un abaissement de température, c'est-à-dire une diminution d'*énergie actuelle*; 2° une diminution de volume, c'est-à-dire une production de travail intérieur moteur, correspondant à une diminution d'*énergie potentielle*. La somme de ces deux quantités constitue la diminution *totale* d'énergie de la masse d'eau chaude. — Lorsqu'on écrit que la quantité de chaleur gagnée par l'eau provenant de la fusion est égale à la quantité de chaleur perdue par l'eau chaude, on admet en réalité que, dans ce système de corps, il y a communication d'énergie d'un corps à un autre, transformation de cette énergie d'une forme en une autre, mais qu'il y a toujours *conservation* de l'énergie totale du système de corps mis en présence (\*).

408. — Considérons de même 1 kilogramme de vapeur d'eau à 100°,

(\*) La quantité d'énergie échangée, pour la fusion de 1 kilogramme de glace, correspond, comme on l'a vu (539), à une quantité de chaleur représentée par 80 grandes calories. Elle correspond donc à une quantité de travail représentée par  $80 \times 425$ , ou 34000 kilogrammètres.

que l'on met en présence d'une masse d'eau froide, en quantité suffisante pour déterminer la condensation de toute la masse de vapeur. — La vapeur se condense sans abaissement de température : l'eau de condensation n'éprouve donc aucune diminution d'énergie actuelle. La chaleur que la vapeur abandonne doit donc être considérée comme correspondant, 1° au travail extérieur moteur, accompli par la pression de l'atmosphère, au moment de la diminution considérable du volume primitivement occupé par la vapeur; 2° au travail intérieur moteur, accompli par les actions moléculaires de l'eau, dans son retour à l'état liquide. La somme de ces deux travaux moteurs représente une diminution d'énergie potentielle, dans l'eau de condensation. — Quant à la masse d'eau froide qui détermine la condensation, elle éprouve à la fois une élévation de température, c'est-à-dire un accroissement d'énergie actuelle, et un accroissement de volume, c'est-à-dire un accroissement d'énergie potentielle : la somme de ces deux quantités constitue l'accroissement total d'énergie de l'eau. — En écrivant que la quantité de chaleur perdue par la vapeur est égale à la quantité de chaleur gagnée par l'eau froide, on admet encore que, dans ce système de corps, il y a communication d'énergie d'un corps à un autre, mais conservation de l'énergie totale du système (\*).

Le principe de la conservation de l'énergie doit être considéré comme aussi général que le principe de la conservation de la matière elle-même. Dans les phénomènes les plus divers, un corps matériel qui semble se détruire éprouve simplement une transformation de son état primitif : de même, une disparition apparente quelconque d'énergie n'est jamais qu'une transformation, qui la fait apparaître sous une forme différente de sa forme primitive.

**409. Transformations de l'énergie, dans les phénomènes chimiques.** — Lorsque deux corps, mis en présence l'un de l'autre, arrivent à se combiner chimiquement, la réaction dégage une certaine quantité de chaleur.

On a vu (569), par exemple, que 1 kilogramme de charbon, en se combinant avec l'oxygène pour former de l'acide carbonique, dégage 7850 calories. Or cette quantité de chaleur correspond à une quantité de travail représentée, en kilogrammètres, par  $7850 \times 425$ , ou 3 327 750. On doit donc admettre que le charbon et l'oxygène, quand ils étaient en présence sans se combiner, sollicités par les forces dues à leur affinité mutuelle, possédaient cette même énergie à l'état potentiel : le nombre précédent représente le travail qu'ont accompli ces forces, au moment de la combinaison. — De même, 1 kilogramme

(\*) La quantité d'énergie échangée, pendant la condensation de 1 kilogramme de vapeur d'eau, correspond, comme on l'a vu (565), à une quantité de chaleur représentée par 557 grandes calories. Elle correspond donc à une quantité de travail représentée par  $557 \times 425$ , ou 228 225 kilogrammètres.

d'hydrogène, en se combinant avec l'oxygène, dégage environ 54 500 calories : le travail effectué au moment de la combustion est représenté par  $54\,500 \times 425$ , ou 14 662 500 kilogrammètres. — Dans tous les cas, le système des corps mis en présence éprouve, par le fait de la combinaison, une diminution d'énergie potentielle, et un accroissement égal d'énergie actuelle : l'énergie totale du système demeure constante, si la chaleur dégagée par la réaction est employée uniquement à échauffer les produits de la réaction.

Inversement, pour effectuer la décomposition d'un composé chimique, il faut, en général, lui fournir une quantité de chaleur égale à celle que ses éléments auront dégagée au moment de leur combinaison. C'est ce que l'expérience a pu vérifier, dans certains cas particuliers. — En d'autres termes, pour mettre en liberté deux corps combinés, il faut emprunter, à une source de chaleur, une quantité déterminée d'énergie, qui s'accumule dans ces corps à l'état potentiel (\*).

On doit donc considérer les phénomènes chimiques comme soumis, aussi bien que tous les autres phénomènes, au principe de la conservation de l'énergie.

410. — On démontre, en Mécanique, que si un système de corps peut se mettre en équilibre dans plusieurs positions, la stabilité de l'équilibre est d'autant plus grande, que l'énergie potentielle correspondante à cette position est plus petite. — La combinaison de deux corps, hydrogène et oxygène, n'est donc autre chose que le passage d'une position d'équilibre à une autre position plus stable; la diminution d'énergie potentielle qui résulte de ce passage est mesurée par la quantité de chaleur dégagée dans la réaction.

Quand un système de corps est en équilibre, il ne peut pas passer, de lui-même, de sa position actuelle à une position d'équilibre plus stable; mais si une cause extérieure vient à le déranger de son premier état, il peut alors tendre vers l'état le plus stable, correspondant à la plus grande diminution de l'énergie potentielle. — De même, quand plusieurs corps capables de réagir les uns sur les autres sont en présence, il faut généralement, pour déterminer la réaction, les déranger de leur état d'équilibre initial, soit par une élévation de la température, soit par une étincelle électrique, soit par une brusque compression; une fois l'équilibre rompu, le système tend vers la position d'équilibre la plus stable, c'est-à-dire, que l'énergie potentielle diminuant le plus possible, les forces moléculaires accomplissent le tra-

(\*) Certains composés chimiques, tels que les combinaisons oxygénées de l'azote, le chlorure d'azote et quelques autres, abandonnent au contraire de la chaleur en se détruisant. Ces composés ont reçu le nom général de *corps explosifs*, parce que la chaleur mise en liberté au moment de leur décomposition peut quelquefois donner à leurs éléments, amenés à l'état gazeux, une force expansive capable de produire une explosion. — Pour les composés de ce genre, c'est dans la combinaison toute formée qu'on doit admettre une énergie potentielle, se traduisant par l'apparition d'énergie calorifique, au moment où cette combinaison se détruit. Il est d'ailleurs digne de remarque qu'il est impossible de produire ces combinaisons directement, en mettant en présence leurs éléments séparés.

vail moteur maximum; autrement dit, les corps tendent à donner la réaction chimique qui correspond au plus grand dégagement de chaleur.

Tel est le sens du principe du *travail maximum*, dont M. Berthelot a fait le principe fondamental de la thermochimie.

**411. Coefficient économique des machines thermiques. — Principe de Carnot.** — On donne le nom général de *machines thermiques*, aux machines qui servent à transformer la chaleur en travail utile. — Dans une machine à vapeur, par exemple, la chaleur dégagée par la combustion du charbon, dans le foyer, se transmet à l'eau de la chaudière : la vapeur est l'intermédiaire qui sert à la transformation d'une partie de cette chaleur en travail, par le déplacement des résistances à vaincre.

Les remarques suivantes montrent que la machine à vapeur n'utilise pas, sous forme de travail, la *totalité* de la chaleur empruntée à la chaudière. — Considérons une machine à vapeur, munie d'un condenseur, et fonctionnant d'une manière régulière. La chaudière reste à une température constante, sous l'influence de la chaleur qu'elle emprunte au foyer, et de la chaleur qu'elle cède à la vapeur. Le condenseur reste également à une température constante, sous l'influence de la chaleur dégagée par la vapeur qui s'y condense, et de la chaleur absorbée par l'eau froide qui s'y renouvelle incessamment. — Or, c'est dans le condenseur que la chaudière puise son eau d'alimentation; on peut donc se représenter, de la manière suivante, la succession des phénomènes. Une quantité déterminée d'eau, prise à la température du condenseur, vient emprunter à la chaudière, que nous appellerons la *source chaude*, la quantité de chaleur nécessaire à sa conversion en vapeur; dans le cylindre, une partie de cette chaleur se transforme en travail, par le déplacement du piston; la vapeur revient ensuite au condenseur, que nous appellerons la *source froide*, et lui abandonne le reste de la chaleur qu'elle avait prise à la chaudière, puisqu'elle se retrouve à l'état liquide et dans les conditions initiales de température. On peut supposer que ce soit cette eau elle-même qui retourne ensuite à la chaudière, et qui continue à donner lieu à la même série de phénomènes. — Mais, pendant cette suite continue et périodique de transformations, il y a toujours perte, *au point de vue utile*, d'une partie de la chaleur empruntée à la chaudière. Pour s'en convaincre, il suffit de remarquer que, pendant la marche de la machine, le condenseur reçoit continuellement de l'eau à la température extérieure, et qu'une partie de cette eau est évacuée au dehors à une température plus élevée, celle du condenseur lui-même. La chaleur absorbée par cette eau est donc perdue pour le travail de la machine.

On appelle *coefficient économique* d'une machine déterminée, le rapport de la quantité de chaleur transformée en travail, à la quantité totale de chaleur fournie.

La théorie montre que, si la machine était absolument parfaite, son coefficient économique serait représenté numériquement par l'expression

$$\frac{T - T'}{T}, \quad \text{ou bien} \quad 1 - \frac{T'}{T},$$

dans laquelle T et T' représentent les *températures absolues* de la source chaude et de la source froide. On entend par températures absolues, les tem-

pératures comptées à partir d'un *zéro absolu*, qui serait situé, dans le thermomètre à air, à 275 degrés au-dessous de la glace fondante (\*).

Cette règle, qui résulte de considérations émises par Sadi Carnot en 1824, a été désignée depuis sous le nom de *principe de Carnot*. — Le principe de Carnot est d'ailleurs applicable à toutes les questions relatives à la transformation de la chaleur en travail : il a fourni des conséquences dont l'importance est comparable à celle du principe même de l'équivalence de la chaleur et du travail.

**412. Coefficient économique réel ou rendement des machines à vapeur.** — Les conditions de perfection, que la théorie suppose réalisées dans l'installation de la machine à vapeur, ne sont jamais pratiquement réalisables : la chaleur que la machine cède à l'air et aux corps qui l'environnent, les trépidations imprimées à ses divers organes, constituent autant de causes de déperdition d'énergie, qu'il est impossible de supprimer complètement. — Pour une machine déterminée, on appelle *coefficient économique réel*, ou *rendement*, le rapport entre la quantité de chaleur qui correspond au travail réellement utilisé, et la quantité totale de chaleur fournie. — Quelque soignée que soit la construction de la machine, l'expérience montre que ce rapport est toujours beaucoup inférieur au coefficient économique théorique.

Considérons, par exemple, une machine à vapeur, fonctionnant à une pression de 5 atmosphères, et où la température du condenseur serait maintenue à 40° centigrades. On sait que, à la pression de 5 atmosphères, correspond, pour la vapeur d'eau, une température de 155° centigrades; la température T de la chaudière (source chaude), comptée à partir du zéro absolu, est donc 155 + 275, ou 426. La température T' du condenseur (source froide), comptée à partir du zéro absolu, est 40 + 275, ou 315. Le coefficient économique théorique de cette machine, calculé comme il vient d'être dit (411), serait donc :  $1 - \frac{315}{426} = 0,26$ , c'est-à-dire que, théoriquement, le travail produit

par la machine devrait représenter  $\frac{1}{4}$  environ de la chaleur fournie. — Or, en mesurant directement, dans ces machines à moyenne pression, le travail utile et la chaleur fournie, pendant un temps déterminé, on trouve que le coefficient économique réel n'est guère, pour les machines les mieux construites, que  $\frac{1}{5}$ , ou quelquefois  $\frac{1}{4}$ .

413. — Bien que le coefficient économique réel soit toujours notablement inférieur au coefficient théorique, l'expérience montre qu'il *augmente*, comme le coefficient théorique, à mesure que l'on considère des machines fonctionnant à des températures plus élevées. — Aussi, est-ce dans ce sens que l'industrie

(\*) On est conduit à la considération du *zéro absolu* par l'emploi du thermomètre normal (212). Dans un pareil instrument, le degré de température est défini par une variation de force élastique du gaz, dont la valeur est  $\frac{1}{273}$  de la force élastique à la température de la glace fondante. Or, si l'on suppose que l'air passe successivement par une série de températures inférieures à celle de la glace fondante, et si l'on admet que la force élastique continue à décroître toujours de la même manière, on est conduit à ce résultat que, à 275 degrés, au-dessous du zéro ordinaire, la force élastique de l'air devrait avoir diminué des  $\frac{275}{275}$  de sa valeur initiale, c'est-à-dire que la force élastique devrait devenir nulle.

C'est cette température que l'on prend pour *zéro absolu*. — Étant donnée la température t d'un corps, comptée à partir du zéro ordinaire, on en déduit immédiatement la température absolue T, comptée à partir du zéro absolu,  $T = 275 + t$ .

tend chaque jour à perfectionner la construction des machines à vapeur.

La principale difficulté que l'on rencontre, dans cette voie, consiste dans l'accroissement rapide de la force élastique de la vapeur d'eau avec la température (289) : on arriverait à atteindre des pressions dangereuses pour la sécurité. — On a cherché, depuis quelques années, à tourner cette difficulté, en employant de la vapeur *surchauffée*, c'est-à-dire en faisant passer la vapeur, après sa sortie de la chaudière, dans des tubes où elle est portée à une température beaucoup plus haute. La force élastique de cette vapeur *non saturante* n'augmente, par cette élévation de température, que comme augmenterait la pression d'un gaz dans les mêmes conditions. On peut ainsi accroître beaucoup la température T, sans arriver à des pressions trop considérables, et le coefficient économique acquiert une valeur beaucoup plus grande.

Enfin, les machines à gaz, qui fonctionnent entre des limites de températures extrêmement éloignées, donnent, par cela même, un coefficient économique généralement bien supérieur à celui des machines à vapeur. Il peut atteindre et même dépasser la valeur  $\frac{1}{2}$ , pour certaines de ces machines.

**414. Origine de la chaleur et du mouvement chez les animaux.** — Chez les animaux, l'oxygène introduit dans le sang par la respiration produit une véritable combustion des éléments organiques : l'acide carbonique et la vapeur d'eau, qui apparaissent dans les produits de la respiration, proviennent de l'hydrogène et du carbone qui étaient contenus dans les aliments ou dans les tissus de l'animal, mais qui n'y étaient combinés qu'avec une faible quantité d'oxygène. De même, l'urée, qui est éliminée par les urines, est un produit de la combustion des matières azotées. — C'est l'énergie dépensée dans ces phénomènes de combustion, qui constitue la source de production de la chaleur animale.

Si maintenant l'animal exécute des mouvements, s'il produit un *travail résistant*, une partie de l'énergie fournie par les combinaisons chimiques est employée à l'accomplissement de ce travail, absolument comme, dans une machine à vapeur en activité, une partie de la chaleur développée par le combustible est convertie en travail utile (\*).

Cette manière d'envisager les phénomènes de mouvement chez les animaux, formulée dès 1845 par Jules-Robert Mayer, médecin à Heilbronn, a reçu une remarquable confirmation par les expériences de M. Hirn, en 1858. — Ces expériences ont montré que, pour 1 gramme d'oxygène absorbé, la quantité de chaleur restée à l'état de chaleur sensible est toujours moindre pendant le mouvement que pendant le repos. En d'autres termes, à une même dépense d'énergie respiratoire,

(\*) D'après M. Helmholtz, quand un homme gravit une montagne, le travail résistant de son propre poids est égal à la cinquième partie du travail mécanique correspondant à la combustion respiratoire effectuée pendant le même temps. En d'autres termes, le coefficient économique de la machine humaine (411) est  $\frac{1}{5}$ . Cette machine présente donc une perfection remarquable, eu égard aux limites étroites de température entre lesquelles elle fonctionne (415).

correspond l'apparition d'une énergie calorifique moindre pendant le mouvement que pendant le repos; la différence représente évidemment l'énergie mécanique qui correspond au travail effectué (\*).

C'est donc le travail des affinités chimiques, c'est-à-dire l'énergie rendue disponible par la combustion respiratoire, qui est en définitive la cause de nos mouvements. L'animal, doué de mouvement volontaire, ne crée pas plus la force nécessaire à l'accomplissement de ses divers actes, qu'une machine thermique ne crée la force qui rend ses organes capables d'effectuer un travail mécanique. « L'intervention de la volonté, comme l'a dit Robert Mayer, est seulement assimilable à celle du machiniste qui, dans un navire à vapeur, distribue à la machine, d'une manière intelligente, l'énergie mise en liberté par la combustion du charbon. »

**415. Absorption de la chaleur solaire, pour le développement des végétaux.** — Dans les végétaux, les phénomènes chimiques de la vie sont, pour ainsi dire, inverses de ceux de la vie animale. Le végétal peut être considéré comme empruntant, au milieu qui l'environne, l'eau et l'acide carbonique, pour les convertir en des composés dont l'oxygène est éliminé presque en totalité, et qui sont formés principalement d'hydrogène et de carbone; les substances des tissus végétaux sont, comme on l'a dit quelquefois, des matières *débrûlées*.

Le développement des tissus végétaux constitue donc un phénomène contraire aux affinités chimiques; il exige que le végétal emprunte, à une source extérieure, l'énergie nécessaire à l'accomplissement du travail de séparation de l'eau, de l'acide carbonique, ou d'autres substances plus ou moins complexes. — Cette source d'énergie n'est autre que le Soleil : l'énergie que la plante utilise, c'est la force vive du mouvement vibratoire des radiations solaires, qui lui parvient sous forme d'énergie calorifique ou lumineuse.

Il faut remarquer cependant que, là encore, il n'y a qu'une simple transformation d'énergie. Les éléments chimiques de la plante, séparés de l'oxygène auquel ils étaient primitivement combinés, ont acquis, par cela même, un accroissement d'énergie *potentielle*, qui reparaitra à l'état d'énergie actuelle, le jour où ces éléments se combineront de nouveau avec l'oxygène, c'est-à-dire le jour où ils éprouveront une combustion les ramenant à l'état d'eau et d'acide carbonique. (R)

(\*) Il est essentiel de remarquer que ces résultats ne sont pas en contradiction avec ce fait, d'observation journalière, qu'un exercice violent amène généralement le corps humain à une température plus élevée que pendant le repos. La mesure des gaz absorbés montre, en effet, que les mouvements musculaires activent considérablement la respiration. Dès lors, l'énergie respiratoire mise en jeu dans le même temps étant beaucoup plus considérable, on conçoit que la température du corps puisse s'élever, bien qu'une partie de cette énergie soit employée au travail extérieur, si l'autre partie, restant à l'état d'énergie calorifique, est supérieure à la valeur qu'elle pendant le repos. — C'est en effet ce que montrent les expériences de mesure.



416. **Le Soleil est la source de tout mouvement à la surface de la Terre.** — L'ensemble des considérations qui précèdent, et dont Robert Mayer a fait ressortir la valeur, conduit à envisager le soleil comme la source de toute énergie, à la surface de notre globe.

L'animal trouve, dans la combustion des matériaux de ses aliments, l'énergie nécessaire à ses mouvements (414). Or, un grand nombre d'animaux sont exclusivement herbivores : ceux qui sont carnivores se nourrissent d'animaux qui ont pris eux-mêmes au règne végétal les éléments de leurs tissus. Dès lors, toutes les substances qui interviennent, comme combustibles, dans la respiration des animaux, sont empruntées aux végétaux, soit directement, soit indirectement. — D'autre part, les végétaux empruntent à la chaleur solaire l'énergie nécessaire à la formation de ces substances combustibles elles-mêmes (415). — C'est donc la chaleur solaire qui est la source des mouvements effectués par les animaux : les végétaux constituent des intermédiaires, qui gardent en réserve l'énergie fournie par le soleil, et la fournissent à leur tour aux animaux qu'ils alimentent.

Quant aux mouvements effectués par nos machines à feu, ils empruntent à la même origine l'énergie qui y est mise en jeu. — Pour les machines alimentées par la combustion du bois, la chose est évidente, d'après ce qui vient d'être dit. — Les machines qui sont alimentées par la combustion de la houille ne font qu'emprunter, au combustible enfoui dans le sol, l'énergie que la chaleur solaire avait accumulée dans les végétaux des siècles passés.

C'est la chaleur solaire qui transforme en vapeur les eaux des mers, des lacs ou des fleuves, et qui contribue ainsi à la formation des nuages; l'énergie accumulée par la vaporisation, dans ces masses d'eau suspendues au sein de notre atmosphère, reparait à l'état d'énergie sensible, quand elles retombent sous la forme de pluie ou de neige, et viennent former les torrents, les rivières, les fleuves qui descendent vers la mer. — C'est la force vive de ces cours d'eau que nous utilisons, pour mettre en mouvement nos machines hydrauliques.

C'est encore la chaleur solaire qui produit, dans notre atmosphère, ces mouvements continuels qui constituent les vents, et qui transportent l'air d'une région du globe à une autre. — Quand l'homme utilise cette force vive de translation de l'air, pour gonfler les voiles des navires ou pour faire tourner les ailes des moulins, il ne fait encore qu'employer, pour un travail utile, une énergie dont l'origine est tout entière dans la force vive des radiations émises par le Soleil.

## LIVRE TROISIÈME

### ÉLECTRICITÉ ET MAGNÉTISME

#### CHAPITRE PREMIER

##### ÉLECTRICITÉ STATIQUE

###### 1. — PRINCIPES FONDAMENTAUX.

417. **Électrisation des corps par le frottement.** — On sait, depuis une époque fort reculée, que l'ambre jaune ou succin (*ἤλεκτρον*), lorsqu'on le frotte, acquiert la propriété d'attirer les corps légers, tels que les barbes de plume, ou les petits fragments de papier; cette propriété fut attribuée à une cause spéciale, qui prit le nom d'*électricité*.

En 1550, Gilbert, médecin de la reine Élisabeth d'Angleterre, reconnut la même propriété dans un grand nombre d'autres corps, comme la résine, le soufre, le verre; toutes ces substances s'*électrisent* quand on les frotte, c'est-à-dire qu'elles deviennent capables d'attirer les corps légers. — D'autres substances, comme les métaux, le liège, le bois, tenues à la main et frottées, ne paraissent pas s'*électriser*: nous allons voir que ces exceptions ne sont qu'apparentes.

418. **Corps conducteurs de l'électricité.** — Au commencement du dix-huitième siècle, le physicien anglais Gray fut conduit à envisager les phénomènes à un point de vue tout nouveau. — Ayant frotté un tube de verre fermé par un bouchon, il constata que le verre communiquait au bouchon la propriété d'attirer les corps légers. Il planta alors dans le bouchon une tige de sapin, terminée par une boule d'ivoire : en recommençant l'expérience, il vit également la boule d'ivoire s'*électriser*. Enfin, en suspendant à la tige de sapin une longue corde de chanvre terminée par une boule métallique, il vit encore cette boule acquérir la même propriété. — Tout se passait donc, dans ces expériences, comme si l'électricité était due à une sorte de fluide, que le frottement aurait fait apparaître, et qui se serait ensuite répandu dans

**416. Le Soleil est la source de tout mouvement à la surface de la Terre.** — L'ensemble des considérations qui précèdent, et dont Robert Mayer a fait ressortir la valeur, conduit à envisager le soleil comme la source de toute énergie, à la surface de notre globe.

L'animal trouve, dans la combustion des matériaux de ses aliments, l'énergie nécessaire à ses mouvements (414). Or, un grand nombre d'animaux sont exclusivement herbivores : ceux qui sont carnivores se nourrissent d'animaux qui ont pris eux-mêmes au règne végétal les éléments de leurs tissus. Dès lors, toutes les substances qui interviennent, comme combustibles, dans la respiration des animaux, sont empruntées aux végétaux, soit directement, soit indirectement. — D'autre part, les végétaux empruntent à la chaleur solaire l'énergie nécessaire à la formation de ces substances combustibles elles-mêmes (415). — C'est donc la chaleur solaire qui est la source des mouvements effectués par les animaux : les végétaux constituent des intermédiaires, qui gardent en réserve l'énergie fournie par le soleil, et la fournissent à leur tour aux animaux qu'ils alimentent.

Quant aux mouvements effectués par nos machines à feu, ils empruntent à la même origine l'énergie qui y est mise en jeu. — Pour les machines alimentées par la combustion du bois, la chose est évidente, d'après ce qui vient d'être dit. — Les machines qui sont alimentées par la combustion de la houille ne font qu'emprunter, au combustible enfoui dans le sol, l'énergie que la chaleur solaire avait accumulée dans les végétaux des siècles passés.

C'est la chaleur solaire qui transforme en vapeur les eaux des mers, des lacs ou des fleuves, et qui contribue ainsi à la formation des nuages; l'énergie accumulée par la vaporisation, dans ces masses d'eau suspendues au sein de notre atmosphère, reparaît à l'état d'énergie sensible, quand elles retombent sous la forme de pluie ou de neige, et viennent former les torrents, les rivières, les fleuves qui descendent vers la mer. — C'est la force vive de ces cours d'eau que nous utilisons, pour mettre en mouvement nos machines hydrauliques.

C'est encore la chaleur solaire qui produit, dans notre atmosphère, ces mouvements continuels qui constituent les vents, et qui transportent l'air d'une région du globe à une autre. — Quand l'homme utilise cette force vive de translation de l'air, pour gonfler les voiles des navires ou pour faire tourner les ailes des moulins, il ne fait encore qu'employer, pour un travail utile, une énergie dont l'origine est tout entière dans la force vive des radiations émises par le Soleil.

## LIVRE TROISIÈME

### ÉLECTRICITÉ ET MAGNÉTISME

#### CHAPITRE PREMIER

##### ÉLECTRICITÉ STATIQUE

###### 1. — PRINCIPES FONDAMENTAUX.

**417. Électrisation des corps par le frottement.** — On sait, depuis une époque fort reculée, que l'ambre jaune ou succin (*ἤλεκτρον*), lorsqu'on le frotte, acquiert la propriété d'attirer les corps légers, tels que les barbes de plume, ou les petits fragments de papier; cette propriété fut attribuée à une cause spéciale, qui prit le nom d'*électricité*.

En 1550, Gilbert, médecin de la reine Élisabeth d'Angleterre, reconnut la même propriété dans un grand nombre d'autres corps, comme la résine, le soufre, le verre; toutes ces substances s'*électrisent* quand on les frotte, c'est-à-dire qu'elles deviennent capables d'attirer les corps légers. — D'autres substances, comme les métaux, le liège, le bois, tenues à la main et frottées, ne paraissaient pas s'*électriser*: nous allons voir que ces exceptions ne sont qu'apparentes.

**418. Corps conducteurs de l'électricité.** — Au commencement du dix-huitième siècle, le physicien anglais Gray fut conduit à envisager les phénomènes à un point de vue tout nouveau. — Ayant frotté un tube de verre fermé par un bouchon, il constata que le verre communiquait au bouchon la propriété d'attirer les corps légers. Il planta alors dans le bouchon une tige de sapin, terminée par une boule d'ivoire : en recommençant l'expérience, il vit également la boule d'ivoire s'*électriser*. Enfin, en suspendant à la tige de sapin une longue corde de chanvre terminée par une boule métallique, il vit encore cette boule acquérir la même propriété. — Tout se passait donc, dans ces expériences, comme si l'électricité était due à une sorte de fluide, que le frottement aurait fait apparaître, et qui se serait ensuite répandu dans

les corps mis en contact avec celui qui avait été frotté. — Telle fut l'origine de cette dénomination de *fluide électrique*, qui prit place dans la langue scientifique, et sur laquelle nous reviendrons.

Nous appellerons *corps conducteurs* les corps, tels que le bois, l'ivoire, le chanvre, les métaux, qui paraissent n'opposer à la propagation de l'électricité, ou du fluide électrique, qu'une résistance insensible.

419. **Le sol et le corps humain sont des corps conducteurs.** — Dans l'expérience de Gray, on constata, en outre, que la boule métallique perdait son électricité dès qu'on venait à lui faire toucher le sol. Le sol devait donc être considéré comme un corps conducteur, dans lequel s'était répandue l'électricité développée, et où la présence de cette électricité était devenue insensible, en raison des énormes dimensions de la Terre par rapport à la boule.

Enfin, la boule électrisée perdait encore son électricité lorsque, sans la mettre directement en contact avec le sol, on venait à la toucher avec la main. Le corps de l'opérateur avait donc joué le rôle d'un corps conducteur, établissant la communication entre la boule métallique et le sol lui-même.

420. **Corps mauvais conducteurs.** — Revenons maintenant sur les expériences fondamentales qui nous ont servi à constater le développement de l'électricité par le frottement.

Quand on frotte l'extrémité d'un bâton de résine, les points frottés s'électrisent, mais les autres points du bâton ne manifestent pas trace d'électricité. La résine est donc un corps *mauvais conducteur*, c'est-à-dire qu'elle oppose au passage du fluide électrique une résistance, l'empêchant de se répandre dans toute son étendue. — C'est grâce à cette propriété que nous pouvons constater la présence de l'électricité dans le bâton de résine, tout en le tenant à la main par son autre extrémité. Si la résine était conductrice, l'électricité développée s'y propagerait jusqu'à la main de l'opérateur, et irait se perdre dans le sol.

Parmi les corps *mauvais conducteurs*, nous citerons la résine, le verre, le soufre, le caoutchouc, la soie, le papier, etc. — Dans tous ces corps, il est toujours facile de constater la présence de l'électricité développée par le frottement.

L'air lui-même est un corps mauvais conducteur; il est clair, en effet, que si l'air était conducteur, l'électricité développée à la surface des corps se perdrait dans l'atmosphère, et les phénomènes électriques nous seraient probablement inconnus. — Cependant l'air devient plus ou moins conducteur lorsqu'il est humide; c'est ce qui rend parfois les expériences d'électricité difficiles à réaliser.

421. **Tous les corps sont électrisables par le frottement.**

— Les métaux étant conducteurs, pour savoir si le frottement peut ou non les électriser, il est indispensable de placer, entre eux et la main de l'opérateur, un corps *mauvais conducteur*, afin que, s'il

vient à se développer de l'électricité, elle ne puisse pas se perdre dans le sol. — Or, si l'on frotte un cylindre métallique A (fig. 276), en le tenant par un manche de verre M, on constate que le métal acquiert la propriété d'attirer les corps légers, et cette propriété se manifeste, non seulement aux points frottés, mais sur tous les points du cylindre. — Le frottement a donc produit de l'électricité. Cette électricité s'est répandue sur toute la surface du métal; mais le manche de verre lui a opposé une barrière infranchissable. — Le manche de verre prend alors le nom de corps *isolant*.

En général, *tous les corps sont électrisables par le frottement*, mais ceux qui sont conducteurs ne peuvent conserver leur électricité qu'à la condition d'être *isolés* du sol par un corps mauvais conducteur.

422. **Distinction des deux espèces d'électricités.** Fig. 276.

— En 1755, les expériences du physicien français Du Fay montrèrent que, suivant les cas, le frottement peut développer des électricités de deux espèces différentes. — Pour répéter ces expériences, nous emploierons, comme corps léger, un *pendule électrique* (fig. 277), c'est-à-dire une petite balle de moelle de sureau A, suspendue à un fil de soie E, fixé lui-même à un support de verre C. La soie et le verre constituant des supports isolants, la balle de sureau gardera l'électricité qui pourra lui être communiquée.

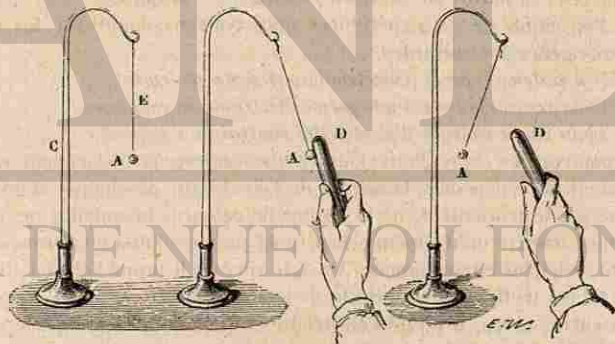


Fig. 277.

Distinction des deux électricités.

Fig. 278.

Approchons d'abord de la balle de sureau un bâton de résine D, frotté avec du drap. Elle est attirée; mais, dès qu'elle a touché la résine (fig. 277), elle est *repoussée*, comme le représente la figure 278. Or, en touchant la résine, la balle de sureau a pris une partie de son électricité; cette expérience montre donc que deux corps, chargés de l'élec-

tricité de la résine, se repoussent. — Approchons maintenant, de la balle ainsi électrisée par la résine, un bâton de verre frotté avec un morceau de drap : elle est attirée. L'électricité du verre est donc différente de celle de la résine. — Pour distinguer entre elles ces deux électricités, nous les appellerons provisoirement *électricité vitrée* et *électricité résineuse*.

Nous pouvons maintenant reprendre cette expérience, en opérant avec les deux mêmes corps dans un ordre inverse. — Nous toucherons d'abord la balle de sureau avec la main, pour conduire dans le sol l'électricité qu'elle avait reçue. Nous en approchons alors le bâton de verre électrisé : la balle de sureau viendra toucher le verre, et, après en avoir pris une partie de son électricité, elle sera repoussée; donc deux corps chargés d'électricité vitrée se repoussent, aussi bien que deux corps chargés d'électricité résineuse. — Au contraire, la balle ainsi chargée d'électricité vitrée est attirée par la résine.

On peut constater enfin que, si l'on prend un corps quelconque, électrisé par frottement, et si on le présente successivement à deux pendules, dont l'un aura été chargé d'électricité vitrée, et l'autre d'électricité résineuse, ce corps exerce toujours une répulsion sur l'un de ces pendules et une attraction sur l'autre, c'est-à-dire qu'il manifeste toujours, soit les propriétés de l'électricité vitrée, soit les propriétés de l'électricité résineuse. — Il n'y a donc pas lieu de distinguer une troisième électricité, et les deux dénominations précédentes suffisent pour caractériser la nature de toutes les charges électriques.

De l'ensemble de ces expériences nous pouvons donc tirer les conclusions générales suivantes :

- 1° Il y a deux espèces d'électricités, et deux seulement;
- 2° Deux corps chargés d'une même électricité se repoussent;
- 3° Deux corps chargés d'électricités contraires s'attirent.

Cependant les expressions d'électricité résineuse et d'électricité vitrée semblent faire dépendre la nature de l'électricité développée dans un corps, par le frottement, de la nature de ce corps lui-même; or, l'expérience montre qu'un même corps peut prendre l'une ou l'autre électricité, selon les circonstances. Ainsi, le verre poli prend l'électricité vitrée, s'il est frotté avec une étoffe de laine; mais, s'il est frotté avec certains autres corps, il prend l'électricité résineuse. Aussi remplacerons-nous l'expression d'électricité vitrée par celle d'électricité positive, et l'expression d'électricité résineuse par celle d'électricité négative.

Ces dénominations, empruntées à une théorie de Franklin dont nous dirons quelques mots plus loin, n'auront pour nous qu'une signification purement conventionnelle.

425. **Deux corps frottés l'un contre l'autre prennent des électricités contraires.** — En frottant un bâton de verre avec un morceau de drap, nous avons constaté que le verre s'électrise. Mais le

drap ne s'électrise-t-il pas aussi? L'expérience, telle que nous l'avons faite, ne permet pas de répondre à cette question; car, le drap étant conducteur et étant tenu à la main, l'électricité qui pourrait s'y développer se perdrait dans le sol.

Modifions donc l'expérience, et prenons un morceau de drap tendu sur un plateau de bois B (fig. 279), supporté lui-même par un manche

de verre isolant. Prenons également un plateau de verre C, supporté par un manche pareil. Après avoir frotté les deux plateaux l'un contre l'autre, approchons-les tour à tour d'un pendule que nous aurons chargé, par exemple, d'électricité négative : ce pendule est attiré par le verre et repoussé par le drap. Donc, le frottement n'a pas seulement développé

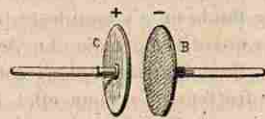


Fig. 279.  
Deux corps frottés prennent des électricités contraires.

de l'électricité positive dans le verre; il a aussi développé de l'électricité négative dans le drap. — En général, deux corps frottés l'un contre l'autre acquièrent simultanément des électricités contraires (\*).

424. **Hypothèse des fluides électriques. — Théorie de Franklin et théorie de Symmer.** — Nous avons vu (418) comment la propagation de l'électricité dans les corps conducteurs a conduit, dès les premières expériences, à considérer l'électricité elle-même comme due à un fluide particulier, capable de se répandre dans les corps qui ne lui opposent pas de résistance.

Cette hypothèse a été acceptée par les savants du siècle dernier. A cette époque, on expliquait d'ailleurs les phénomènes de la chaleur ou de la lumière par des hypothèses analogues, hypothèses abandonnées depuis qu'on a pu rattacher ces phénomènes à des mouvements vibratoires. — L'hypothèse du fluide électrique est sans doute destinée à disparaître également de la science. Mais, aucune autre n'ayant pu jusqu'ici rendre un compte exact des faits, on peut la conserver, au moins provisoirement, en raison de la simplicité avec laquelle elle permet de représenter l'ensemble des phénomènes.

Avant d'aller plus loin, nous devons indiquer comment la théorie du fluide électrique a été complétée, pour interpréter les deux faits fondamentaux que nous venons de constater, savoir : le développement d'électricités contraires dans deux corps frottés l'un contre l'autre, et

(\*) On a pu dresser des tableaux dans lesquels les corps sont placés dans un ordre tel, que chacun d'eux prend l'électricité positive, s'il est frotté par l'un des corps qui le suivent, et l'électricité négative, s'il est frotté par l'un des corps qui le précèdent. Voilà l'un de ces tableaux :

|                   |            |                  |
|-------------------|------------|------------------|
| 1. Peau de chat.  | 4. Plumes. | 7. Soie.         |
| 2. Verre poli.    | 5. Bois.   | 8. Gomme laque.  |
| 3. Drap de laine. | 6. Papier. | 9. Verre dépoli. |

les attractions ou répulsions produites par les corps électrisés. — Deux théories différentes ont été émises, l'une par Franklin, l'autre par le physicien anglais Symmer.

D'après la théorie de Franklin, tous les corps, quand ils sont à l'état naturel, c'est-à-dire quand ils ne manifestent pas trace d'électrisation, contiennent cependant une quantité déterminée de fluide électrique. Quand plusieurs corps à l'état naturel sont en présence, l'existence de ce fluide ne s'y manifeste pas, parce que, chacun d'eux en contenant sa quantité normale, il ne tend à se produire entre eux aucun échange. — Quand on frotte deux corps l'un contre l'autre, Franklin admet que le frottement a pour effet de faire passer une partie du fluide électrique de l'un dans l'autre, en sorte que, au moment où on les sépare, le premier contient moins de fluide qu'il n'en contenait à l'état naturel : il est à l'état négatif. Le second en contient plus qu'il n'en contenait à l'état naturel : il est à l'état positif. — On démontre, par le calcul, que les effets d'attraction ou de répulsion, qui se produisent entre des corps contenant ainsi des quantités plus ou moins grandes de fluide électrique, peuvent s'expliquer par les actions qui tendent à faire passer le fluide des uns aux autres.

D'après Symmer, tous les corps contiennent naturellement deux fluides électriques, d'espèces contraires : on les désigne sous les noms de fluide positif et fluide négatif, dénominations empruntées à la théorie de Franklin, mais qui n'ont plus ici qu'un sens conventionnel. — Avant d'avoir été frottés, les corps contiennent le fluide positif et le fluide négatif en quantités égales dans tous leurs points : on dit qu'ils sont alors à l'état neutre. — Le frottement a pour effet de faire passer sur l'un d'eux une partie du fluide positif de l'autre, et sur le second une partie du fluide négatif du premier : par suite, au moment de la séparation, l'un des corps manifeste, d'une manière prédominante, les propriétés du fluide positif; l'autre, les propriétés du fluide négatif. — Enfin, pour expliquer les attractions ou les répulsions qui se produisent entre les corps électrisés, il suffit d'admettre que les molécules d'un même fluide se repoussent entre elles, et que les molécules des fluides de noms contraires s'attirent.

Pour l'interprétation des phénomènes électriques, c'est la théorie de Symmer, c'est-à-dire la théorie des deux fluides, qui présente le plus de facilités.

## II. — LOIS DES ACTIONS ÉLECTRIQUES. — DISTRIBUTION DE L'ÉLECTRICITÉ. — DÉPERDITION.

425. **Énoncé des lois de Coulomb.** — Coulomb a étudié, par des expériences précises, les lois suivant lesquelles varient les actions, attractives ou répulsives, qui s'exercent entre deux petites sphères

chargées d'électricité, quand on fait varier, soit la distance qui les sépare, soit les quantités d'électricités qu'elles possèdent. Voici les résultats de ces expériences.

Lorsque les deux sphères, chargées d'électricités de même nom, sont placées successivement à différentes distances, les forces répulsives sont en raison inverse des carrés des distances.

Supposons maintenant qu'on ait d'abord mesuré la force répulsive qui s'exerce, à une certaine distance, entre deux petites sphères conductrices, chargées d'une même électricité : si, en touchant l'une d'elles avec une autre sphère égale, on lui enlève la moitié de sa charge, on constate que la force répulsive, à la même distance, devient moitié moindre : si l'on enlève également à l'autre sphère la moitié de sa charge, la force répulsive est encore diminuée de moitié, c'est-à-dire qu'elle devient, à la même distance, quatre fois moindre qu'elle n'était au commencement. En continuant ainsi, on trouve, d'une manière générale, que les forces répulsives exercées à une même distance, entre des sphères chargées d'électricités de même nom, sont proportionnelles aux produits des quantités d'électricité que possèdent les deux sphères.

Les mêmes lois sont applicables aux forces attractives développées entre des sphères chargées d'électricités contraires.

Les vérifications expérimentales de ces lois étant d'autant plus exactes que les dimensions des sphères sont plus petites par rapport à la distance qui les sépare, on considère ces lois elles-mêmes comme applicables aux actions qui s'exercent entre des éléments électriques infiniment petits, placés à des distances finies les uns des autres.

426. **Balance de torsion.** — La balance de torsion, imaginée en 1785 par Coulomb pour établir les lois des attractions et des répulsions électriques, est représentée par la figure 280.

Une tige de gomme laque *lod*, qui porte en *b* une boule en moelle de sureau dorée, est soutenue par un fil d'argent au centre d'une cage de verre cylindrique, dont l'air est desséché par du chlorure de calcium. L'extrémité supérieure du fil d'argent est fixée dans un bouton métallique *f*, qui peut tourner au centre du tambour *t*; on peut évaluer la rotation de *f* en observant le déplacement du repère *r* sur une graduation tracée sur le tambour *t*. Ce tambour *t* est mobile, à frottement dur, sur le tambour fixe *t'*. — Une boule métallique *a*, isolée par une tige de verre, peut être introduite dans la cage à la hauteur de *b*, de telle sorte que la balle

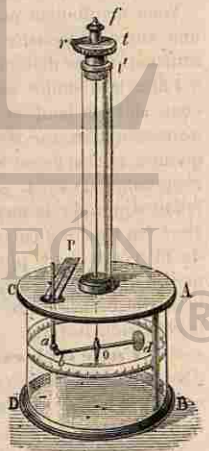


Fig. 280.  
Balance de Coulomb.

de sureau *b* vienne toucher la boule *a*, et prendre sa place, quand celle-ci s'est écartée. Dans le même plan horizontal, la cage porte une division en degrés, dont le zéro est situé en face de *a*.

Pour régler la balance on enlève d'abord la boule *a*; on amène le repère *r* vis-à-vis le zéro de la graduation *t*; enfin, en soulevant le tambour *t*, de manière qu'il tourne librement à l'intérieur du tambour *t'*, on fait en sorte que la balle de sureau *b* arrive à se placer vis-à-vis le zéro de la graduation de la cage, c'est-à-dire à la place que viendra occuper la boule *a*. — L'appareil étant ainsi préparé, on électrise la boule *a* et on l'introduit dans la cage; l'électricité se partage entre les deux boules conductrices *a* et *b*, et la boule *b* est repoussée. Dans l'une des expériences de Coulomb la distance angulaire des deux boules était de  $56^\circ$ ; la torsion du fil était donc de  $56^\circ$ , et comme on sait que la force de torsion est proportionnelle à l'angle de torsion, la force répulsive qui s'exerçait entre les deux boules, à une distance représentée par 56, était équilibrée par une force de torsion que l'on pouvait représenter par le même nombre. En tournant alors le bouton *f* en sens inverse du déplacement de la balle de sureau, on ramenait la distance angulaire à n'être plus que  $18^\circ$ ; l'observation du repère *r* montrait qu'il avait fallu tourner le bouton *f* de  $126^\circ$ ; la torsion totale du fil était donc  $18^\circ + 126^\circ = 144^\circ$ . La force répulsive, qui s'exerçait entre les deux boules chargées comme précédemment, mais à une distance représentée par 18, était équilibrée donc par une force de torsion représentée par 144. — Or, dans la deuxième expérience, la distance 18 était la moitié de la distance 56 dans la première expérience; la force de répulsion 144 était quatre fois plus grande que la répulsion primitive 56. — La loi des distances était donc ainsi vérifiée.

Voici maintenant un exemple de vérification de la loi des charges. — Dans une autre expérience de Coulomb, la boule *b* ayant été chassée à  $48^\circ$ , on la ramenait à une distance angulaire de  $28^\circ$ , par une rotation du bouton égale à  $120^\circ$ ; la distance étant 28, la répulsion était  $28 + 120 = 148$ . — On touchait alors la boule *a* avec une boule identique *a'*; quand on retirait *a'*, il ne restait plus sur *a* qu'une charge égale à la moitié de la charge initiale; quant à la charge de *b*, elle n'avait pas été modifiée; on voyait la balle *b* se rapprocher de *a*, et, pour ramener la balle *b* à la distance initiale de  $28^\circ$ , il fallait diminuer la torsion du fil, par une rotation du bouton dans le sens *ab*; alors, au repère *r* correspondait la division 44 du cercle gradué *t*; la torsion du fil n'était donc plus que  $28^\circ + 44^\circ = 72^\circ$ , c'est-à-dire sensiblement la moitié de 148. — Donc, à distance égale, la charge de l'une des boules devenant la moitié de la charge initiale, la force répulsive n'était plus que la moitié de la répulsion initiale.

427. **Unité d'électricité.** — On prend comme unité d'électricité la charge d'un élément conducteur, qui, agissant sur un second élément chargé de la même quantité, et placé à un centimètre de distance, produit une répulsion égale à une dyne.

Si deux corps conducteurs de petites dimensions sont chargés, l'un de *q* unités d'électricité, l'autre de *q'* unités, et si leur distance est égale à *r* centimètres, la force sera répulsive ou attractive, suivant que les charges seront de même signe ou de signes contraires; la valeur de la force, en dynes, sera donnée par l'expression

$$f = \frac{qq'}{r^2}$$

Cette formule est la traduction des lois de Coulomb.

428. **Application des lois de Coulomb à l'étude de la distribution de l'électricité dans les corps conducteurs.** — Dans les corps mauvais conducteurs, l'électricité reste limitée au voisinage des points où elle a été développée; il n'y a donc pas lieu d'étudier la distribution de l'électricité dans ces corps.

Les corps conducteurs, au contraire, opposent une résistance presque nulle au mouvement de l'électricité: en admettant alors que les éléments électriques de même nature se repoussent en raison inverse du carré de la distance (425), on démontre que, une fois l'équilibre établi, il ne peut y avoir d'électricité qu'à la surface du conducteur. — Quant à la distribution de l'électricité sur la surface, elle dépendra de la forme de cette surface. En s'appuyant sur les lois de Coulomb, on a pu calculer la distribution de l'électricité dans quelques cas simples: les résultats du calcul sont conformes à ceux que fournit l'expérience, en sorte que chacun d'eux doit être considéré comme une nouvelle confirmation de la loi élémentaire. — Cette remarque faite, nous nous contenterons d'indiquer quelques-uns des résultats obtenus.

429. **L'électricité se porte à la surface des corps conducteurs.** — Prenons une sphère métallique A (fig. 281), isolée par un

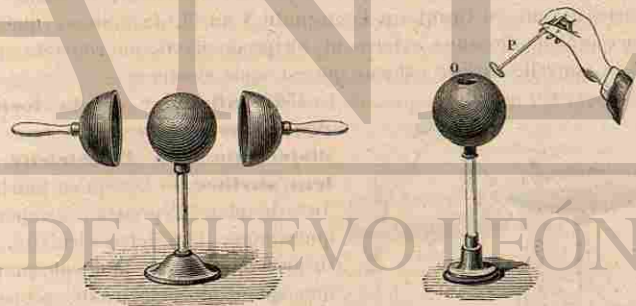


Fig. 281.

Fig. 282.

pieu de verre, et deux hémisphères creux B et C, qui peuvent s'appliquer exactement sur la sphère et qu'on maintient avec des manches isolants. Électrisons la sphère A, en la mettant en communication avec la machine électrique, et couvrons-la ensuite avec les hémisphères: en retirant les hémisphères, nous constaterons qu'ils sont électrisés, tandis que la sphère a perdu son électricité. — L'électricité s'était donc portée tout entière à la surface.

Soit de même une sphère métallique creuse (fig. 282), percée d'une petite ouverture O : si l'on électrise cette sphère et qu'on touche l'un des points de la surface extérieure avec un petit disque de clinquant ou *plan d'épreuve*, isolé au bout d'une tige de gomme laque P, on constate que le disque se charge d'une quantité sensible d'électricité. Si l'on fait la même expérience pour un point intérieur, on ne constate pas trace d'électricité sur le plan d'épreuve. — Ces deux expériences sont dues à Coulomb.

Voici encore une expérience ingénieuse, qui est due à Faraday. — Un cercle métallique isolé A (fig. 285) soutient un petit sac de mousseline, dont la forme est à peu près celle des filets à papillons : un fil de soie MN traverse le sac et est attaché à son sommet. Si l'on électrise le cercle métallique, on constate, au moyen du plan d'épreuve, que la surface extérieure du sac est électrisée, la surface intérieure ne donnant pas trace d'électricité; si alors on retourne le sac, en tirant sur l'extrémité N du fil, de manière que la surface interne devienne externe et réciproquement, on constate que c'est la nouvelle surface externe qui est seule électrisée.



Fig. 284. — Étude de la distribution de l'électricité sur un corps conducteur.

Il en résulte que, si l'on touche successivement, avec un même plan d'épreuve, deux points M et N d'un conducteur isolé et électrisé (fig. 284), et si l'on détermine, à chaque fois, les valeurs des actions répul-

450. **Influence de la forme des corps conducteurs sur la distribution de l'électricité à leur surface.** — Lorsqu'on touche, avec le plan d'épreuve, un point quelconqué d'un corps électrisé, la théorie montre que le disque prend une quantité d'électricité proportionnelle à celle qui se trouvait en ce point; comme d'ailleurs le disque a toujours une surface très petite par rapport à celle du corps, ce contact ne modifie pas sensiblement la charge des autres points.

sives que le plan d'épreuve exerce, à une distance constante, sur une petite sphère contenant une charge constante de la même électricité, ces actions seront proportionnelles aux charges des points touchés. — En répétant la même opération sur un certain nombre de points, on aura une idée de plus en plus précise de la distribution de la charge sur le corps soumis à l'expérience.

Cette méthode, appliquée par Coulomb à des corps de formes diverses, a donné, entre autres, les résultats suivants :

Sur une *sphère*, la quantité d'électricité est la même en tous les points de la surface; résultat évident *a priori*, par raison de symétrie.

Sur un *ellipsoïde*, les quantités d'électricité accumulées aux extrémités des axes sont proportionnelles aux longueurs de ces axes.

Sur un *disque circulaire*, l'électricité s'accumule vers les bords.

451. **L'électricité tend à se perdre par les pointes.** — D'après ce qu'on vient de voir de la distribution de l'électricité sur un ellipsoïde, on peut prévoir que, si le grand axe de l'ellipsoïde s'allonge indéfiniment par rapport aux autres, c'est-à-dire si le corps se termine par une pointe, la charge électrique doit s'accumuler presque tout entière vers cette extrémité. Or, en général, quand une certaine quantité d'électricité est répandue à la surface d'un corps, ses éléments exercent les uns sur les autres une répulsion, en vertu de laquelle l'électricité tend à s'échapper dans l'air; à l'extrémité d'une pointe, cette *tension* doit devenir capable de vaincre la résistance de l'air, et l'électricité doit s'écouler successivement dans l'air qui entoure la pointe.

C'est ce qu'on peut constater en adaptant, sur une machine électrique en activité, une pointe métallique : la machine perd rapidement toute sa charge — C'est pourquoi on a toujours soin d'éviter les pointes et les arêtes vives, dans les appareils où l'on veut conserver l'électricité, et de limiter ces appareils par des surfaces arrondies.

L'écoulement de l'électricité, par une pointe placée sur une machine électrique en activité, se manifeste par une aigrette lumineuse, visible dans l'obscurité. En outre, comme l'air environnant se charge alors de la même électricité que la pointe, il se produit une répulsion entre la pointe et l'air. En plaçant la main près de l'extrémité de la pointe, on sent un courant d'air très vif; si on présente la flamme d'une bougie à ce courant d'air (fig. 285), on le voit courber la flamme, et souvent l'éteindre.

Si la pointe est mobile, et qu'elle puisse obéir à la force répulsive

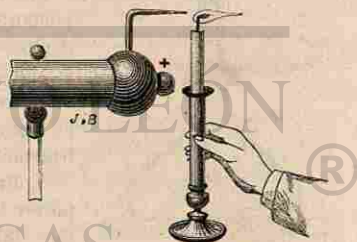


Fig. 285. — Écoulement de l'électricité par une pointe.

qui s'exerce entre elle et l'air électrisé, on la voit se mouvoir en sens inverse. — Ce sont là les conditions réalisées dans le *tourniquet électrique*. Cet appareil, représenté par la figure 286, se compose de plusieurs tiges métalliques horizontales, terminées toutes par des pointes courbées dans le même sens; le système de ces tiges est mobile sur un pivot métallique, qui est mis en communication avec la machine électrique. L'appareil se met en mouvement en sens inverse de la direction des pointes, c'est-à-dire dans le sens

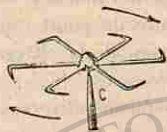


Fig. 286. — Tourniquet électrique.

des flèches qu'indique la figure.

452. **Notions générales sur la déperdition de l'électricité.** — L'expérience montre qu'un conducteur électrisé, lors même qu'il ne présente aucune arête vive, et lors même qu'il est porté par un pied isolant, ne peut jamais conserver indéfiniment sa charge : il éprouve une *déperdition* progressive.

Cette déperdition tient, comme l'a montré Coulomb, à plusieurs causes. — Et d'abord, il y a déperdition par les *supports* : le verre, la gomme laque, la résine, ne sont pas absolument dépourvus de conductibilité; la perte ne peut être considérée comme négligeable que si les supports sont à la fois très longs et très fins, et si la charge est suffisamment faible. — Il y a toujours aussi déperdition *par l'air*, soit à cause du renouvellement de l'air à la surface du conducteur électrisé, soit parce que l'air possède lui-même une certaine conductibilité, variable avec son état hygrométrique. La perte par l'air n'est jamais nulle, même s'il est absolument sec; pour un même état hygrométrique, elle est, à chaque instant, proportionnelle à la grandeur de la charge.

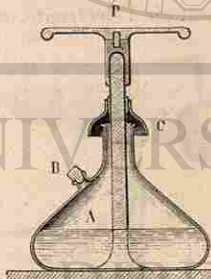


Fig. 287. — Support isolant de M. Mascart.

Une autre cause de déperdition, plus importante, réside dans l'humidité qui se dépose à la surface des supports de verre, et qui conduit l'électricité dans le sol. On remédie le plus souvent à cet inconvénient en recouvrant le verre d'une substance peu hygrométrique, telle que la gomme laque. — Enfin, il est encore bien préférable d'employer la disposition indiquée par M. Mascart (fig. 287). Le pied de verre qui supporte le plateau métallique P, ou tout autre conducteur que l'on veut isoler, est constamment desséché par l'acide sulfurique A, qui l'entoure. Un couvercle en ébène C ferme le flacon qui renferme l'acide sulfurique.

### III. — DÉVELOPPEMENT D'ÉLECTRICITÉ PAR INFLUENCE.

453. **Expérience fondamentale.** — Il se produit un développement d'électricité *par influence*, dans un corps primitivement à l'état naturel, toutes les fois que ce corps est mis en présence d'un corps électrisé.

Soit un cylindre métallique BC (fig. 288) et une sphère A, supportés l'un et l'autre par des pieds de verre. Chacune des extrémités du cylindre BC porte un couple de petits pendules, formés de balles de sureau suspendues à des fils conducteurs de lin. — Si la sphère A a été chargée, par exemple, d'électricité positive, dès qu'on la met en présence du cylindre, on voit les pendules de chaque couple s'écarter l'un de l'autre. Il y a donc, à chacune des deux extrémités B et C du cylindre, développement d'électricité. Pour déterminer la nature des électricités développées, on constate, par exemple, qu'un bâton de résine électrisé négativement, et approché *lentement* des pendules de l'extrémité B, les repousse; on constate ensuite qu'un bâton de verre, chargé d'électricité positive et

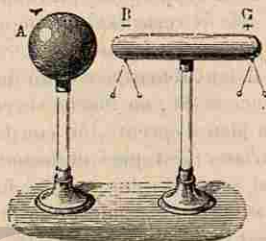


Fig. 288. Développement d'électricité par influence.

approché *lentement* des pendules de l'extrémité C, les repousse également (\*). — Donc, des deux électricités dont la réunion constituait l'état neutre, l'électricité *negative*, attirée par A, s'est accumulée vers l'extrémité B; l'électricité *positive*, repoussée par A, s'est portée vers l'extrémité C. Entre les deux régions chargées d'électricités contraires, se trouve une ligne à l'état neutre. — L'attraction de A pour le fluide négatif de B s'exerce à plus courte distance que la répulsion pour le fluide positif de C, l'électricité négative doit s'accumuler sur une plus petite étendue de surface; la ligne neutre est donc plus rapprochée de B que de C.

Il est facile de voir que la décomposition du fluide neutre de BC est *limitée*. Considérons, en effet, une molécule négative située sur la ligne neutre; elle est sollicitée à se mouvoir vers la gauche, par l'attraction de la sphère électrisée positivement; mais, d'autre part, elle est sollicitée en sens inverse : 1° par la répulsion du fluide négatif déjà accumulé sur B; 2° par l'attraction du fluide positif de C. — Ce serait l'inverse pour une molécule positive de la ligne neutre. — Il résulte de là que les molécules positives et négatives de la ligne neutre seront en

(\*) On verra plus loin (458, Rem.) pourquoi il est nécessaire que le bâton de résine ou le bâton de verre soient approchés *lentement* des pendules sur lesquels ils doivent agir par répulsion.



De ces deux équations, on tire

$$\frac{r}{s} = \frac{a}{b}$$

c'est-à-dire que, s'il ne passe aucune portion du courant par le pont, résistances des conducteurs situés au delà du pont sont dans le même rapport que les résistances des conducteurs situés en deçà.

Pour appliquer ce résultat à la mesure de la résistance d'un fil, on pourra placer en A et en B deux bobines, de résistances connues  $a$  et  $b$ ; en R, le fil qui est l'objet de l'expérience; enfin en S, une boîte de résistances (fig. 412). On déterminera, par tâtonnements, quel est le nombre d'ohms  $s$  qu'on devra prendre, pour que le galvanomètre du pont reste au zéro, et l'on en déduira la valeur de  $r$ , en ohms :

$$r = s \cdot \frac{a}{b}$$

Remarque. — On emploie quelquefois une disposition un peu différente, qui dispense de l'emploi d'une boîte de résistances. — On place en A (fig. 419)

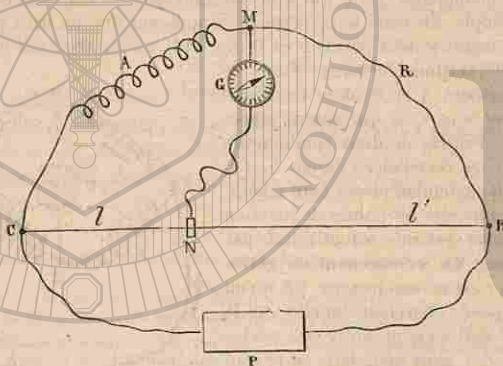


Fig. 419. — Pont à corde.

une bobine, dont la résistance  $a$  est connue en ohms; en R, le fil qui est l'objet de l'expérience; entre C et D est tendu un fil rectiligne, sur une règle divisée. Sur ce fil est disposée une petite pièce métallique N, qui est mobile sur le fil lui-même, et à laquelle vient aboutir l'extrémité du conducteur MGN qui forme le pont. — On règle, par tâtonnements, la position de la pièce N sur le fil, de manière que l'aiguille du galvanomètre reste au zéro. En lisant alors, sur la règle divisée, les deux longueurs CN et ND, et désignant ces longueurs par  $l$  et  $l'$ , on a

$$\frac{r}{l'} = \frac{a}{l} \quad \text{ou} \quad r = a \frac{l'}{l}$$

la résistance  $a$  de la bobine étant donnée en ohms, on obtient ainsi la valeur de  $r$ , évaluée avec la même unité.

## CHAPITRE V

### ÉLECTRO-MAGNÉTISME

#### I. — CONSTRUCTION ET USAGE DES GALVANOMÈTRES.

584. **Rhénomètres. — Galvanomètres.** — On donne le nom général de *rhénomètres* aux appareils qui servent à mesurer les intensités des courants. — Les *galvanomètres* sont des rhénomètres construits spécialement dans le but : 1° de constater l'existence des courants de faible intensité, 2° d'en déterminer le sens, 3° d'en mesurer l'intensité.

Quand on fait passer un courant dans un conducteur métallique, placé dans la direction N. S. du méridien magnétique, au-dessus d'une aiguille aimantée (fig. 405), on sait que, conformément à l'expérience d'Ørsted et à la règle d'Ampère, l'aiguille tend à se mettre en croix avec la direction du courant, le pôle austral se portant à la gauche du courant; et nous avons vu en outre que si la distance du conducteur à l'aiguille est assez grande par rapport à la longueur de l'aiguille, l'intensité du courant est proportionnelle à la tangente trigonométrique de la déviation observée (569).

Mais des courants peu intenses ne produiraient, dans l'expérience ainsi faite, que des déviations inappréciables. — Nous allons voir comment on est parvenu, à l'aide de diverses dispositions, à donner une valeur plus grande aux forces  $C$  et  $C'$ , et une valeur plus petite aux forces  $T$  et  $T'$  (fig. 406); par suite, à obtenir des déviations sensibles avec des courants d'une intensité beaucoup moindre.

585. **Multiplieur de Schweigger.** — Schweigger a eu l'idée d'augmenter les actions exercées par le courant, en multipliant autour de l'aiguille les portions du fil qui peuvent agir sur elle. Pour nous rendre compte de l'efficacité du *multiplieur* qui fut construit par lui, supposons d'abord que le fil conducteur

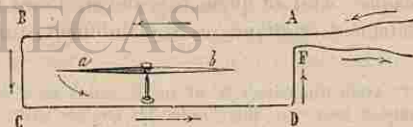


Fig. 420.

ait été plié en un rectangle ABCDF (fig. 420), au milieu duquel nous placerons l'aiguille aimantée  $ab$ . Si le fil est parcouru par un courant, dans le sens des flèches indiquées ci-contre, il est facile de voir, en considérant successivement chacune des quatre parties rectilignes du courant, AB, BC, CD, DF, qu'elles ont toutes leur gauche en avant du plan de la figure : donc les actions de ces quatre parties *concordent* pour amener le pôle austral de l'aiguille en avant de ce plan.

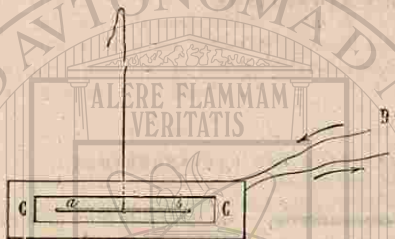


Fig. 421.

Si maintenant, au lieu de former avec le fil un simple rectangle autour de l'aiguille, on l'enroule, un grand nombre de fois et toujours dans le même sens, sur un cadre rectangulaire CC (fig. 421), tous les tours ainsi formés seront parcourus dans le même sens par le courant : ils exerceront encore des actions *concordantes* sur une aiguille aimantée  $ab$ , placée à l'intérieur du cadre. — Si le fil conducteur fait quelques centaines de tours, cet appareil pourra permettre d'obtenir une déviation sensible de l'aiguille, sous l'action de courants qui seraient tout à fait inappréciables par l'expérience d'Ersted (\*).

**586. Emploi de deux aiguilles, formant un système presque astatique.** — On augmente encore la sensibilité du *multiplicateur*, en employant, comme l'a indiqué Nobili, un système de deux aiguilles.

On assujettit l'une à l'autre deux aiguilles aimantées, à peu près égales, en les réunissant par une tige de cuivre rigide (fig. 422); on a soin de les placer parallèlement entre elles, mais de façon que leurs pôles contraires se correspondent, comme l'indiquent les lettres de la figure; enfin on suspend le système à un fil de soie sans torsion G.

Si les deux aiguilles étaient parfaitement identiques pour la grandeur et le degré d'aimantation, il est clair que les actions exercées sur leurs pôles par la terre se neutraliseraient toujours, quelle que fût l'orientation, et que le système resterait en équilibre dans une position quelconque : c'est ce qu'on exprime en disant que le système serait complètement *astatique*. — Si maintenant, ainsi que nous le supposons

(\*) Avant d'appliquer le fil sur le cadre, on a eu soin de l'entourer de soie, dans toute sa longueur, afin d'isoler les uns des autres les tours contigus. Remarquons aussi que, au lieu de placer l'aiguille sur un pivot, ce qui développe toujours des frottements pendant les mouvements de l'aiguille, on peut la suspendre, comme l'indique la figure 421, à un fil de soie sans torsion, qui passe dans une ouverture pratiquée au travers du cadre.

dans ce qui va suivre, l'une des aiguilles, l'aiguille supérieure par exemple, possède une aimantation un peu plus intense, la Terre agit encore faiblement sur le système, et c'est le pôle  $a'$  qui se dirige vers le nord : lorsque le système des aiguilles est écarté de cette position, la Terre tend à l'y ramener, mais l'action directrice de la Terre n'est que la différence des actions exercées sur chacune des aiguilles.

Voyons maintenant quelles sont les actions qu'éprouve un pareil système, de la part d'un courant passant dans un fil rectangulaire AB CDF, orienté dans le méridien magnétique, l'aiguille inférieure  $ab$  étant placée à l'intérieur de ce rectangle, et l'aiguille supérieure  $a'b'$  étant en dehors, à une petite distance du côté AB. — Le courant qui passe dans le fil,

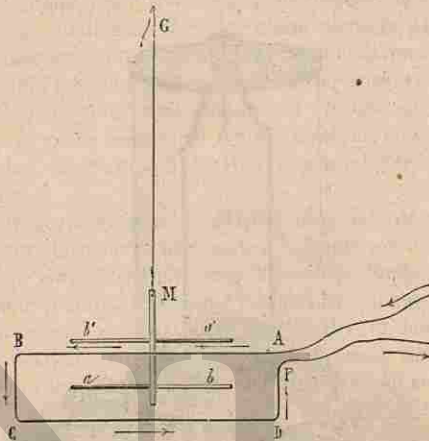


Fig. 422.

s'il se propage dans le sens des flèches, agit d'abord, comme nous l'avons vu (585), par les quatre côtés du rectangle à la fois, pour amener le pôle austral  $a$  de l'aiguille intérieure en avant du plan de la figure; il reste donc à considérer son action sur l'aiguille extérieure. — Or, en appliquant la règle d'Ampère, on voit que le côté supérieur AB du rectangle tend à porter le pôle austral  $a'$  en arrière du plan de la figure, et par suite le pôle  $b'$ , qui correspond à  $a$ , en avant; cette action *concorde* avec celles qui s'exercent sur l'aiguille  $ab$ . Quant aux actions exercées sur l'aiguille  $a'b'$  par les trois côtés BC, CD, DF, il est facile de voir qu'elles sont inverses; mais comme ces côtés sont beaucoup plus éloignés de cette aiguille que le côté AB, leurs actions sont beaucoup plus faibles. L'action *totale* du rectangle sur l'aiguille extérieure doit donc être considérée comme s'ajoutant à l'action exercée sur l'aiguille intérieure, en sorte que ces deux actions tendent à faire tourner le système dans le même sens. — Si, au lieu d'un simple rectangle, on a un cadre portant un grand nombre de tours, chaque tour se comporte comme le courant rectangulaire qui vient d'être considéré.

Donc, en résumé, l'introduction, dans le *multiplicateur*, d'un système de deux aiguilles aimantées, d'une intensité presque égale, c'est-à-dire formant un système *presque astatique*, offre deux avantages : 1° de di-

minuer considérablement l'action de la terre; 2° d'augmenter l'action du courant lui-même. — Pour ces deux raisons, la sensibilité de l'appareil devient beaucoup plus grande.

587. **Galvanomètre de Nobili.** — Le galvanomètre de Nobili (fig. 425) n'est autre chose qu'un multiplicateur à deux aiguilles, auquel

on joint un cercle divisé pour mesurer les déviations.

Un système de deux aiguilles aimantées, disposées comme il vient d'être dit, est suspendu à un fil de cocon L; ce fil est soutenu par un crochet fixé à un bouton K, qui permet de le faire monter ou descendre de petites quantités. Sur le cadre AB est enroulé un fil de cuivre couvert de soie; les extrémités de ce fil vont aboutir à deux bornes métalliques C, C', fixées sur une planchette d'ivoire D. L'aiguille inférieure est au

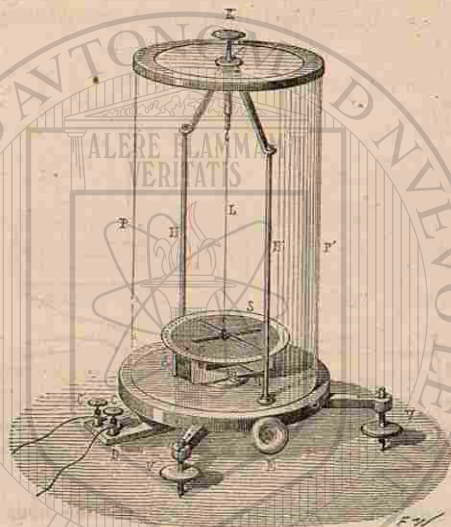


Fig. 425. — Galvanomètre de Nobili.

milieu du cadre (on en peut voir une petite partie dans la figure); l'aiguille supérieure est en dehors du cadre, au centre d'un cercle de cuivre S, dont le contour est divisé en degrés; le diamètre qui passe par le zéro est parallèle aux tours du fil. — L'appareil est environné d'une cloche de verre PP', qui préserve les aiguilles des agitations de l'air.

Lorsqu'on veut mettre le galvanomètre en expérience, on oriente d'abord le cadre AB parallèlement à la position prise par les aiguilles; pour cela, on fait tourner le cercle et le cadre autour de leur axe vertical, au moyen d'un engrenage qui correspond au bouton extérieur E, jusqu'à ce que le zéro de la graduation vienne se placer sous l'une des extrémités de l'aiguille extérieure. — On fixe alors des fils conducteurs dans les bornes C, C', au moyen de vis de pression. Si ces fils font partie d'un circuit parcouru par un courant appréciable, le sens de la déviation fait connaître la *direction* de ce courant dans le fil; quant à son *intensité*, on peut la déduire de la grandeur de la déviation, si l'on a construit, comme nous allons l'indiquer, une table fournissant, en

regard des diverses déviations, les intensités des courants qui les produisent. — Pour les déviations d'un petit nombre de degrés, on peut regarder les intensités comme proportionnelles aux déviations elles-mêmes.

588. **Graduation du galvanomètre à deux fils.** — Becquerel a fait construire des galvanomètres à deux fils, pour lesquels la construction d'une table de graduation se présente d'une manière particulièrement simple. — Le constructeur prend deux fils métalliques, de même diamètre et de même longueur, et, après les avoir couverts de soie, il les tord ensemble dans toute leur étendue; il enroule ensuite autour du cadre l'espèce de corde formée par ces deux fils, et, en séparant seulement les quatre extrémités, il les fait communiquer avec quatre bornes métalliques.

Voici comment on peut procéder pour construire une table de graduation. — Admettons que, jusqu'à 20 degrés, par exemple, on considère les intensités comme *proportionnelles aux déviations*. Supposons maintenant qu'un premier courant, traversant l'un des fils, donne une déviation de 15°; qu'un second courant, traversant l'autre fil dans le même sens, donne une déviation de 19°: si on les fait passer simultanément et dans le même sens, ils auront sur les aiguilles une action dont l'intensité sera évidemment représentée par 52: si donc on n'observe qu'une déviation de 50°, on inscrira dans la table, en regard de la déviation 50°, l'intensité 52. — De même, si deux courants donnent séparément les déviations 17° et 20°, et simultanément la déviation 54°, on inscrira dans la table, en face de la déviation 54°, l'intensité 57; et ainsi de suite.

Le galvanomètre à deux fils est souvent désigné sous le nom de *galvanomètre différentiel*, parce qu'il permet d'apprécier la différence d'intensité de deux courants, en les faisant passer simultanément, mais en sens contraire, l'un dans un fil, l'autre dans l'autre.

589. **Galvanomètre de W. Thomson.** — Dans le galvanomètre de Sir William Thomson, chacune des deux aiguilles du galvanomètre de Nobili est remplacée par un système de quatre ou cinq lames d'acier, d'environ 8 millimètres de longueur, et disposées parallèlement (fig. 424); les deux groupes de lames, qui forment le système astatique, sont réunis entre eux par une tige d'aluminium suspendue par un fil de cocon. Chacun des groupes d'aiguilles est au centre d'une bobine circulaire, qui se comporte comme un multiplicateur: pour que les actions du courant s'ajoutent, on le fait passer en sens inverse dans les deux bobines. Pour mesurer les déviations, on fait usage du système optique décrit à propos de l'électromètre de Thomson (fig. 298); le miroir métallique est fixé contre les lames d'acier du groupe supérieur.

Il n'est pas nécessaire d'orienter l'appareil dans le méridien magnétique comme le galvanomètre de Nobili: on peut l'orienter dans un azimut quelconque; pour amener les aiguilles aimantées à se placer parallèlement aux

tours du fil, il suffit de faire tourner autour d'un axe vertical l'aimant correcteur NS, jusqu'à ce que le miroir fixé aux aiguilles se tienne en équilibre dans une position perpendiculaire aux axes des bobines,

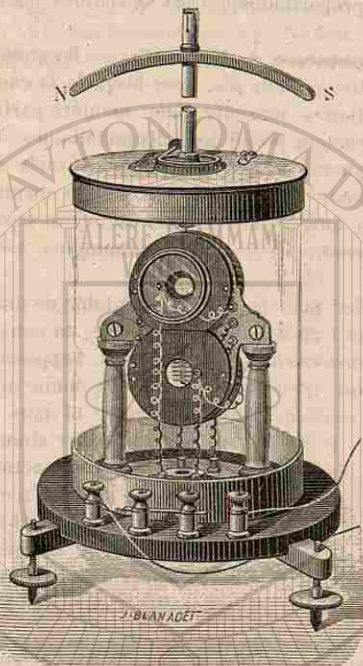


Fig. 424. — Galvanomètre de Thomson.

avec ce même galvanomètre, des intensités de valeurs très diverses, tout en n'observant toujours que de faibles déviations.

Les deux fils qui amènent le courant sont attachés aux deux bornes A, B, d'où partent les fils qui vont au galvanomètre; entre ces deux bornes est une cheville C, de résistance nulle, par laquelle passe tout le courant; l'aiguille du galvanomètre reste alors au zéro. — La borne B communique avec la pièce de cuivre centrale. Trois bobines, dont les résistances sont respectivement  $\frac{1}{9}$ ,  $\frac{1}{99}$  et  $\frac{1}{999}$  de celle du fil du galvanomètre, communiquent d'une part avec la borne A, d'autre part avec les trois pièces de cuivre marquées  $\frac{1}{9}$ ,  $\frac{1}{99}$  et  $\frac{1}{999}$ ; enfin, une deuxième cheville D peut être disposée entre l'une de ces trois pièces et la pièce centrale. Les chevilles étant disposées comme l'indique la figure 425, aucun courant ne passe dans le galvanomètre.

Supposons maintenant qu'on enlève la cheville qui est entre les deux bornes; le courant de la pile se partagera entre le fil du galvanomètre de résistance  $r$ , et la troisième bobine, de résistance  $r' = \frac{r}{999}$ ; d'après la for-

#### 590. Shunt des galvanomètres.

— La déviation observée dans un galvanomètre en général, ne peut être considérée comme proportionnelle à l'intensité du courant que si elle ne dépasse pas quelques degrés; d'autre part, un courant trop fort peut détériorer le galvanomètre. On appelle *shunt* d'un galvanomètre (fig. 425), une disposition qui permet de mesurer,

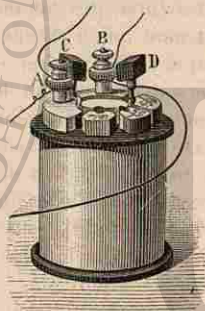


Fig. 425. — Shunt.

mule des courants dérivés (582),  $i = I \frac{r'}{r+r'}$ , on aura  $i = \frac{1}{1000}$ ; la millièmième partie du courant passera donc dans l'appareil: si la déviation est sensible, on en fera la lecture, et on multipliera par 1000 l'indication fournie par le galvanomètre.

Si la déviation est insensible, on replacera la première cheville entre les deux bornes, et on transportera la deuxième cheville entre la pièce centrale et la pièce marquée  $\frac{1}{99}$ ; puis on enlèvera la première cheville. S'il y a une déviation, on multipliera par 100 l'intensité mesurée. — Si, cette fois encore, la déviation n'était pas sensible, on replacerait encore la première cheville, on amènerait la deuxième cheville entre la pièce centrale et la pièce  $\frac{1}{9}$ , puis, retirant la première cheville, on ferait passer la dixième partie du courant. — Enfin, si la sensibilité était encore insuffisante, on ferait passer dans le galvanomètre le courant tout entier, en retirant les deux chevilles.

591. Galvanomètre de M. Bourbouze. — M. Bourbouze a construit un galvanomètre moins sensible que les précédents, et destiné spécialement aux expériences de Cours.

L'aimant sur lequel doit agir le courant est un barreau d'acier BB' (fig. 426), mobile comme un fléau de balance, sur un couteau d'acier reposant

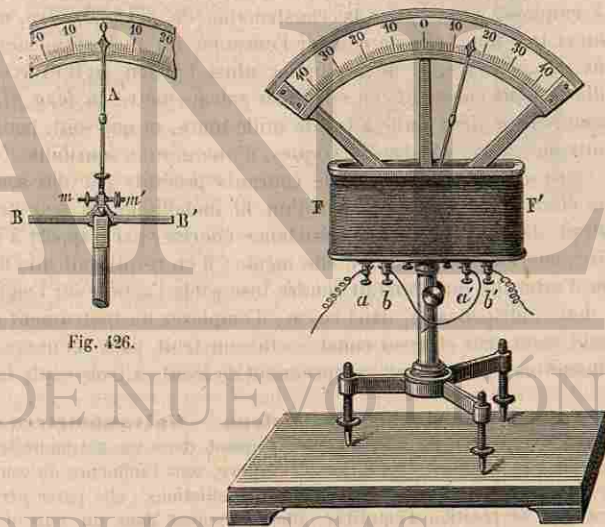


Fig. 426.

Fig. 427. — Galvanomètre de M. Bourbouze.

sur un plan d'agate: il est muni d'une aiguille A, qui lui est perpendiculaire, et qui se déplace, par les mouvements du barreau, sur un cadran divisé. Deux petites masses  $m, m'$ , mobiles à vis sur une petite tige parallèle au barreau, permettent d'effectuer un réglage préalable, de manière que le barreau se place en équilibre dans la position horizontale, c'est-à-dire de

manière que l'aiguille A vienne au zéro de la graduation, quelle que soit l'orientation de l'appareil. Une autre petite masse, mobile sur l'aiguille elle-même, permet de déplacer le centre de gravité, de façon que cette espèce de balance ait une sensibilité aussi grande que possible. — Le barreau et son support sont placés à l'intérieur d'une large bobine FF' (fig. 427), sur laquelle s'enroule le fil dans lequel doit passer le courant. — Lorsque l'instrument est bien réglé, on obtient des déviations appréciables, même avec des courants d'une assez faible intensité.

**592. Des différences à apporter dans la construction des galvanomètres, selon les usages auxquels ils doivent être employés.** — L'interposition du fil d'un galvanomètre, dans un circuit parcouru par un courant, introduit toujours dans ce circuit une résistance qui a pour effet de diminuer l'intensité du courant lui-même. — Lorsqu'il s'agit de courants produits par des sources *hydro-électriques*, dont la résistance intérieure est très grande (571), la résistance du fil du galvanomètre, alors même qu'il aurait une petite section et une grande longueur, doit le plus souvent être considérée comme assez petite par rapport à celle de la source elle-même. Il y a donc avantage à employer alors, pour la construction du galvanomètre, un fil très fin et très long, afin de pouvoir l'enrouler un très grand nombre de fois sur le cadre, et de multiplier ainsi l'action qu'il exerce sur l'aiguille. — On construit, en effet, des galvanomètres à *long fil*, qui comprennent de deux mille à trente mille tours, et qui sont, pour les courants des sources hydro-électriques, d'une grande sensibilité.

Au contraire, lorsqu'il s'agit de courants produits par des sources *thermo-électriques*, l'interposition d'un fil métallique un peu fin introduirait dans le circuit une résistance énorme, par rapport à celle qu'offre généralement la source elle-même : il en résulterait une diminution d'intensité qui pourrait rendre insensible l'action sur l'aiguille. Il est donc indispensable, dans ce cas, d'employer un instrument dont le fil soit assez gros et assez court. — On construit, pour cet usage, des galvanomètres à *gros fil*, qui comprennent de trente à trois cents tours.

**595. Amortissement des oscillations. — Galvanomètres aperioidiques.** — Quand on fait passer un courant dans un galvanomètre de Nobili, l'aiguille ne prend sa position d'équilibre, sous l'influence du courant, qu'après avoir effectué un grand nombre d'oscillations : elle passe *périodiquement* par sa position d'équilibre, alternativement dans un sens et dans l'autre, et ne se fixe qu'au bout d'un temps assez long.

Pour abréger la durée d'une mesure, on a dû chercher à *amortir* les oscillations, c'est-à-dire à faire décroître rapidement les amplitudes des oscillations successives, de telle sorte que, au bout d'un temps assez court, l'aiguille paraisse en repos, à sa position d'équilibre (\*). — Or, nous verrons plus loin

(\*) La résistance de l'air, qui contrarie le mouvement des pièces mobiles, produit un amortissement naturel, mais insuffisant dans la plupart des cas.

(650) que tout déplacement d'un aimant, par rapport à un circuit conducteur voisin, fait naître dans ce circuit un *courant induit*, dont le sens est tel que, en réagissant sur l'aimant, il contrarie son mouvement. — On comprend dès lors que, dans un galvanomètre quelconque, les courants induits qui, à chaque oscillation de l'aimant, prennent naissance dans le fil même du multiplicateur, doivent produire un amortissement des oscillations. — Pour que les amplitudes des oscillations décroissent assez rapidement, il faut, d'une part, faire en sorte que les courants induits soient aussi intenses que possible; d'autre part, donner au système mobile une faible masse et de petites dimensions. D'après ces indications on a pu, non seulement réaliser des appareils, comme le galvanomètre de sir W. Thompson, dans lesquels les oscillations s'amortissent très rapidement, mais même construire des galvanomètres *aperiodiques*, dans lesquels les oscillations sont complètement supprimées.

La figure 428 représente un galvanomètre aperioidique de MM. Deprez et d'Arsonval. Entre les branches d'un aimant en fer à cheval, est un cylindre de fer F, qui s'aimante par influence. Le cadre rectangulaire qui l'entoure est mobile : il est suspendu entre deux fils métalliques, dont la tension est réglée par un ressort placé à la partie inférieure; c'est par ces fils que le courant est amené dans le cadre. — Selon le sens du courant, le cadre se déplace dans un sens ou dans l'autre, conformément à la règle d'Ampère, et il prend immédiatement sa position d'équilibre : en effet, d'une part, en raison de la puissance de l'aimant fixe, les courants d'induction qui naissent dans le cadre sont très intenses; d'autre part, la masse du cadre mobile est très faible. — Quand on supprime le courant, le cadre revient immédiatement à sa position primitive.

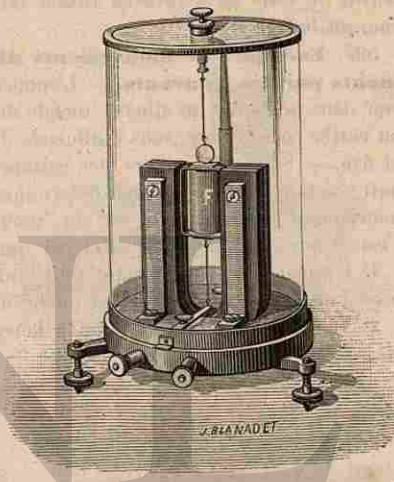


Fig. 428. — Galvanomètre aperioidique, de MM. Deprez et d'Arsonval.

#### II. — ACTIONS DES COURANTS SUR LES AIMANTS, ET ACTIONS RÉCIPROQUES.

**597. Loi générale de l'action exercée par un courant rectiligne sur un aimant.** — L'*électro-magnétisme* est l'étude des actions exercées par les courants sur les aimants, et des actions réciproques. — Dans le cas particulier où un aimant *mobile autour de son milieu* est soumis à l'action d'un courant rectiligne, nous avons vu que cette

action tend à mettre l'aimant en croix avec le courant, le pôle austral de l'aimant étant à gauche du courant : c'est la conséquence de l'expérience d'Ersted, interprétée par la règle d'Ampère (568). — Les expériences de Biot et Savart, soumises au calcul par Laplace, ont montré que tous les phénomènes observés, en faisant varier les conditions d'assujettissement, ou les positions relatives de l'aimant et du courant, peuvent être réunis dans la loi générale suivante :

Lorsqu'un courant rectiligne et indéfini est en présence d'un aimant, chaque pôle de l'aimant est sollicité par une force, dont la direction est perpendiculaire au plan qui passe par ce pôle et par le courant. L'intensité de cette force varie en raison inverse de la distance du pôle au courant lui-même.

595. Exemples de mouvements divers, imprimés à des aimants par des courants. — L'énoncé qui précède permet de prévoir dans quels cas un aimant mobile doit se mettre en mouvement, ou rester en équilibre, sous l'influence d'un courant rectiligne indéfini et fixe. — Suivant la nature des liaisons auxquelles l'aimant est assujetti, l'action du courant peut déterminer, soit une orientation, soit un mouvement de translation, soit un mouvement de rotation continue : c'est ce que nous allons montrer par quelques exemples.

1° L'orientation d'un aimant sous l'influence d'un courant est réalisée dans l'expérience d'Ersted (568); nous n'y reviendrons pas.

2° Voici une disposition, due à Boisgiraud, dans laquelle l'action d'un courant communiqué à un aimant communique à un aimant un mouvement de translation. — Une aiguille aimantée très légère AB (fig. 429) est placée sur un flotteur, à la surface de l'eau; sous l'influence de la terre, elle s'oriente

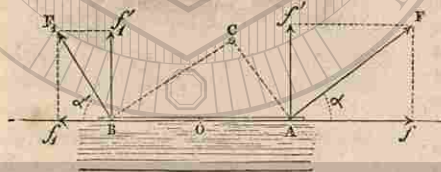


Fig. 429. — Expérience de Bois giraud.

dans le plan du méridien magnétique, que nous supposons être le plan de la figure. Perpendiculairement au méridien magnétique, on dispose un long fil de cuivre rectiligne, dont C représente la section, et dont les deux extrémités sont mises en communication avec les pôles d'une pile : l'aiguille prend un mouvement de translation suivant sa propre direction, mouvement dont le sens dépend du sens du courant et de la position du fil par rapport aux deux pôles magnétiques (\*).

(\*) Pour nous rendre compte de ce résultat, supposons que le courant soit dirigé, dans le fil C, d'arrière en avant du plan de la figure, et que ce fil soit placé au-dessus de la moitié australe OA de l'aiguille. Le pôle A sera sollicité par une force F, située dans le plan de la figure et perpendiculaire à CA (394); de même, le pôle B sera sollicité par une force F<sub>1</sub>, située dans le même plan et perpendiculaire à CB. La force F peut se décomposer en deux autres, l'une f égale à F cos α et dirigée suivant le pro-

5° Enfin, Faraday est parvenu à produire la rotation continue d'un aimant sous l'influence d'un courant, de la manière suivante. — On place verticalement, au milieu du mercure que contient une éprouvette de verre (fig. 450), un barreau aimanté a, lesté par un petit cylindre de platine p; un anneau métallique K, qui garnit intérieurement la partie supérieure de l'éprouvette, sert à mettre le mercure en communication, par le contour de sa surface, avec l'un des pôles d'une pile; le centre de cette même surface est mis en communication avec l'autre pôle, au moyen de la tige métallique T. — Au moment où l'on ferme le circuit, on voit l'aimant se rapprocher de la tige T et prendre autour d'elle un mouvement continu de rotation. — Si les pôles sont placés comme le suppose la figure, le courant marche, à

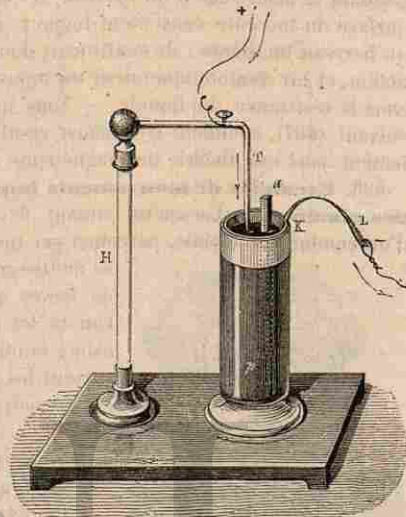


Fig. 450. — Rotation continue d'un aimant sous l'action d'un courant.

la surface du mercure, de l'extrémité de la tige T vers les divers points de l'anneau K; alors si le pôle émergé a est un pôle austral, la rotation s'effectue dans le sens du mouvement des aiguilles d'une montre. Si l'on intervertit le sens du courant, le sens de la rotation est également interverti.

L'explication de ce mouvement peut se déduire des lois de l'électromagnétisme : nous nous contenterons de remarquer que le sens dans

longement de BA, l'autre f' verticale; de même F<sub>1</sub> peut se décomposer en une force f<sub>1</sub> égale à F<sub>1</sub> cos α' et dirigée suivant le prolongement de AB, et une force verticale f<sub>1</sub>. Les deux forces verticales f et f<sub>1</sub> sont trop faibles pour soulever l'aiguille; les deux forces horizontales f et f<sub>1</sub> tendent à entraîner l'aiguille, l'une dans la direction BA, l'autre en sens contraire. Or, les intensités des forces F et F<sub>1</sub> étant inversement proportionnelles aux distances CA et CB, on a F > F<sub>1</sub>; d'ailleurs l'angle α est plus petit que α', et l'on a cos α > cos α'; donc F cos α ou f est plus grand que F<sub>1</sub> cos α' ou f<sub>1</sub>; la résultante des deux forces f et f<sub>1</sub> est donc dirigée dans le sens BA. L'aiguille doit donc, dans ce cas, prendre un mouvement de translation suivant BA, c'est-à-dire dirigé du sud au nord, dans le plan du méridien magnétique. — Lorsque, par suite de ce mouvement, le milieu O arrive dans le plan vertical passant par la direction du courant, l'aiguille est animée d'une certaine vitesse qui lui fait dépasser cette position; mais, la force f<sub>1</sub> devenant alors supérieure à f, la vitesse diminue, puis change de sens. L'aiguille oscille donc de part et d'autre de cette position d'équilibre stable, où elle finit par se fixer.

lequel il s'effectue, sous l'influence des portions les plus voisines du courant, est d'accord avec la règle d'Ampère (568). — Quant à la continuité du mouvement, on peut s'en rendre compte en remarquant que, pendant le déplacement du barreau, les courants qui se propagent à la surface du mercure conservent toujours la même position par rapport au barreau lui-même : ils continuent donc à exercer sur lui la même action, et lui communiqueraient un mouvement indéfiniment accéléré, sans la résistance du liquide. — Nous indiquerons, dans le chapitre suivant (607), comment ces mêmes résultats peuvent s'expliquer facilement dans une théorie du magnétisme qui est due à Ampère.

596) **Exemples de mouvements imprimés à des courants par des aimants.** — Lorsqu'un aimant fixe est placé dans le voisinage d'un conducteur mobile, parcouru par un courant, ce conducteur peut se mettre en mouvement, sous l'influence

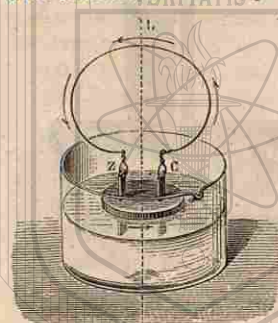


Fig. 451. — Pile flottante.

de forces qui peuvent être considérées comme les réactions de celles que nous avons étudiées jusqu'ici. — Ici encore, suivant les liaisons auxquelles le courant est assujéti, le mouvement peut être, soit une *orientation*, soit un mouvement de *translation*, soit un mouvement de *rotation continue*.

1° On obtient l'*orientation* d'un courant mobile, sous l'influence d'un aimant, au moyen des piles flottantes imaginées par de la Rive. — Une lame de zinc Z et une lame de cuivre C (fig. 451) sont assujétiées dans une rondelle de liège, et réunies à leur partie supérieure par un fil métallique rigide L. Si l'on fait flotter le liège sur un vase contenant de l'eau acidulée, il se produit un courant dans le fil. — Si l'on place horizontalement un barreau aimanté, au-dessus de la partie supérieure L et dans le même plan que le fil, on voit l'équipage se mettre en croix avec l'aimant, sa gauche venant se placer du côté du pôle austral. — C'est, comme on voit, l'expérience inverse de celle d'Ersted.

2° Le même appareil peut servir à obtenir un mouvement de *translation* d'un courant, sous l'influence d'un aimant. — Il suffit, pour cela, de placer le pôle du barreau aimanté un peu en avant du circuit CLZ et à la hauteur de son centre, l'axe du barreau étant perpendiculaire au plan du courant. Si c'est le pôle austral qu'on présente, l'expérience montre qu'il y a *répulsion*, dans le cas où le courant est dirigé de telle sorte que l'observateur, placé au pôle austral du barreau, voie ce courant circuler en sens inverse du mouvement des aiguilles d'une montre (comme le courant indiqué par la figure 451); il y a *attraction*, si, toutes les conditions étant d'ailleurs les mêmes, le courant

est vu circulant dans le même sens que le mouvement des aiguilles d'une montre (\*).

3° L'action d'un aimant fixe peut aussi produire la *rotation continue* d'une portion de courant mobile. C'est ce que montre l'expérience suivante, inverse, quant au résultat, de celle que nous avons décrite plus haut (595, 3°). — Une cuvette de zinc DD (fig. 452), contenant de l'eau acidulée, porte en son centre une colonne métallique H; sur la coupelle o qui termine cette colonne, repose, par une pointe qui plonge dans du mercure, un équipage formé de deux fils métalliques verticaux b et c, et d'un cercle de cuivre horizontal plongé dans l'eau de la cuvette : l'équipage tout entier est ainsi rendu mobile autour d'un axe vertical passant par la pointe i. L'action de l'acide sulfurique sur le zinc développe un courant, dans le circuit qui est formé par la cuvette, le liquide acide, les fils verticaux et la colonne H; ce courant marche dans le sens des flèches de la figure. Si l'on place le pôle d'un aimant K au-dessous de la colonne métallique H, l'équipage prend un mouvement de rotation continu autour de son axe; si c'est le pôle austral de l'aimant qui a été présenté, la rotation a lieu de telle sorte que le système tourne dans le sens des flèches qui sont indiquées au milieu du liquide. — Le sens de cette rotation est, comme on voit, d'accord avec la règle d'Ampère (568); la continuité du mouvement peut se concevoir en remarquant que les courants verticaux conservent, quelle que soit leur position absolue, la même position par rapport à l'aimant. — Nous donnerons plus loin (609) une interprétation de cette expérience dans la théorie du magnétisme qui est due à Ampère.

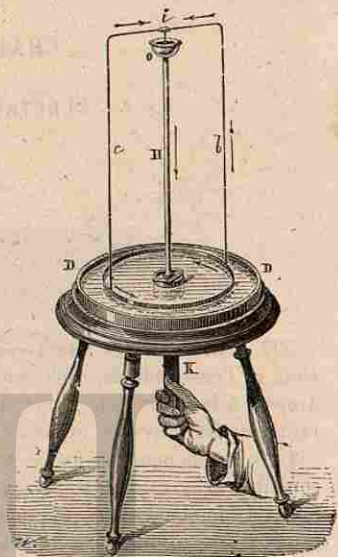


Fig. 452. — Rotation continue d'un courant sous l'action d'un aimant.

(\*) L'interprétation de ces faits par les principes fondamentaux de l'électro-magnétisme est un peu plus compliquée que celle de l'expérience de Boisgiraud (395, 2°), parce que le courant a une forme circulaire : nous ne la donnons pas ici. — Nous engagerons seulement le lecteur à revenir sur ces résultats, après avoir lu le chapitre VI, et en considérant l'aimant comme assimilable à un solénoïde : ils apparaîtront alors comme une conséquence nécessaire de cette assimilation, et pourront aisément se fixer dans la mémoire.

CHAPITRE V

ÉLECTRO-DYNAMIQUE

1. ACTIONS DES COURANTS SUR LES COURANTS.

597. **Phénomènes électro-dynamiques.** — L'expérience d'Ersted, et l'ensemble des phénomènes électro-magnétiques, ont conduit Ampère à la découverte d'une autre série d'actions : celles des courants sur les courants, et celles de la Terre sur les courants.

Tous les phénomènes qui se rattachent à ces actions, et dont l'étude constitue l'électro-dynamique, peuvent s'interpréter au moyen de trois principes fondamentaux, que nous allons d'abord établir, savoir : 1° le principe des courants parallèles; 2° le principe des courants angulaires; 3° le principe des courants sinueux.

598. **Principe des courants parallèles.** — Deux courants parallèles et de même sens s'attirent; deux courants parallèles et de sens contraires se repoussent.

Pour vérifier ce principe, l'une des dispositions les plus simples est la suivante, qui a été imaginée par Ampère :

Un fil métallique *adefg* (fig. 455), replié comme l'indique la figure, est terminé à ses deux extrémités *a* et *b* par des pointes d'acier, qu'on plonge dans des godets pleins de mercure. Ces godets communiquent, l'un *a*, avec une colonne métallique creuse *H*, dans laquelle on peut amener un courant, au moyen d'un fil plongeant dans le godet *M*; l'autre *b*, avec une tige métallique *H'*, située à l'intérieur de *H*, isolée dans un tube de verre, et par laquelle le courant, après avoir parcouru l'équipage mobile, revient au godet *N* et à la pile. Le conducteur *defg* peut ainsi, sans cesser d'être parcouru par le courant, tourner autour d'un axe vertical passant par *a* et *b*.

Pour avoir une autre portion de courant fixe, dont nous puissions étudier l'action sur les diverses parties du conducteur mobile, nous intercalerons, dans le circuit de la pile, un fil métallique couvert de

soie, et enroulé un certain nombre de fois sur un cadre de bois rectangulaire *MNPQ* (fig. 454).

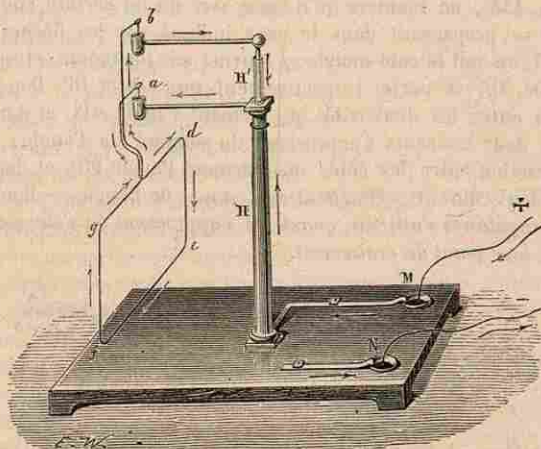


Fig. 453. — Appareil d'Ampère, pour l'étude des actions exercées sur un courant mobile.

Si, tenant à la main le cadre *MNPQ*, on approche le côté vertical *MN* du côté vertical *fg*, on observe une attraction : or, les portions du fil qui couvrent le côté *MN* du cadre sont parallèles à *fg* (fig. 455), et le courant s'y propage dans le même sens que dans *fg*. — Donc deux courants parallèles et de même sens s'attirent.

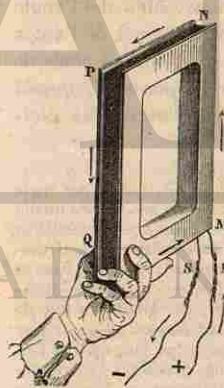


Fig. 454. — Courant fixe.

Au contraire, si l'on approche ce même côté *MN* du côté *de* du fil mobile, il se produit une répulsion : or, les portions du fil qui sont appliquées sur *MN* sont encore parallèles à *de* (fig. 456), mais elles sont parcourues par le courant en sens contraire. — Donc deux courants parallèles et de sens contraires se repoussent.

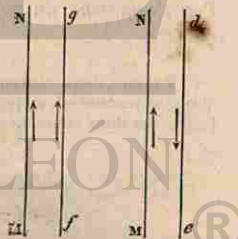


Fig. 455. Fig. 456. Action des courants parallèles.

599. **Principe des courants non parallèles, ou courants angulaires.** — Deux courants non parallèles s'attirent, quand ils s'approchent ou s'éloignent ensemble de leur point de croisement; ils se



repoussent, quand l'un s'en approche tandis que l'autre s'en éloigne.

Reprenons le cadre MNPQ (fig. 434), et plaçons le côté PN au-dessous de fe (fig. 435), de manière qu'il fasse avec lui un certain angle. Les courants se propageant dans le sens indiqué par les flèches de la figure 437, on voit le côté mobile ef tourner sur lui-même, et ses deux moitiés Oe, Of, se porter respectivement vers ON et OP. Donc il y a attraction entre les deux côtés qui forment l'angle eON, et dans lesquels les deux courants s'approchent du sommet de l'angle; il y a aussi attraction entre les côtés qui forment l'angle POf, et dans lesquels les deux courants s'éloignent du sommet de l'angle. — Donc deux courants angulaires s'attirent, quand ils s'approchent ou s'éloignent ensemble de leur point de croisement.

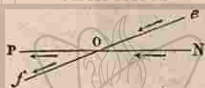


Fig. 437.

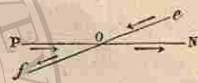


Fig. 438.

Actions des courants angulaires.

Au contraire, si l'on intervertit le sens du courant dans l'un des conducteurs, par exemple dans les fils qui ont la direction NP, de telle sorte que le courant prenne la direction PN (fig. 438), on voit les deux moitiés Oe et Of s'éloigner respectivement de ON et OP, pour se porter vers OP et ON. Donc il y a répulsion entre les deux côtés de l'angle eON, dans lesquels l'un des courants s'approche du sommet de l'angle tandis que l'autre s'en éloigne; il en est de même pour les côtés de l'angle POf. — Donc deux courants angulaires se repoussent, quand l'un s'approche du point de croisement tandis que l'autre s'en éloigne (\*).

(\*) Puisque deux courants angulaires tels que eO, OP (fig. 437), faisant un angle obtus, se repoussent, on peut se demander si la répulsion n'aura pas encore lieu quand l'angle des deux courants sera égal à  $180^\circ$ ; s'il en est ainsi, deux portions consécutives d'un même courant doivent se repousser. Dans sa

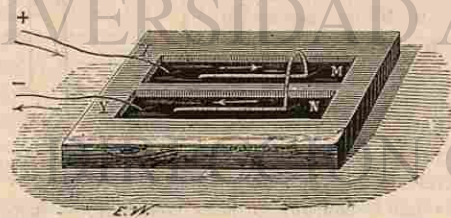


Fig. 459

Deux rigoles parallèles M et N (fig. 459) sont ménagées dans une petite auge de bois et contiennent du mercure; à la surface du liquide, dans les rigoles, sont placées les deux branches d'un fil métallique couvert de soie, et replié comme l'indique la figure; les extrémités du fil ont été mises à nu, recourbées.

théorie de l'électro-dynamique, Ampère a fait de cet énoncé un quatrième principe, bien qu'il ne l'ait pas démontré expérimentalement: l'expérience suivante, due à Ampère, ne peut pas, en effet, être considérée comme une démonstration.

Deux rigoles parallèles M et N (fig. 459) sont ménagées

Remarque. — Ce principe s'applique encore à deux courants non situés dans un même plan, comme ab et cd dans la figure 440, et c'est même toujours dans ces conditions que l'on réalise l'expérience. Au lieu du point de croisement, il faut alors considérer la perpendiculaire commune pp' à la direction des deux conducteurs. Il y a attraction entre les parties où les courants s'approchent ou s'éloignent ensemble de la perpendiculaire commune, et répulsion entre les parties où l'un des courants s'approche tandis que l'autre s'éloigne de cette perpendiculaire.

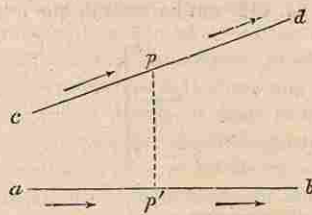
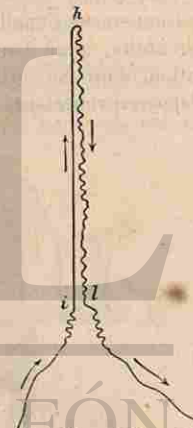


Fig. 440.

600. Principe des courants sinucieux. — Un courant sinucieux a la même action qu'un courant rectiligne de même intensité et terminé aux mêmes extrémités, pourvu que la distance à laquelle s'exerce cette action soit très grande par rapport à l'amplitude des sinuosités.

Pour vérifier ce principe, on prend un fil de cuivre ihl (fig. 441), dont l'une des branches ih est rectiligne, l'autre hl sinucieuse, et dont les extrémités communiquent avec les pôles de la pile; si le principe précédent est exact, l'action du système de ces deux fils sur un conducteur quelconque doit être nulle, puisque l'action de hl doit être équivalente à celle d'un courant rectiligne de même longueur et de même intensité que ih, mais de sens contraire. On constate, en effet, en approchant le système ihl de l'un quelconque des côtés du courant mobile de la figure 453, qu'il n'imprime aucun mouvement à ce courant, pourvu que la distance qui l'en sépare soit suffisamment grande par rapport à l'amplitude des sinuosités.

Fig. 441.  
Courant sinucieux.

601. Application de ces principes à quelques cas particuliers. — Nous allons appliquer les principes qui précèdent à quelques cas particuliers, pris comme exemples.

1° Action d'un courant rectiligne indéfini et fixe sur un courant rec- et plongent dans le liquide; le courant, arrivant en X et sortant en Y, traverse le mercure et le conducteur mobile, dans le sens des flèches. Aussitôt que les communications sont établies, on voit ce conducteur vivement repoussé (vers la droite, dans la figure actuelle).

Il faut remarquer que dans cette expérience, la portion mobile du courant n'est pas seulement soumise à l'action de la portion du courant qui lui est consécutive, elle est soumise à l'action du courant tout entier.

tiligne fini, mobile parallèlement à lui-même. — Pour définir les positions des deux courants, nous supposons que le courant fixe XY (fig. 442) soit horizontal, que le courant mobile *ab* soit vertical et placé

au-dessus du courant fixe; nous admettrons, en outre, que ces deux courants soient situés dans un même plan. — Si le courant mobile est descendant, comme l'indique la figure, il sera repoussé par la portion *cY* du courant fixe, et attiré par la portion *cX* (599); ces deux actions tendront, l'une et l'autre, à transporter le courant mobile *ab* dans un sens contraire à celui du courant fixe XY. — Si le courant mobile était ascendant, les mêmes actions tendraient à le déplacer dans le sens du courant fixe.

Pour rendre l'expérience réalisable, nous remarquerons que le même raisonnement s'appliquerait au cas où le courant XY serait un courant circulaire, situé dans un plan horizontal, le courant *ab* étant mobile autour d'un axe vertical passant par le centre du cercle, comme dans l'appareil représenté par la figure 445. — Un fil de cuivre entouré de

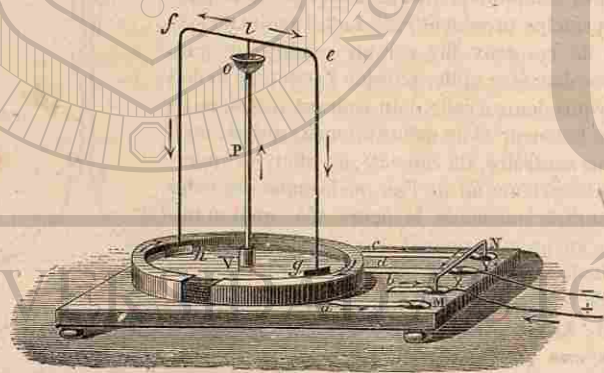


Fig. 445. — Rotation d'un courant vertical sous l'action d'un courant circulaire horizontal.

soie s'enroule un certain nombre de fois autour d'un cadre circulaire de bois : ses deux extrémités *a* et *c* communiquent avec des godets contenant du mercure; *V* est un vase de cuivre, qui contient de l'eau acidulée et dont le bord replié couvre le cadre circulaire. (Sur la figure, une portion de ce bord est supposée enlevée, pour laisser apercevoir le cadre et le fil qu'il supporte.) Une colonne métallique *P* traverse

en son centre le vase de cuivre, dont elle est d'ailleurs isolée, et dans la capsule métallique *o* repose, par une pointe fine, l'équipage mobile *gefsh*, dont les extrémités plongent dans l'eau acidulée : la colonne *P* et les bords métalliques du vase *V* communiquent également avec des godets contenant du mercure. — Si, en établissant entre les divers godets des communications convenables, on amène le courant d'une pile à suivre, dans le fil circulaire, et dans l'équipage mobile, la route indiquée par les flèches, on voit l'équipage *gefsh* prendre un mouvement de rotation, dont le sens est inverse de celui du courant circulaire. — Si, au contraire, on établit les communications de manière que le courant soit ascendant dans les côtés *ge*, *fh*, de l'équipage mobile, on observe un mouvement de rotation dont le sens est le même que celui du courant circulaire (\*).

2° Action d'un courant rectiligne indéfini sur un courant mobile fermé. — Nous supposons, pour fixer les idées, que le courant indéfini XY

(\*) Dans toutes les expériences d'électro-dynamique, lorsqu'on veut pouvoir, à volonté, établir le courant dans un circuit, supprimer le courant, ou renverser le sens du courant, il est commode de faire usage d'un commutateur, comme celui que représentent les figures 444 et 445.

La pièce *C* est un cylindre d'ivoire, mobile autour d'un axe horizontal, au moyen du bouton *B*. Sur ce cylindre sont appliquées deux plaques de cuivre *P* et *P'*, amincies vers leurs bords, et laissant à découvert, à droite et à gauche (fig. 445), une partie du cylindre *C*. — La plaque *P* est en communication, par la vis *b* (fig. 444), avec le demi-axe

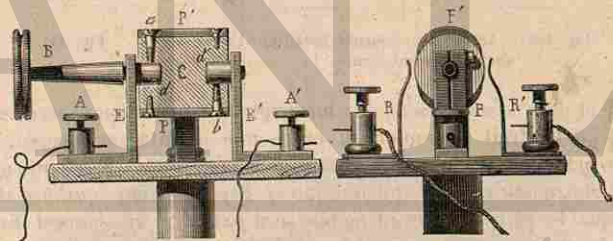


Fig. 444. Commutateur. Fig. 445.

métallique *d*, et par conséquent avec la borne métallique *A'*; tandis que la plaque *P'* par l'intermédiaire de la vis *a*, du demi-axe *d* et de la pièce *E*, est reliée métalliquement à la borne *A*. — Deux autres bornes, placées de part et d'autre du commutateur (fig. 445), communiquent avec les ressorts métalliques *R* et *R'*.

Supposons que le pôle positif de la pile soit en communication avec *R*, et le pôle négatif avec *R'*; que les bornes *A* et *A'* soient en communication avec les extrémités du conducteur dans lequel on veut, instantanément, établir, supprimer ou renverser le courant. — Quand le commutateur sera dans la position de la figure 445, le courant ne passera pas; mais si l'on fait tourner le commutateur de 90° vers la droite, de manière que le ressort *R* s'applique sur la plaque *P*, et que *R'* touche *P'*, le courant suivra le chemin *RPbdEA'*, passera dans le conducteur, dans le sens *A'A*, et reviendra à la pile, suivant le chemin *AEdaPR*. — Si maintenant on veut renverser le courant, on tournera le commutateur de 180°, de manière que la plaque *P'* vienne au contact du ressort *R*; alors le courant suivra le chemin *RP'adEA*, il ira, dans le conducteur dans le sens *AA'*, et reviendra à la pile par *A'E'dbPR*.

(fig. 446) soit horizontal, et que le courant rectangulaire fermé *defg* soit mobile autour d'un axe vertical rencontrant *XY* en un point *L*. — Le courant indéfini, dirigé de gauche à droite, sollicite, comme on vient de le voir, le courant descendant *de* vers la gauche, et le courant ascendant *fg* vers la droite; ces deux actions concordent pour faire tourner le cadre dans le sens indiqué par les flèches placées en *e* et en *f*. Il en est encore ainsi de l'action exercée par le courant indéfini sur le courant horizontal *ef*; ce dernier tend à se placer parallèlement

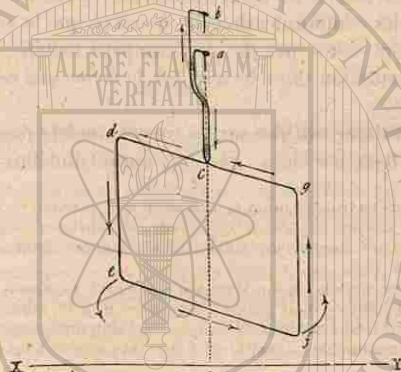


Fig. 446 — Action d'un courant rectiligne sur un courant fermé.

à *XY* et dans le même sens que lui (599). Enfin, l'action exercée sur le côté *gd* tendrait à donner au cadre une orientation opposée, mais cette action est moins énergique que la précédente parce que *gd* est plus éloigné du courant indéfini que *ef*. Il y aura donc *équilibre stable*, lorsque le plan du courant mobile sera *parallèle au courant fixe*, et que les deux courants seront *de même sens*, dans leurs parties horizontales les plus voisines.

On vérifie cette conclusion au moyen de l'appareil représenté par la figure 455. On dispose horizontalement, au-dessous du côté *ef*, un long fil de cuivre *XY* (fig. 446), communiquant avec deux pôles de la pile : on voit le courant *defg* s'orienter de manière que, dans le côté *ef*, le courant soit parallèle au courant *XY* et de même sens.

On arriverait à un résultat semblable en remplaçant le rectangle *defg* par un cercle *deg* (fig. 447). Ici encore, l'équilibre est stable quand le plan du courant mobile est parallèle au courant fixe, et que les deux courants sont de même sens dans leurs parties horizontales les plus voisines.

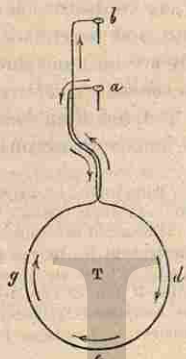


Fig. 447.

11. — ACTION DE LA TERRE SUR LES COURANTS.

602. **L'action de la Terre est assimilable à celle d'un courant indéfini, perpendiculaire au méridien magnétique et dirigé de l'est à l'ouest.** — On voit d'abord que cette assimilation de la Terre à un courant dirigé de l'est à l'ouest peut expliquer l'orientation que prend une aiguille aimantée mobile autour de son milieu. En effet, si nous appliquons la règle d'Ampère (568), la gauche du courant terrestre, par rapport à l'aiguille aimantée, située au-dessus de lui, serait du côté du nord; c'est donc de ce côté que doit se diriger le pôle austral.

Nous allons maintenant constater, sur deux exemples, que cette assimilation explique également l'action de la Terre sur les courants.

1° Action de la Terre sur un courant vertical, mobile autour d'un axe

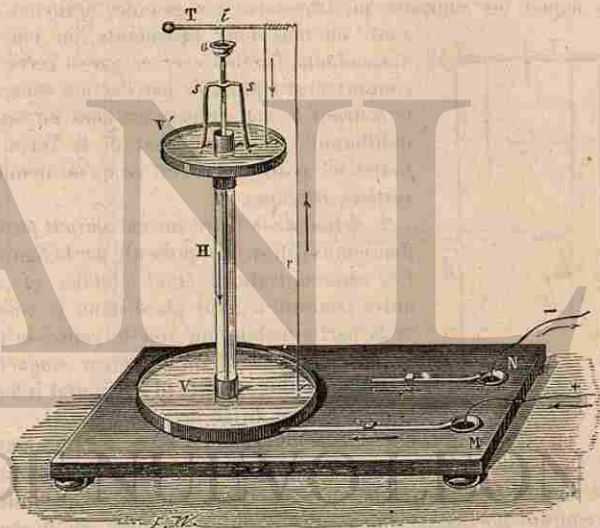


Fig. 448. — Action de la Terre sur un courant vertical.

vertical. — L'appareil représenté par la figure 448 se compose de deux coupes de cuivre rouge *V, V'*, contenant de l'eau acidulée, et d'une tige métallique *H*, isolée de la coupe *V*, mais communiquant avec la coupe *V'* par les tiges *s*, et terminée en *a* par une petite capsule. Un levier de bois *T* repose, par la pointe *i*, dans la capsule *a*; l'une de ses extrémités supporte un fil métallique *v*, dont les bouts plongent dans les liquides des deux coupes. Le godet *M* communique avec le bord

du vase V, le godet N avec le pied de la tige H. Les communications avec la pile étant établies comme l'indique la figure, le courant suit la route indiquée par les flèches, et l'on a, dans la plus grande branche du fil *v*, un courant vertical *ascendant*, mobile autour d'un axe vertical. On voit l'équipage se mettre en mouvement, puis s'arrêter, après quelques oscillations, dans une position d'équilibre stable : à ce moment, on constate que le plan vertical passant par le fil *v* et par l'axe de rotation est *perpendiculaire au méridien magnétique*; de plus le fil *v* se trouve à l'ouest de la colonne. C'est bien là l'effet qui doit se produire : si l'action de la Terre est assimilable à celle d'un courant rectiligne indéfini, dirigé de l'est à l'ouest, cette action doit tendre (601, 1<sup>o</sup>) à transporter le courant ascendant *v* vers l'ouest. — Si le courant *v* était *descendant*, le fil se porterait à l'est de l'axe de rotation.

Enfin, si l'on place, sur le même appareil, l'équipage de la figure 449, dans lequel les courants qui traversent les grandes branches *a* et *b* sont, ou tous deux *ascendants*, ou tous deux *descendants*, l'action exercée par la Terre sur le courant *a* est équilibrée par l'action exercée sur le courant *b* : cet équipage est donc en équilibre indifférent, sous l'influence de la Terre, dans toutes les positions : c'est ce qu'on nomme un *système astatique*.



Fig. 449.

2<sup>o</sup> *Action de la Terre sur un courant fermé.* — Reprenons l'appareil représenté par la figure 453. Les communications étant établies et aucun autre courant n'étant placé dans le voisinage de la partie mobile, on voit le cadre se placer *perpendiculairement au méridien magnétique*, de manière que, dans le fil horizontal inférieur, le courant soit dirigé de l'est à l'ouest. — Cette orientation s'explique encore en assimilant l'action de la Terre à celle d'un courant indéfini, dirigé de l'est à l'ouest : car on a vu (601, 2<sup>o</sup>) que, sous l'influence d'un courant horizontal, le cadre s'oriente de manière que le courant mobile et le courant fixe soient parallèles et de même sens dans leurs parties les plus voisines (\*).

On arrivera aux mêmes résultats en employant le cercle mobile de la figure 447.

(\*) Il importe cependant de remarquer que, sous l'influence du courant terrestre, l'orientation du cadre n'est due qu'aux actions exercées sur les deux côtés verticaux. On doit, en effet, considérer ce courant étant situé à une distance assez grande du cadre mobile pour que les actions qu'il exerce sur les deux côtés horizontaux soient égales et contraires, et par conséquent s'équilibrent.

603. *Conducteurs astatiques.* — D'après ce qu'on vient de voir, lorsqu'un conducteur mobile est parcouru par un courant, les diverses parties de ce conducteur sont soumises à l'action de la Terre : il pourrait donc se faire que, dans certaines expériences, les effets de l'action de la Terre vinssent masquer ceux des aimants ou des autres courants que l'on se proposerait de faire agir sur ce courant mobile. — C'est pourquoi on construit des conducteurs dont la disposition est telle que les actions de la Terre sur leurs diverses parties se neutralisent : ces conducteurs prennent le nom de *conducteurs astatiques*.

Les figures 450 et 451 représentent deux conducteurs de cette espèce. — Dans le premier (fig. 450), les deux fils verticaux les plus

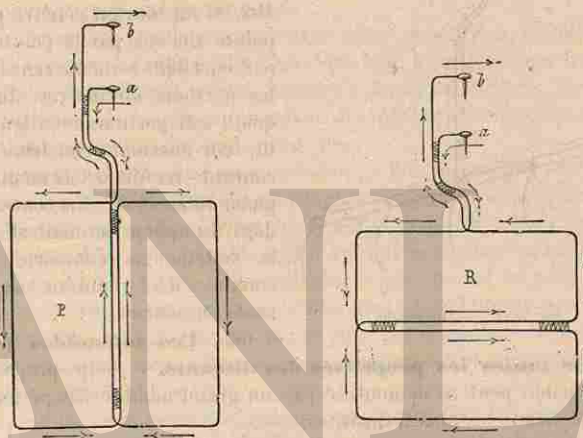


Fig. 450.

Conducteurs astatiques.

Fig. 451.

éloignés de l'axe de rotation, étant parcourus par des courants de même sens, tendraient à se porter tous deux d'un même côté du méridien magnétique : les actions de la Terre sur ces deux fils se font donc équilibre. Quant aux portions horizontales, chacune d'elles tend, d'après le principe des courants angulaires (599), à se placer parallèlement au courant terrestre et dans le même sens que lui ; par suite, les actions exercées sur les deux moitiés du côté inférieur se neutralisent, de même que les actions exercées sur les deux moitiés du côté supérieur. — On verra de même que le second conducteur (fig. 451) est astatique, en comparant, d'une part, les deux courants horizontaux extrêmes aux deux courants horizontaux intermédiaires, et, d'autre part, les deux moitiés de chacun des fils verticaux.

## III. — SOLÉNOÏDES. — THÉORIE DU MAGNÉTISME D'AMPÈRE.

604. **Solénoïdes.** — On appelle *solénoïde*, un système de courants circulaires égaux, de même sens, et dont les plans sont perpendiculaires à la ligne qui passe par leurs centres.

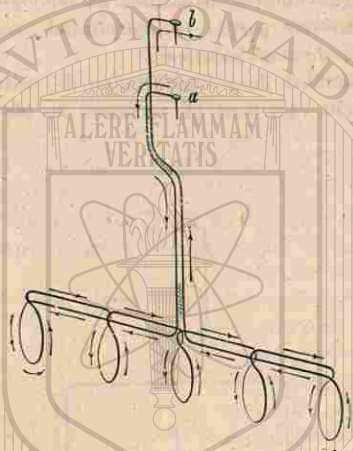


Fig. 452. — Solénoïde.

Pour réaliser un solénoïde, on prend un fil de cuivre entouré de soie, et on le contourne sur lui-même comme l'indique la figure 452. Si un courant pénètre par la pointe *a* et sort par la pointe *b*, il parcourt dans le même sens toutes les portions circulaires du fil; quant aux portions rectilignes du fil, leur ensemble constitue deux courants rectilignes de même longueur totale et de sens contraires, dont les actions se neutralisent: le système se comporte donc comme s'il se réduisait aux courants circulaires.

605. **Les solénoïdes jouissent de toutes les propriétés des aimants.** — Cette proposition remarquable peut se démontrer par un grand nombre d'expériences; nous décrirons les plus frappantes.

1° *Action de la Terre sur un solénoïde.* — Suspendons le solénoïde de la figure 452 au support représenté par la figure 453: il est alors mobile autour de la verticale passant par les points *a* et *b*. Or on sait que la Terre tend à orienter le plan de chaque cercle perpendiculairement au méridien magnétique, de manière que le courant marche de l'est à l'ouest dans la partie inférieure de la circonférence (602, 2°): le solénoïde doit donc s'orienter de manière que son *axe*, c'est-à-dire la droite qui passe par les centres de tous les cercles, se place comme une aiguille aimantée, dans le plan du méridien magnétique. C'est ce que vérifie l'expérience. — Par analogie avec les aimants, on appellera *pôle austral* du solénoïde, l'extrémité qui se tourne vers le nord; *pôle boréal*, l'extrémité qui se tourne vers le sud.

On peut d'ailleurs définir les deux pôles du solénoïde par le sens même du courant. Le *pôle austral* d'un solénoïde est l'extrémité qui est à la gauche d'un observateur couché dans l'un des courants circulaires, le courant entrant par les pieds, sortant par la tête, et l'observateur

regardant l'axe du solénoïde. Cette règle rappelle la règle d'Ampère (568). — Il est aisé de voir que cela revient encore à dire que le *pôle austral* d'un solénoïde est l'extrémité en face de laquelle il faut se placer, pour que le sens des courants circulaires paraisse inverse de celui du mouvement des aiguilles d'une montre.

2° *Action d'un courant rectiligne sur un solénoïde.* — Si l'on soumet le même solénoïde à l'action d'un courant rectiligne, on constate qu'il tend à se mettre en croix avec le courant, son pôle austral se portant à gauche. Il se comporte donc, dans ce cas encore, comme un aimant. — C'est ce qu'on peut encore s'expliquer, en remarquant que le plan de chacun des courants circulaires tend à se placer parallèlement au courant rectiligne: toutes ces actions concourent donc à placer l'axe du solénoïde en croix avec ce courant.

On remarquera d'ailleurs que, dans cette expérience, le solénoïde, soumis toujours à l'action de la Terre qui tend à ramener son axe dans le méridien magnétique, prend, comme le ferait un aimant, une position intermédiaire entre la direction du méridien magnétique et la direction perpendiculaire au courant fixe.

3° *Actions mutuelles de deux solénoïdes.* — Soit un premier solénoïde, comme celui de la figure 452, suspendu à l'appareil de la figure 453, et un second solénoïde que l'on tiendra à la main. — Si l'on présente le pôle austral de l'un au pôle austral de l'autre, on observe une répulsion. Il en est de même, si l'on présente le pôle boréal au pôle boréal. — Au contraire, si l'on présente le pôle austral de l'un au pôle boréal de l'autre, il y a attraction. — Donc, pour les solénoïdes comme pour les aimants, *deux pôles de même nom se repoussent; deux pôles de noms contraires s'attirent.*

Ce résultat peut encore s'expliquer au moyen des actions des courants sur les courants; en effet, quand les deux pôles de même nom sont en regard, leurs éléments correspondants sont parallèles, et les courants sont de sens contraires: il doit donc y avoir *répulsion*. — Quand ce sont des pôles de noms contraires qu'on met en regard, leurs éléments correspondants sont encore parallèles, mais les courants sont de même sens: il doit donc y avoir *attraction*.

4° *Action d'un aimant sur un solénoïde.* — En opérant d'une manière semblable, on constate que le pôle austral d'un aimant repousse le pôle austral d'un solénoïde; que le pôle boréal d'un aimant repousse le pôle boréal d'un solénoïde. — Enfin, le pôle austral de l'un attire le pôle boréal de l'autre, et réciproquement.

Ces résultats peuvent encore être interprétés, en se reportant à la direction du courant dans les cercles qui forment le solénoïde, et en appliquant la règle d'Ampère (568).

606. **Théorie du magnétisme d'Ampère.** — Les analogies que les solénoïdes et les aimants offrent entre eux, ont conduit Ampère à une

théorie dans laquelle on considère les aimants comme devant eux-mêmes leurs propriétés à des courants électriques, qui circuleraient autour de leurs particules.

Dans la théorie d'Ampère, on considère ces courants comme existant toujours, soit dans l'acier, soit dans le fer doux, même lorsque ces corps ne manifestent pas de signes d'aimantation : seulement, on admet que ces petits courants présentent alors des orientations variables d'une particule à l'autre, en sorte qu'ils ne peuvent révéler leur présence par aucun effet extérieur. — L'aimantation oriente tous les courants particuliers, et les amène à circuler dans des plans parallèles et dans le même sens. Cette orientation est temporaire dans le fer doux aimanté par influence ; elle est durable dans l'acier trempé, qui est doué de force coercitive.

Un barreau aimanté est ainsi assimilable à un faisceau de petits solénoïdes, qui seraient tous placés de la même manière. — Seulement, pour expliquer que les pôles d'un barreau aimanté sont toujours situés à une certaine distance de ses extrémités, Ampère admet que les divers solénoïdes élémentaires, sous l'influence de leurs réactions mutuelles, arrivent à se courber légèrement, en divergeant les uns par rapport aux autres au voisinage des extrémités du barreau : les centres d'action du système, qui constituent les pôles de l'aimant, se trouvent ainsi à une certaine distance des extrémités elles-mêmes. — Quand on divise un solénoïde en plusieurs parties, chaque fragment est encore un solénoïde, ayant deux pôles disposés comme dans le solénoïde primitif. Il en est de même pour un aimant brisé en plusieurs fragments (501). — On peut, en considérant les aimants sous ce nouveau point de vue, se reporter à chacune des expériences par lesquelles nous avons constaté les actions exercées par les courants sur les aimants, et montrer qu'elles peuvent s'expliquer par les actions des courants sur les courants. — C'est ce que nous allons faire pour quelques-unes de ces expériences.

**607. Interprétation, dans la théorie d'Ampère, de la rotation d'un aimant sous l'action d'un courant.** — Reprenons l'expérience de Faraday (595, 3<sup>e</sup>), dans laquelle on produit la rotation continue d'un aimant sous l'action d'un courant. — Supposons que les courants soient dirigés du centre à la circonférence de la surface liquide, et que le pôle supérieur de l'aimant soit un pôle austral. Soient T (fig. 453) la section horizontale de la tige qui amène le courant ;  $mm'n'$  la section de l'aimant ; soient TE et TE' deux courants se propageant à la surface du mercure, et placés, de part et d'autre, en dehors de l'angle des tangentes TM et TM'. Si l'on assimile l'aimant à un solénoïde, les courants de ce solénoïde auront, pour un observateur qui regarderait l'aimant de haut en bas, un sens inverse du mouvement des aiguilles d'une montre, comme l'indiquent les flèches tracées autour du cercle  $mm'n'$ . On

voit que les portions de ces courants qui sont les plus voisines du courant TE sont attirées par TE ; les portions qui sont les plus voisines du courant TE' sont repoussées par TE' : l'aimant doit donc s'éloigner de TE' et s'approcher de TE. Le même raisonnement s'applique à l'action de deux courants quelconques, placés de part et d'autre de l'angle MTM', et cela quelle que soit la position dans laquelle arrive l'aimant : donc l'aimant doit se transporter en tournant autour de la tige T, et ce mouvement doit être dirigé dans le sens de celui des aiguilles d'une montre.

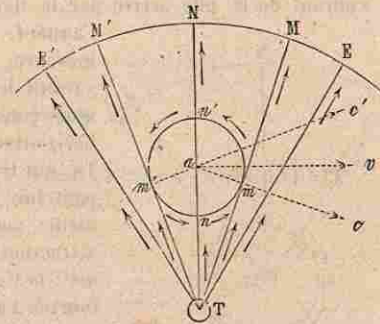


Fig. 453.  
Interprétation de l'expérience de Faraday,  
dans la théorie d'Ampère.

Le mouvement de rotation est inverse, si les courants ont un sens inverse à la surface du mercure, ou si les pôles de l'aimant sont placés en sens inverse. — Si l'on intervertit à la fois la position de l'aimant et la direction des courants, on retrouve le sens primitif de la rotation.

**608. Modification de l'expérience précédente.** — Un raisonnement analogue permet d'expliquer une expérience un peu différente, due à Ampère lui-même.

Faisons plonger le conducteur T (fig. 454) dans une petite capsule métallique contenant du mercure, et fixée à la partie supérieure de l'aimant : l'aimant prendra un mouvement de rotation autour de son axe. —

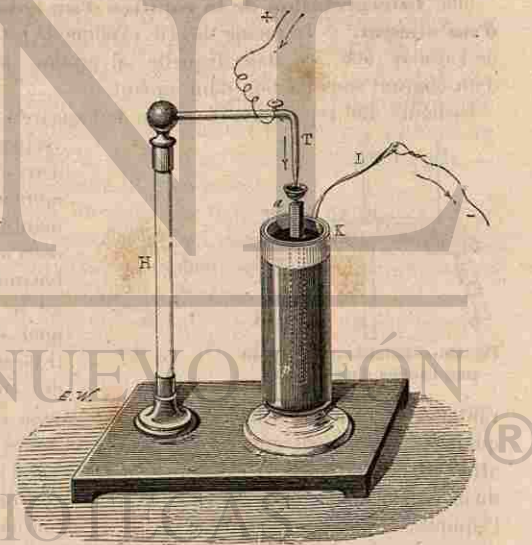


Fig. 454. — Rotation d'un aimant autour de son axe.

Représentons par  $mm'n'$  (fig. 455) la section du barreau aimanté, dont les courants particuliers ont la direction marquée par les flèches : le courant de la pile arrive par la tige T, et, après avoir traversé

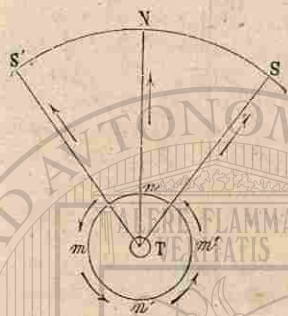


Fig. 453.

l'aimant, il se dirige, à la surface du mercure, vers la circonférence SNS, suivant les divers rayons du cercle. Si nous considérons l'un de ces courants horizontaux TN, on voit que la portion  $Tn$ , qui traverse l'aimant lui-même, ne peut lui communiquer aucun mouvement; mais la portion  $nN$  exerce une attraction sur  $mn$  et une répulsion sur  $nm'$ ; ces actions concordent pour faire tourner l'aimant dans le sens  $mm'$ . Il en est de même de tous les courants horizontaux, en sorte que, dans les conditions que suppose la figure, l'aimant tourne

autour de son axe, dans un sens inverse de celui de ses courants particuliers.

**609. Interprétation de la rotation d'un courant sous l'action d'un aimant.** — La même théorie explique le résultat de l'expérience de Faraday (596, 5<sup>e</sup>), dans laquelle on produit la rotation continue d'un courant sous l'action d'un aimant.

La figure 456 représente la section de l'appareil (fig. 452) par le plan vertical qui contient les deux conducteurs  $b, c$ , au moment où le barreau aimanté est introduit. Soit

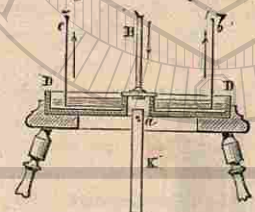


Fig. 456.—Rotation d'un courant sous l'action d'un aimant.

le courant ascendant  $b$  est attiré par  $n'm'$ , et repoussé par  $mn'$ , c'est-à-dire qu'il est sollicité à passer derrière le plan de la figure 456; de même,  $c$  est attiré par  $nm$  et repoussé par  $m'n$ , c'est-à-dire qu'il tend à venir en avant du plan de la même figure. Ces quatre actions concordent pour entraîner l'équipage dans le même sens; il en est de même dans l'une quelconque des positions qu'il prend successivement pendant la rotation



Fig. 457.

Fig. 457) la section horizontale du barreau, et  $nn'$  le diamètre suivant lequel son extrémité australe est coupée par le plan des conducteurs. Le courant

## CHAPITRE VII

## AIMANTATION PAR LES COURANTS. — TÉLÉGRAPHIE ÉLECTRIQUE.

## I. — DÉVELOPPEMENT DU MAGNÉTISME PAR LES COURANTS. — ÉLECTRO-AIMANTS.

**610. Développement du magnétisme par les courants.** —

Quelle que soit la façon dont on se représente le développement de l'aimantation, qu'on l'attribue à une séparation des deux fluides répandus dans les éléments magnétiques (502), ou à une orientation des courants particuliers (606), les résultats fournis par l'électro-magnétisme conduisent à se demander si un courant ne doit pas agir sur un corps magnétique *non aimanté*, de façon à y produire l'aimantation. — Les expériences suivantes prouvent qu'il en est ainsi.

Si, comme l'a fait Arago, on place une tige de fer en croix avec un conducteur traversé par un courant, on constate qu'il se développe, dans cette tige, une aimantation qui persiste tant que le courant passe; les pôles sont placés conformément à la règle d'Ampère (\*).

Si l'on place, en croix avec un courant, une aiguille d'acier trempé, non aimantée, on voit l'aimantation s'y développer avec lenteur, mais persister après le passage du courant.

**611. Aimantation de l'acier par les courants ou par les décharges électriques.** — A la suite de ces expériences, Ampère eut l'idée d'accroître le magnétisme développé par un courant dans une aiguille d'acier, en enroulant autour d'elle le fil conducteur. — Si l'on place une aiguille d'acier dans un tube de verre, autour duquel on aura enroulé en hélice un fil métallique (fig. 458), et si l'on fait passer un courant dans ce fil pendant quelques instants, on constate que l'aiguille est aimantée.

(\*) Si l'on plonge dans la limaille de fer un fil de cuivre, et qu'on y fasse passer un courant, on voit les grains de limaille s'attacher à ce fil et s'attirer les uns les autres, comme de petits aimants : l'attraction cesse dès qu'on ouvre le circuit.

Représentons par  $mm'n'$  (fig. 455) la section du barreau aimanté, dont les courants particuliers ont la direction marquée par les flèches : le courant de la pile arrive par la tige T, et, après avoir traversé

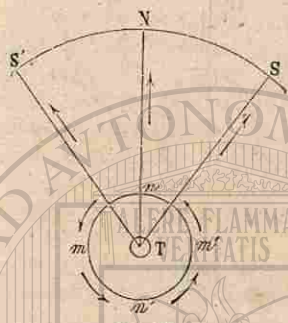


Fig. 453.

l'aimant, il se dirige, à la surface du mercure, vers la circonférence SNS, suivant les divers rayons du cercle. Si nous considérons l'un de ces courants horizontaux TN, on voit que la portion  $Tn$ , qui traverse l'aimant lui-même, ne peut lui communiquer aucun mouvement; mais la portion  $nN$  exerce une attraction sur  $mn$  et une répulsion sur  $nm'$ ; ces actions concordent pour faire tourner l'aimant dans le sens  $mm'$ . Il en est de même de tous les courants horizontaux, en sorte que, dans les conditions que suppose la figure, l'aimant tourne

autour de son axe, dans un sens inverse de celui de ses courants particuliers.

**609. Interprétation de la rotation d'un courant sous l'action d'un aimant.** — La même théorie explique le résultat de l'expérience de Faraday (596, 5<sup>e</sup>), dans laquelle on produit la rotation continue d'un courant sous l'action d'un aimant.

La figure 456 représente la section de l'appareil (fig. 452) par le plan vertical qui contient les deux conducteurs  $b, c$ , au moment où le barreau aimanté est introduit. Soit  $mm'n'$  (fig. 457) la section horizontale du barreau, et  $nn'$  le diamètre suivant lequel son extrémité australe est coupée par le plan des conducteurs. Le courant ascendant  $b$  est attiré par  $n'm'$ , et repoussé par  $mn'$ , c'est-à-dire qu'il est sollicité à passer derrière le plan de la figure 456; de même,  $c$  est attiré par  $nm$  et repoussé par  $m'n$ , c'est-à-dire qu'il tend à venir en avant du plan de la même figure. Ces quatre actions concordent pour entraîner l'équipage dans le même sens; il en est de même dans l'une quelconque des positions qu'il prend successivement pendant la rotation

Fig. 456.—Rotation d'un courant sous l'action d'un aimant.

Fig. 457.

## CHAPITRE VII

## AIMANTATION PAR LES COURANTS. — TÉLÉGRAPHIE ÉLECTRIQUE.

## I. — DÉVELOPPEMENT DU MAGNÉTISME PAR LES COURANTS. — ÉLECTRO-AIMANTS.

**610. Développement du magnétisme par les courants.** —

Quelle que soit la façon dont on se représente le développement de l'aimantation, qu'on l'attribue à une séparation des deux fluides répandus dans les éléments magnétiques (502), ou à une orientation des courants particuliers (606), les résultats fournis par l'électro-magnétisme conduisent à se demander si un courant ne doit pas agir sur un corps magnétique *non aimanté*, de façon à y produire l'aimantation. — Les expériences suivantes prouvent qu'il en est ainsi.

Si, comme l'a fait Arago, on place une tige de fer en croix avec un conducteur traversé par un courant, on constate qu'il se développe, dans cette tige, une aimantation qui persiste tant que le courant passe; les pôles sont placés conformément à la règle d'Ampère (\*).

Si l'on place, en croix avec un courant, une aiguille d'acier trempé, non aimantée, on voit l'aimantation s'y développer avec lenteur, mais persister après le passage du courant.

**611. Aimantation de l'acier par les courants ou par les décharges électriques.** — A la suite de ces expériences, Ampère eut l'idée d'accroître le magnétisme développé par un courant dans une aiguille d'acier, en enroulant autour d'elle le fil conducteur. — Si l'on place une aiguille d'acier dans un tube de verre, autour duquel on aura enroulé en hélice un fil métallique (fig. 458), et si l'on fait passer un courant dans ce fil pendant quelques instants, on constate que l'aiguille est aimantée.

(\*) Si l'on plonge dans la limaille de fer un fil de cuivre, et qu'on y fasse passer un courant, on voit les grains de limaille s'attacher à ce fil et s'attirer les uns les autres, comme de petits aimants : l'attraction cesse dès qu'on ouvre le circuit.



Le pôle austral se développe à la gauche de chacun des courants circulaires, conformément à la règle d'Ampère. — On peut encore dire que le pôle austral se forme à l'extrémité devant laquelle il faut se placer



Fig. 458.

pour que le sens des courants circulaires paraisse inverse de celui du mouvement des aiguilles d'une montre (\*).

Enfin, pour produire des points consécutifs dans une aiguille, il suffit de changer le sens de l'enroulement du fil sur le tube (fig. 459).

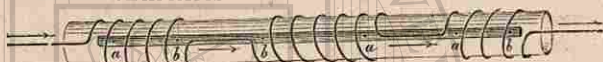


Fig. 459.

Arago a constaté qu'on peut encore aimanter une aiguille d'acier, placée dans une hélice, en faisant passer dans cette hélice les décharges d'une machine électrique ou d'une batterie (\*\*). — On comprend, dès lors, que la foudre puisse aimanter des masses d'acier ou de fer, situées au voisinage des points frappés; qu'elle puisse intervertir les pôles des aimants, etc.

612. **Électro-aimants.** — On conçoit, d'après ce qui précède, qu'un barreau de fer doux (fig. 460), environné d'une bobine portant un fil conducteur enroulé en spirale, doit se comporter comme un aimant au moment où le fil est parcouru par un courant: le fer doux doit retomber à l'état neutre, dès que le courant est interrompu. Tel est le principe de la construction des électro-aimants.

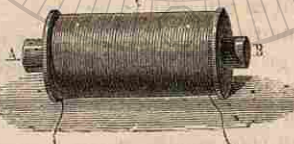


Fig. 460. — Electro-aimant.

Lorsqu'on se propose d'employer un électro-aimant à attirer une

(\*) Le procédé le plus puissant pour aimanter les barreaux d'acier est le suivant. Le barreau à aimanter est placé dans l'axe d'un anneau, sur lequel s'enroule un fil métallique traversé par un courant intense. Il est d'ailleurs assujéti entre deux forts aimants: par exemple, entre deux électro-aimants semblables à ceux que nous étudierons plus loin. On exerce alors, avec l'anneau lui-même, des frictions répétées sur le barreau, dans le sens de sa longueur, en ayant soin de passer le même nombre de fois sur chaque moitié.

(\*\*) Les recherches faites sur ce sujet par Savary ont montré qu'il faut toujours, pour que l'aimantation se développe, donner à la décharge une durée appréciable. Ainsi, lorsqu'on réunit les armatures d'une batterie puissante par un fil de platine fin, de aiguilles placées en croix avec ce fil s'aimantent d'une manière sensible.

pièce de fer doux, il y a avantage à courber, en forme de fer à cheval, la barre qui doit acquérir l'aimantation. On place alors les deux branches du fer à cheval dans deux bobines A, B (fig. 461), sur lesquelles s'enroule un même fil de cuivre, couvert de soie. Les actions des deux bobines devant concorder pour développer des pôles de noms contraires

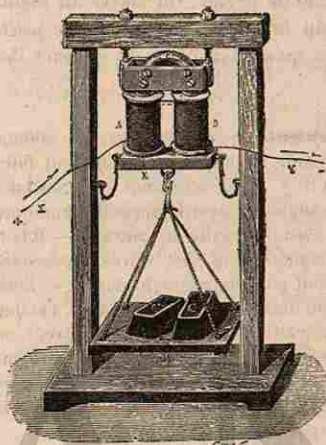


Fig. 461. — Electro-aimant en fer à cheval.

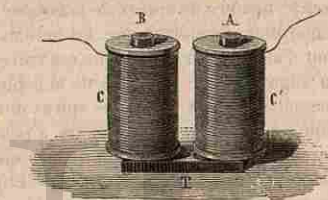


Fig. 462. — Electro-aimant à deux branches

réunir, par une traverse de fer doux T (fig. 462), deux barreaux A et B placés parallèlement. — C'est toujours ainsi que sont construits, par exemple, les électro-aimants employés dans la télégraphie électrique: on parvient ainsi plus facilement à obtenir ces trois pièces sans force coercitive, et l'électro-aimant fonctionne comme s'il ne contenait qu'une seule pièce de fer, courbée en fer à cheval (\*).

613. **Magnétisme rémanent.** — Lorsqu'on emploie un électro-aimant pour fixer un contact (fig. 461), on observe souvent que le contact ne se détache pas au moment même où le courant est interrompu; on peut parfois lui faire porter encore, pendant assez longtemps, le quart ou le tiers de la charge qu'il supportait pendant le passage du courant.

On a nommé *magnétisme rémanent*, le magnétisme qui persiste dans un électro-aimant, sous l'influence du contact, après la suppression du courant. — Cette persistance de l'aimantation a de graves inconvé-

(\*) Après avoir choisi du fer aussi pur que possible, et avoir donné aux barreaux la forme qu'ils doivent prendre, on les recuit à plusieurs reprises, et on achève de les travailler, non pas au marteau, mais à la lime: on fait ainsi disparaître sensiblement la force coercitive que l'écroutissage ne manque jamais de communiquer, même au fer le mieux préparé.

nients, dans la plupart des usages auxquels on applique les électro-aimants. Elle est toujours d'autant plus faible, que le fer est plus pur et mieux travaillé.

On diminue beaucoup l'intensité et la durée du magnétisme rémanent, en plaçant, entre l'électro-aimant et son contact, une plaque de bois ou de carton, ou même une feuille de papier. On arrive au même résultat, en disposant un obstacle qui arrête le contact à une petite distance de l'électro-aimant; c'est ce qu'on fait dans la plupart des appareils de télégraphie électrique.

**614. Puissance d'un électro-aimant.** — On peut prendre comme mesure de la puissance d'un électro-aimant, la charge que l'on peut faire porter au contact de fer doux sans qu'il y ait arrachement. On constate, d'une manière générale, que la puissance augmente avec le diamètre du noyau, avec le nombre de spires de la bobine et avec l'intensité du courant. — Il faut remarquer cependant que les actions magnétisantes des spires successives sont d'autant plus faibles que ces spires sont plus éloignées du noyau; si donc on augmentait le diamètre de la bobine au delà d'une certaine limite, l'action magnétisante des dernières spires deviendrait insensible. Le plus souvent, on donne à la bobine un diamètre à peu près double de celui du noyau; dans ces conditions, l'expérience montre que la puissance est sensiblement proportionnelle au nombre des spires. — Elle est aussi proportionnelle à l'intensité du courant, tant que celle-ci ne dépasse pas une certaine limite.

Proposons-nous de déterminer la longueur  $l$  et la section  $s$  du fil de cuivre qu'il faudra enrouler sur un noyau de dimensions données, pour obtenir le maximum de puissance, avec le courant d'une pile de résistance donnée  $R$ . — Nous aurons une première relation entre  $l$  et  $s$ , en remarquant que le volume  $ls$  du fil de cuivre est connu; il est égal à la différence  $v$  des volumes de deux cylindres de même hauteur (la longueur du noyau), le diamètre de l'un étant double de celui de l'autre; on a donc

$$(1) \quad v = ls.$$

Soit  $p$  la longueur moyenne de chaque spire, c'est-à-dire la moyenne des longueurs de la circonférence du noyau et de celle de la bobine; le nombre des tours de fil est  $n = \frac{l}{p}$ . — Désignons par  $k$  la résistance spécifique du cuivre, et par  $E$  la force électromotrice de la pile tout entière; l'intensité du courant est exprimée par

$$i = \frac{E}{R + \frac{kl}{s}};$$

la puissance de l'électro-aimant étant proportionnelle aux deux quantités  $n$  et  $i$ , nous pouvons la représenter par le produit

$$m = \frac{El}{p(R + \frac{kl}{s})} = \frac{E}{p(\frac{R}{l} + \frac{k}{s})}$$

Pour que la puissance soit maximum, il faut que la somme  $\frac{R}{l} + \frac{k}{s}$  soit minimum; or le produit de ses deux termes,  $\frac{R}{l} \times \frac{k}{s} = \frac{Rk}{v}$ , est constant; dès lors, d'après un théorème connu, le minimum aura lieu quand on aura

$$(2) \quad \frac{R}{l} = \frac{k}{s}.$$

Les équations (1) et (2) feront connaître  $l$  et  $s$ . — Enfin, si l'on remarque que l'équation (2) peut s'écrire

$$R = \frac{kl}{s},$$

on voit que, dans la construction des électro-aimants, pour obtenir l'effet maximum, on doit faire en sorte que la résistance du fil de la bobine  $\frac{kl}{s}$  soit égale à la résistance  $R$  du reste du circuit, dans lequel la bobine devra être intercalée.

Le même raisonnement s'appliquerait au multiplicateur d'un galvanomètre.

**615. Sonneries électriques.** — Les sonneries électriques fournissent un exemple simple des propriétés des électro-aimants.

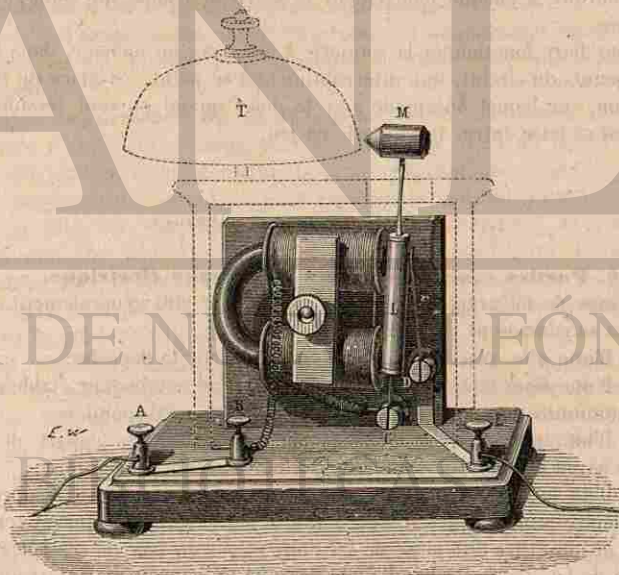


Fig. 465. — Sonnerie électrique.

Un électro-aimant en fer à cheval est fixé sur une planche verticale

(fig. 463) : en face des extrémités de ses branches, se trouve une pièce de fer doux mobile L, supportée par une lame d'acier élastique, fixée inférieurement en C : cette pièce de fer porte une tige munie d'un marteau M destiné à frapper sur un timbre fixe T. A l'état de repos, cette pièce L, écartée de l'électro-aimant, appuie contre le ressort r qui communique, par le bouton D et la borne E, avec le fil conducteur qui se rend à l'un des pôles d'une pile. — La partie inférieure C de la lame d'acier qui supporte la pièce L communique, comme le montre la figure, avec l'une des extrémités du fil de l'électro-aimant; l'autre extrémité de ce même fil est mise en communication, par la borne A, avec le fil conducteur qui se rend à l'autre pôle de la pile.

Dès que le circuit de la pile est fermé, le courant passe par le ressort r, par la palette L et par le fil de l'électro-aimant. Mais le passage même du courant ayant pour effet d'aimanter l'électro-aimant, la palette L est attirée et s'éloigne du ressort r : le circuit est alors interrompu, et l'électro-aimant cesse d'attirer la palette. Dès lors, la lame élastique qui supporte la palette la ramène au contact du ressort r : le circuit est fermé de nouveau; la palette est attirée de nouveau par l'électro-aimant, et ainsi de suite, tant que dure le passage du courant. A chaque mouvement le marteau frappe un coup sur le timbre.

Pour faire fonctionner la sonnerie à distance, on ménage, dans l'un des points du circuit, une interruption; en ce point, est placé un petit bouton, sur lequel on appuie avec le doigt quand on veut rétablir le circuit et faire entrer la sonnerie en jeu.

## II. — TÉLÉGRAPHIE ÉLECTRIQUE.

616. **Parties essentielles d'un télégraphe électrique.** — Les systèmes de télégraphie électrique qui sont le plus généralement employés se composent essentiellement :

- 1° D'une *pile*, placée au point d'où doit partir la dépêche;
- 2° D'une *ligne télégraphique*, c'est-à-dire d'un conducteur établissant la communication entre les points qui sont en correspondance;
- 3° D'un appareil *manipulateur*, placé au point de départ de la dépêche, et permettant d'interrompre ou de rétablir le courant;
- 4° D'un appareil *récepteur*, placé au point d'arrivée : il comprend un électro-aimant, qui entre en action dès que le courant lui est transmis, et qui attire une pièce de fer doux placée en face de ses pôles; la pièce de fer doux est abandonnée dès que le courant est interrompu. Les mouvements de cette pièce, se transmettant à des organes divers, produiraient tels ou tels effets, selon qu'il s'agira de tel ou tel système.

On fait le plus souvent usage de piles qui ne sont que des modifica-

tions de la pile de Daniell, et qui présentent une constance remarquable pendant plusieurs semaines (\*).

Nous parlerons d'abord de l'établissement de la ligne, et nous décrirons ensuite le manipulateur et le récepteur de quelques-uns des systèmes les plus employés.

617. **Lignes télégraphiques, aériennes ou souterraines.** — La communication entre les postes d'une ligne télégraphique s'établit au moyen de fils métalliques, qui doivent être isolés aussi exactement que possible dans toute leur longueur. — Ce sont, en général, des fils de fer *galvanisés*, c'est-à-dire couverts d'une couche de zinc qui les préserve de l'oxydation.

Ceux de ces fils qui sont placés à ciel ouvert sont soutenus par des poteaux, et reposent sur des crochets métalliques, fixés à des supports de porcelaine isolants (fig. 464).

Quand les fils doivent traverser une grande ville, on les entoure d'une couche de gutta-percha, et on les applique le long des voûtes des égouts, où il est facile de pénétrer pour les visiter. — Lorsqu'on est obligé de placer les conducteurs dans le sol même, on les protège généralement, en outre, par une enveloppe métallique.

618. **Suppression du fil de retour.** — Du pôle positif de la pile placée à l'une des stations, part un fil qui se rend au récepteur de l'autre station, et qui constitue la ligne télégraphique; dans l'origine, on employait un second fil, pour ramener le courant au pôle négatif de la pile. On supprime aujourd'hui ce *fil de retour*, et l'on fait communiquer avec la terre, d'une part le pôle négatif de la pile, d'autre part l'extrémité libre du fil de l'électro-aimant du récepteur. La terre joue alors le rôle d'un corps conducteur, de surface infinie, dans lequel l'électricité s'écoule successivement, en sorte qu'il se produit, sur le fil unique, un véritable courant, allant du pôle positif de la pile au récepteur de la station d'arrivée, par l'affluence incessante d'une nouvelle quantité d'électricité.

On n'a pas seulement l'avantage d'économiser ainsi la moitié de la longueur de fil qui aurait été nécessaire si l'on avait employé un fil

(\*) On doit à M. Marié-Davy une pile qui est destinée au service télégraphique, et qui présente des avantages réels. Elle peut être considérée comme différant de la pile de Daniell en ce que le sulfate de cuivre est remplacé par du sulfate de mercure. Le conducteur qui plonge dans le sulfate de mercure ne peut plus être une lame de cuivre, qui serait attaquée : c'est une plaque de charbon de cornue, sur laquelle se rend le mercure mis en liberté par le courant. Ce métal coule au fond du vase poreux, où l'on peut le recueillir.

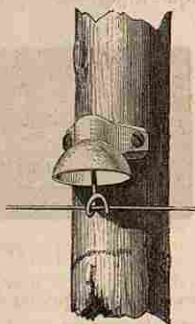


Fig. 464.  
Poteau télégraphique.

de retour : l'expérience a montré qu'on obtient, avec la même pile, un courant d'une intensité presque double.

(619) **Télégraphe de Morse.** — Le système télégraphique de Morse, inventé en Amérique, s'est rapidement répandu dans le monde entier : c'est aujourd'hui l'un des plus employés.

**Manipulateur.** — Le manipulateur se compose d'un levier métallique K (fig. 465), qui est mobile autour d'un axe S communiquant avec

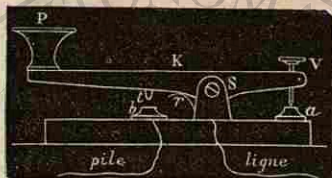


Fig. 465.

la ligne, comme l'indique la figure. On manœuvre ce levier en appuyant avec la main sur la poignée P : la pointe métallique *t* vient alors porter sur la pièce métallique *b*, qui communique avec le pôle positif de la pile : donc, tant que dure la pression exercée sur la poignée P, le courant de la pile passe sur la ligne.

Dès que cette pression cesse, le ressort *r* relève le levier, et le courant est interrompu. — En faisant varier la durée des contacts, on peut envoyer ainsi sur la ligne une série de courants discontinus, dont on règle à volonté le rythme et la durée (\*).

**Récepteur.** — Les mouvements du levier du manipulateur sont fidèlement reproduits par un levier AOD (fig. 467), qui est la pièce principale du récepteur. Ce levier est mobile autour d'un axe O : sa branche OA porte une plaque de fer doux A, placée au-dessus d'un électro-aimant E,

(\* Le manipulateur représenté par la figure 466 porte, outre les deux boutons B et C, qui servent à établir la communication de *b* avec la pile, et celle de S avec la ligne, un troisième bouton A qui est en communication avec la pièce métallique *a*. Ce bouton, qui reçoit un fil se rendant au récepteur du même poste, sert, quand le manipu-

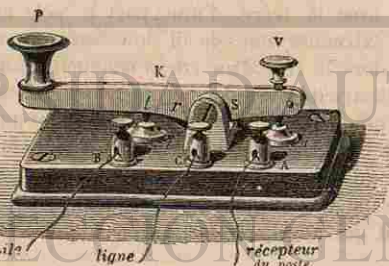


Fig. 466. — Manipulateur du télégraphe de Morse.

lateur est au repos, à faire parvenir dans ce récepteur les courants qui peuvent arriver par le fil de la ligne. On voit, en effet, que le levier métallique établit alors la communication entre C et A : le manipulateur se place donc de lui-même, quand on abandonne la poignée, dans la position de *réception*.

dont le fil communique d'une part avec la ligne, d'autre part avec la terre. Au-dessus de l'extrémité de l'autre bras du levier, passe une

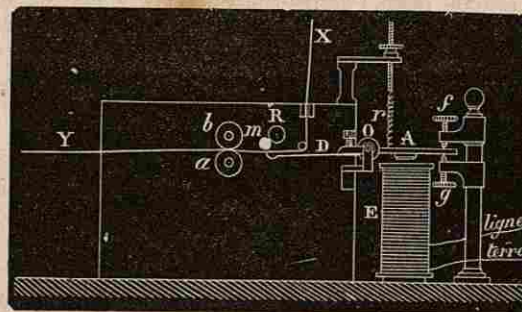


Fig. 467.

bande de papier XY, qui est entraînée d'un mouvement uniforme entre

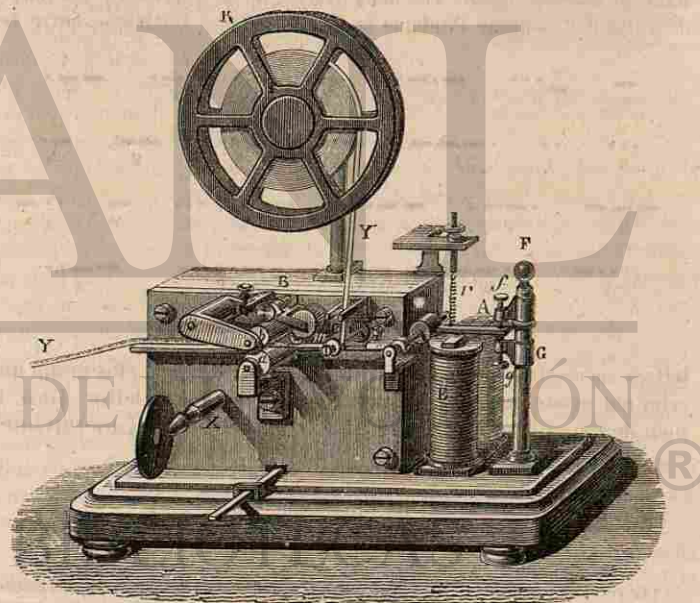


Fig. 468. — Récepteur du télégraphe de Morse.

deux cylindres horizontaux *b*, *a*, mobiles autour de leurs axes, et mis en mouvement par un mécanisme d'horlogerie contenu dans la boîte B

(fig. 468). — Tant qu'il n'y a pas de courant transmis au fil de l'électro-aimant, le ressort à boudin *r* maintient relevé le bras OA du levier. Dès que le courant passe, l'électro-aimant abaisse le bras OA du levier; par suite, l'extrémité D du levier (fig. 467) soulève la bande de papier et vient l'appuyer sur une molette *m*, qui est couverte d'encre d'imprimerie : cette molette imprime ainsi, sur le papier, un trait dont la longueur dépend de la durée du courant (\*).

Pour limiter l'amplitude des oscillations du levier AOD (fig. 467), on place, au-dessus et au-dessous du prolongement de OA, deux vis fixes *f* et *g*; la première, *f*, est réglée de manière que la pièce de fer A s'éloigne peu de l'électro-aimant pendant les interruptions du courant; la seconde, *g*, empêche la pièce A de venir toucher l'électro-aimant, ce qui aurait l'inconvénient de développer dans le fer doux une aimantation persistante, et de troubler ainsi la marche de l'appareil (615).

On est convenu de n'employer que deux traces différentes : le point (-), qui correspond à un courant presque instantané, et le trait (—), qui correspond à un courant de durée déterminée. — C'est en combinant de diverses façons ces deux traces, qu'on représente les lettres de l'alphabet, comme l'indique la figure 469. — On laisse, entre les



Fig. 469. — Alphabet du télégraphe de Morse.

lettres successives qui composent un mot, un intervalle plus grand que celui qui existe entre les signaux formant une même lettre. Ainsi, le nom de l'inventeur Morse s'écrirait comme l'indique la figure suivante :



Fig. 470.

(\*) Le récepteur représenté par la figure 468 porte quelques autres pièces accessoires, dont il est facile de comprendre le rôle. La roue R, qui est très mobile, porte enroulée la bande de papier qui doit recevoir la dépêche : celle-ci passe sur un galet C, et enfin elle est entraînée entre les deux cylindres *b*, *a*. Le mouvement d'horlogerie qui fait tourner le cylindre *b* est placé dans la boîte B. Le levier qu'on aperçoit au bas de la figure sert à arrêter le mouvement d'horlogerie ou à le mettre en marche, suivant qu'on pousse ce levier à droite ou à gauche.

Ce système paraît, au premier abord, exiger une longue expérience : ceux qui l'ont manœuvré pendant quelque temps en acquièrent cependant une telle habitude, qu'il leur suffit d'écouter les mouvements du levier, pour comprendre la dépêche *au son*; la lecture de la bande n'est plus ensuite pour eux qu'une vérification.

620. **Télégraphe à cadran, de Bréguet.** — Le télégraphe à cadran, dont l'invention est due à Bréguet, est celui que les administrations des chemins de fer emploient le plus souvent pour la correspondance entre les employés des diverses stations.

*Manipulateur.* — Un disque de cuivre horizontal E (fig. 471), que l'on peut faire tourner autour de son centre à l'aide de la manivelle M, porte sur sa face inférieure une rainure sinueuse, qui est indiquée sur la figure par des traits ponctués; cette rainure offre treize sinuosités, s'éloignant et se rapprochant alternativement du centre du disque, en tout vingt-six alternatives. Dans la rainure s'engage, en *a*, une goupille métallique, fixée à l'extrémité du levier GO, qui est mobile autour du point O; lorsqu'on imprime au disque un mouvement de rotation, la goupille *a* suit les sinuosités de la rainure, qui l'éloignent

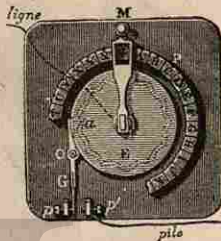


Fig. 471. — Manipulateur du télégraphe à cadran.

et la rapprochent alternativement du centre du disque; par suite, la lame flexible qui termine l'extrémité G du levier vient toucher alternativement les deux vis *p* et *p'*. Donc, si la vis *p'* communique avec le pôle positif de la pile, et le centre du disque avec la ligne (comme l'indique le trait ponctué marqué sur la figure), toutes les fois que *a* arrivera dans une sinuosité saillante, la lame viendra toucher *p'*, et le courant passera dans le disque et sur la ligne; toutes les fois que *a* arrivera dans une sinuosité rentrante, la lame viendra toucher *p*, et le courant sera interrompu. — L'extrémité de la manivelle M parcourt un cadran circulaire, portant vingt-six compartiments, dans lesquels sont gravées les lettres de l'alphabet et une *croix* conventionnelle (\*). Une fenêtre, pratiquée dans la manivelle, permet de distinguer la lettre sur laquelle elle se trouve (dans la figure, la manivelle est placée sur la *croix*).

Pour comprendre l'envoi d'une dépêche, supposons la manivelle placée d'abord sur la *croix* : le levier G est en contact avec *p*, et le courant est interrompu. Si l'on transporte la manivelle sur une lettre

(\*) Dans les appareils qui sont en usage dans les postes télégraphiques, ce cadran est une plaque métallique pleine, qui cache le disque E. Dans la figure ci-dessus, on a réduit cette plaque à son contour, pour montrer le disque E, et on en a encore enlevé une portion sur la gauche, pour rendre visible le levier GO.

de rang déterminé, le nombre total des établissements et des interruptions du courant sera égal au nombre qui exprime le rang de cette lettre. On passe ensuite aux lettres suivantes, en faisant toujours mouvoir la manivelle dans le même sens. — Un instant d'arrêt sur la croix sert à indiquer qu'on passe d'un mot à un autre.

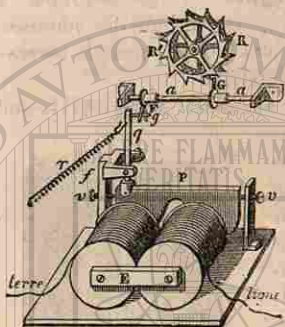


Fig. 472.

Récepteur. — La partie essentielle du récepteur est un système de deux roues dentées R, R' (fig. 472), montées sur un même axe : ce système doit reproduire tous les mouvements du disque E du manipulateur. Chacune des deux roues porte treize dents, et les dents de l'une alternent avec celles de l'autre, en sorte que l'intervalle de deux dents consécutives de ce système, qui constitue l'échappement, est égal à un vingt-sixième de circonférence. L'axe commun des deux roues de l'échappement est sollicité à se mouvoir d'une manière continue, par un mouvement d'horlogerie; mais un arrêt G, qui, par des mouvements en avant et en arrière autour de l'axe aa, peut venir buter alternativement contre une dent de la roue antérieure et contre une dent de la roue postérieure, ne laisse avancer l'échappement que par intermittences : ces intermittences sont déterminées, comme on va le voir, par les courants qui arrivent de la ligne.

L'axe aa, qui porte l'arrêt, est muni, à l'une de ses extrémités, d'une fourchette F, à cheval sur une goupille g, qui est fixée à la tige q; cette tige est portée par une palette de fer doux P, mobile autour d'un axe passant par les pointes des vis v, v, et placée en présence des pôles d'un électro-aimant E. Le fil de l'électro-aimant communique, d'une part, avec la ligne; d'autre part, avec la terre. — Or, supposons, comme nous l'avons fait pour l'envoi de la dépêche, que la manivelle du manipulateur soit placée sur la croix : le courant n'arrive pas à l'électro-aimant du récepteur; la palette P, maintenue verticale par le ressort r, met en prise l'arrêt G avec une dent de la roue postérieure de l'échappement : l'aiguille qui est fixée à l'axe de l'échappement, et qui est mobile sur un cadran situé à l'extérieur de la boîte (fig. 473), est alors placée sur la lettre A de son cadran. — Si la manivelle du manipulateur est portée sur la lettre B de son cadran, le courant arrive à l'électro-aimant ou récepteur : la palette P est attirée, la tige q est portée en arrière, et, par suite, l'arrêt G vient en avant, abandonnant la dent de la roue postérieure, pour venir arrêter au passage la dent suivante de la roue antérieure; le système des roues

a fait un vingt-sixième de tour, et l'aiguille extérieure est arrivée sur la lettre A. — De même, si la manivelle du manipulateur est portée sur la lettre B, le courant est interrompu dans l'électro-aimant du récepteur; la palette P est ramenée à sa position primitive par le ressort r, et l'arrêt G, se portant en arrière, vient heurter la dent sui-

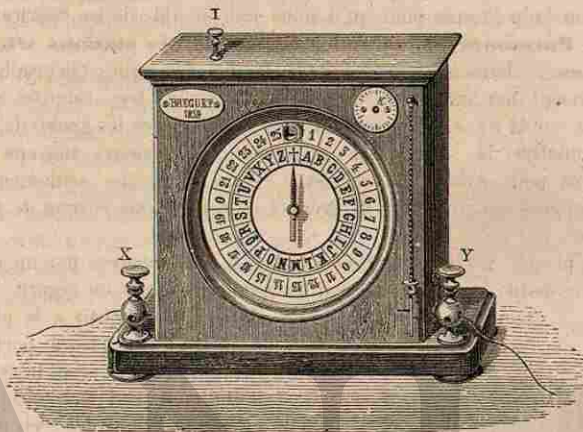


Fig. 475. — Récepteur du télégraphe à cadran.

vante de la roue postérieure; l'échappement a donc fait encore un vingt-sixième de tour, et l'aiguille est portée sur la lettre B. — En continuant ainsi, on voit que tous les mouvements effectués par la manivelle du manipulateur, au poste de départ, sont reproduits par l'aiguille du récepteur, au poste d'arrivée.

621. **Télégraphes imprimants. — Télégraphes de Hughes, de Baudot.** — Le télégraphe à cadran présente, comme on vient de le voir, le double avantage d'employer les lettres ordinaires de l'alphabet, et de pouvoir être manié sans apprentissage préalable; mais il a l'inconvénient de ne laisser aucune trace de la dépêche. — En revanche, le télégraphe de Morse (619), qui écrit lui-même la dépêche, l'écrit en caractères qui ne sont déchiffrables qu'avec une certaine habitude. — On fait usage aujourd'hui, sur la plupart des grandes lignes télégraphiques, d'appareils qui impriment les dépêches en caractères ordinaires, de sorte que la feuille imprimée peut ensuite être directement transmise à celui auquel la dépêche est destinée.

L'un des plus parfaits est le télégraphe qui a été imaginé par M. Hughes, de New-York. Le manipulateur présente extérieurement la forme d'une sorte de piano, dont les touches portent les lettres de l'alphabet, les signes de ponctuation, etc. L'expédition de la dépêche

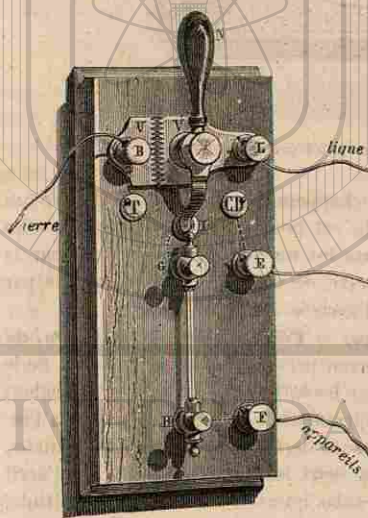
se fait avec la même célérité que l'exécution d'un morceau de musique, d'un mouvement rapide. — Le télégraphe Baudot présente une série de dispositions telles, qu'un même fil peut servir à la transmission simultanée de dépêches (jusqu'à six dépêches), envoyées par divers appareils, fonctionnant avec la même rapidité. — Mais ces appareils, qui sont de véritables merveilles de mécanisme, présentent une complication trop grande pour qu'il nous soit possible de les décrire.

622. **Paratonnerre, pour les appareils des stations télégraphiques.** — Dans les temps d'orage, les fils des lignes télégraphiques s'électrisent par influence; des courants parfois très intenses s'établissent sur la ligne, et peuvent arriver à détériorer les appareils, ou à compromettre la sûreté des employés. — Plusieurs moyens sont employés pour éviter ces accidents. Nous décrivons seulement un petit appareil construit par M. Bréguet et connu sous le nom de *paratonnerre*.

Deux plaques métalliques U et V (fig. 474) sont séparées par un intervalle très petit, et armées de pointes sur leurs bords en regard. Le fil de la ligne aboutit à la plaque V; cette même plaque porte un commutateur N, dont le ressort métallique peut à volonté être amené sur l'une des trois pièces de cuivre, en forme de *gouttes de suif* T, I, CD. Lorsque le commutateur appuie sur I, comme le suppose la figure, le courant arrivant de la ligne passe de J en G, par une communication métallique qui est indiquée sur la figure par un trait ponctué; puis de G en H, à travers un fil de fer très fin, qui est contenu dans un tube de verre; enfin de G en F et aux appareils du poste: cette position du commutateur est donc la position de *réception*.

Fig. 474. — Paratonnerre.

Si, par un temps d'orage, il se développe subitement sur la ligne un courant électrique intense, le fil de fer, en raison de son petit diamètre, est fondu, et toute communication est interceptée entre la ligne et les appareils, avant que le flux d'électricité ait acquis assez de force pour les détériorer. — Si la tension électrique sur le fil de la ligne est très considérable, une décharge se produit, par les pointes métal-



liques, de la plaque V à la plaque U qui communique avec la terre, et l'électricité se perd dans le sol (\*).

Quand on est menacé d'un violent orage, il est prudent de renoncer à la correspondance qui, d'ailleurs, deviendrait bientôt impossible. On pousse alors le commutateur sur la *goutte de suif* T, qui est en communication permanente avec la plaque U; l'électricité accumulée sur la ligne passe par le commutateur sur la plaque U, et va se perdre dans le sol.

623. **Télégraphie sous-marine. — Câbles sous-marins.** — Les conditions particulières dans lesquelles doit être établie une ligne sous-marine, exigent des dispositions spéciales, pour que le conducteur soit bien isolé de l'eau de mer, et présente une résistance suffisante aux tractions qu'il pourra éprouver.

Un *câble sous-marin*, tel que ceux qu'on emploie aujourd'hui, contient dans son axe un conducteur métallique; c'est un fil de cuivre, ou plutôt un faisceau de fils de cuivre C, exactement juxtaposés (fig. 475). La multiplicité des fils présente cet avantage que, s'il vient à se produire quelques ruptures, il y a des chances pour qu'elles ne portent pas au même endroit sur tous les fils, et pour que la transmission puisse encore s'effectuer. — Pour isoler ce conducteur de l'eau de mer, on l'entoure de gutta-percha, ou de diverses substances encore plus isolantes. Le conducteur C et son enveloppe isolante G constituent l'*âme* du câble. Enfin, l'*âme* est entourée d'une *armature* formée par une couche de fils de fer F, F, environnés chacun d'une enveloppe de chanvre, et tournés en spirale autour de l'*âme*. L'*armature* est destinée à protéger l'*âme* pendant la pose, à la garantir ensuite des frottements contre les rochers, et enfin à



Fig. 475. — Câble transatlantique (grosseur réelle).

(\*) Les bureaux qui correspondent avec deux postes situés l'un à droite, l'autre à gauche, sont munis de deux paratonnerres fixés symétriquement sur le même support. Ces deux appareils sont mis en communication permanente par un fil métallique fixé en E. Quand on veut établir la correspondance directe entre les deux postes de droite et de gauche, sans que le courant de la ligne passe par les appareils du bureau, on pousse les commutateurs N des deux paratonnerres sur les *gouttes de suif* marquées CD; par ce moyen, les fils de ligne qui pénètrent dans le bureau sont en *communication directe*.

donner de la résistance au câble, s'il vient à être accroché par les ancres des navires (\*).

624. **Récepteur de W. Thomson. — Siphon-recorder.** — L'expérience a montré que les récepteurs des divers systèmes précédemment décrits, lorsqu'ils viennent à être placés à l'extrémité d'un câble sous-marin, n'obéissent que lentement aux alternatives d'établissement et d'interruption du courant, déterminées par le manipulateur. Il a donc fallu faire usage d'autres récepteurs.

On a d'abord employé, comme récepteur, le galvanomètre de Thomson (589). Selon que, au poste de départ, l'extrémité du fil de ligne est mise en communication avec le pôle positif ou avec le pôle négatif de la pile, la déviation du miroir du récepteur se produit d'un côté ou de l'autre. On obtient ainsi

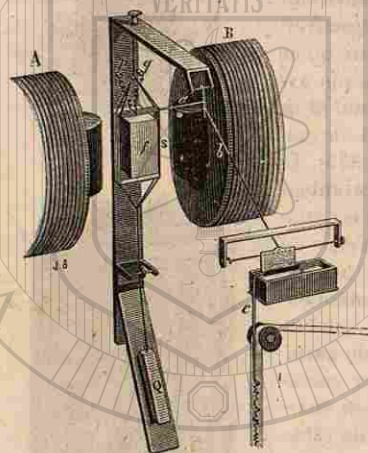


Fig. 476.

Siphon-recorder, ou enregistreur à siphon.

Plus récemment, sir William Thomson a substitué, au galvanomètre récepteur, un appareil qui laisse une trace écrite des signaux, et qui porte en anglais le nom de *siphon-recorder* ou enregistreur à siphon. C'est

(\*) Les dangers que peut courir le câble, une fois qu'il est posé, ne sont pas les mêmes pour toute sa longueur. Dans les mers profondes et à une grande distance des côtes, on n'a plus à craindre que le câble soit tirailé par les ancres des navires : il est même complètement à l'abri des frottements produits par l'agitation des flots, car on sait que, pendant les plus grandes tempêtes, il règne toujours, à partir d'une profondeur de 25 à 50 mètres, un calme absolu, contrastant avec l'agitation de la surface. On réserve donc les armatures puissantes pour les deux extrémités voisines des côtes, pour les *bouts côtiers*. Pour toute la partie intermédiaire, on diminue le diamètre des fils de fer, de manière à réduire la dépense, et à ne pas charger inutilement le navire qui doit effectuer la pose. — Le câble transatlantique posé en 1866, le plus léger de tous, eu égard à son diamètre (ce diamètre est reproduit exactement dans la figure 475), pesait encore 865 kilogrammes par kilomètre, c'est-à-dire, en tout, près de 4 millions de kilogrammes.

un galvanomètre aperiodique (595) à cadre mobile et à aimant fixe; l'aimant est ici remplacé par un électro-aimant AB (fig. 476). Le multiplicateur *s*, placé entre les pôles de l'électro-aimant, est suspendu par deux fils; à la partie inférieure du cadre est suspendue une masse *Q*, mobile sur un plan incliné au moyen duquel on règle la tension du fil. Le courant est amené dans le multiplicateur par deux spirales très flexibles, mises en communication avec les boutons *p* et *q* qui communiquent, l'un avec la ligne, l'autre avec le sol.

Quand le courant passe dans le multiplicateur, celui-ci est dévié de sa position d'équilibre, dans un sens ou dans l'autre, selon le sens du courant lancé par le manipulateur à l'autre extrémité de la ligne. Le mouvement est transmis par le fil *ab* à un tube de verre très fin et très léger, *c*, courbé en siphon; l'encre qui s'écoule par ce siphon *c* est électrisée par une petite machine électrique, non représentée sur la figure; elle est alors attirée par une bande de papier qui communique avec la terre, et qui se déroule devant l'extrémité du siphon. — Quand le multiplicateur est au repos, l'encre trace sur le papier un trait continu rectiligne. Quand le cadre est en mouvement, le trait devient sinueux : les dents à droite ou à gauche correspondent aux courants positifs ou négatifs, lancés par le manipulateur; ce sont les signaux qui correspondent aux points et aux traits du système Morse.



## CHAPITRE VIII

### COURANTS D'INDUCTION

#### I. — PHÉNOMÈNES GÉNÉRAUX.

625. **Courants d'induction.** — On a vu comment, dans les piles hydro-électriques, telles que la pile de Volta et celles qui en dérivent, l'énergie correspondante aux divers effets produits par le courant est empruntée à la chaleur dégagée par les réactions chimiques qui s'accomplissent dans la pile elle-même (535). — Dans les piles thermo-électriques, l'énergie correspondante à ces mêmes effets est empruntée à la chaleur que l'on fournit directement aux points de soudure des métaux qui composent la pile.

On appelle *courants d'induction*, des courants qui prennent naissance dans un circuit conducteur fermé, placé, soit au voisinage d'un autre circuit parcouru par un courant, soit au voisinage d'un aimant, lorsqu'on imprime, aux uns ou aux autres, des déplacements modifiant leurs distances relatives. — L'énergie correspondante à l'accomplissement des divers effets produits par ces courants d'induction est empruntée au *travail* que l'on doit dépenser pour effectuer les déplacements eux-mêmes. — Ces courants ont été découverts par Faraday, en 1850.

Nous allons d'abord constater, par l'expérience, les phénomènes fondamentaux de l'induction. — Nous diviserons cette étude en trois parties : 1° induction produite par un courant; 2° induction produite par un aimant; 3° induction produite par la Terre.

626. **Induction produite par un courant, ou induction volta-électrique.** — Soient deux bobines A et B (fig. 477), composées chacune d'un fil de cuivre couvert de soie, enroulé sur un cylindre de bois creux; pour chacune d'elles, les deux extrémités du fil se terminent par des bornes métalliques. En adaptant des fils conducteurs à ces bornes, nous pourrions placer l'une des bobines, A, dans le circuit d'une pile V; l'autre bobine, B, dans un autre circuit contenant seule-

ment un galvanomètre G. — Cette disposition permettra d'effectuer les trois expériences suivantes :

1° Avant de fermer le circuit de la pile V et de la bobine A, mettons la bobine A dans la bobine B. Au moment où nous fermerons le circuit VA, nous constaterons qu'il se développe, dans le circuit voisin BG, un courant accusé par une déviation de l'aiguille du galvanomètre. Le courant VA prend le nom de *courant inducteur*; le courant BG, le nom de *courant induit*. Le sens dans lequel se produit la déviation de l'aiguille montre que le courant induit est de sens contraire au courant inducteur. — Mais le courant induit n'a qu'une durée extrêmement

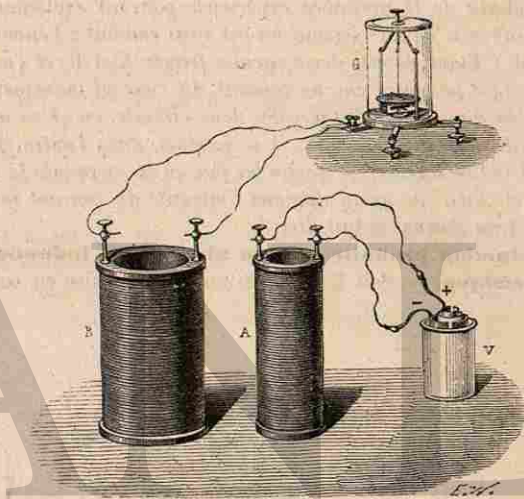


Fig. 477. — Induction produite par un courant.

courte : car l'aiguille, qui avait été brusquement écartée du zéro de la graduation, revient immédiatement sur elle-même; elle oscille régulièrement de part et d'autre du zéro, et finit par s'arrêter dans cette position, qu'elle conserve tant que le circuit inducteur reste fermé.

Si maintenant, une fois l'aiguille revenue au zéro, on vient à rompre le circuit de la pile, on observe une nouvelle déviation de l'aiguille, en sens opposé de la première. Donc, au moment de la rupture du courant inducteur, il se développe encore un courant induit, mais ce courant est de même sens que le courant inducteur.

Nous appellerons *courant induit inverse*, celui qui se produit en sens inverse du courant inducteur; *courant induit direct*, celui qui se produit dans le même sens que le courant inducteur.

2° Les deux bobines étant séparées (fig. 477), et la circuit VA étant

maintenu fermé, si l'on vient à introduire brusquement la bobine A dans la bobine B, l'aiguille du galvanomètre accuse un courant induit *inverse*. Une fois l'aiguille revenue au zéro, si l'on éloigne brusquement la bobine B, on constate un courant induit *direct*.

5° Enfin, supposons la bobine A placée dans la bobine B, et le circuit VA fermé : l'aiguille du galvanomètre étant au zéro, si l'on vient à augmenter l'intensité du courant inducteur, par exemple en diminuant la résistance sans interrompre le circuit, on observe un courant induit *inverse*. — Si l'on diminue l'intensité du courant inducteur, on observe un courant induit *direct*.

Les résultats de la première expérience pouvant évidemment être compris dans ceux de la troisième, on est ainsi conduit à l'énoncé général suivant : *Étant donnés deux circuits fermés A et B, et l'un de ces circuits A étant parcouru par un courant, dit courant inducteur, toutes les fois qu'on diminue la distance des deux circuits, ou qu'on augmente l'intensité du courant inducteur, il se produit, dans l'autre circuit B, un courant induit inverse.* — *Toutes les fois qu'on augmente la distance des deux circuits, ou qu'on diminue l'intensité du courant inducteur, il se produit un courant induit direct.*

627. **Induction produite par un aimant, ou induction magnéto-électrique.** — Soit B (fig. 478) une bobine mise en communi-

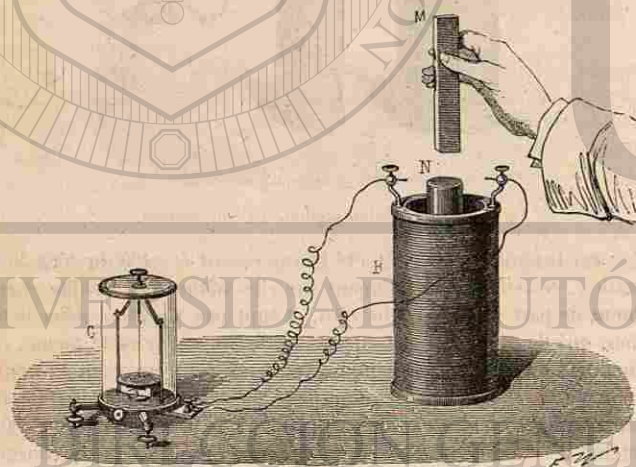


Fig. 478. — Induction produite par un aimant.

cation avec un galvanomètre G. Dans cette bobine, on place un barreau de fer doux N, et l'on approche vivement de son extrémité supérieure l'un des pôles d'un aimant M. A ce moment, le barreau N s'aimantant

par influence, l'aiguille du galvanomètre reçoit une impulsion; quant au sens du courant induit qui produit cette déviation, on peut constater qu'il est *inverse* du sens dans lequel circulent les courants particuliers (606), orientés par l'aimantation dans le fer doux N. Mais, ici encore, l'aiguille du galvanomètre revient aussitôt vers sa position primitive; lorsqu'elle a repris cette position, elle la conserve tant que le fer doux reste aimanté. — Si l'on retire l'aimant M, le magnétisme du fer doux N disparaît, et l'aiguille accuse un courant induit *direct*, c'est-à-dire de même sens que les courants particuliers.

De même, si, après avoir enlevé de la bobine le barreau N, on y introduit brusquement l'aimant, il se produit un courant *inverse*. — Si l'on retire l'aimant, il se produit un courant *direct*.

De là, la conclusion suivante : *Si l'on fait naître l'aimantation dans un corps magnétique placé au milieu d'un circuit fermé, ou si l'on approche un aimant de ce circuit, il se produit un courant d'induction, dont le sens est inverse de celui des courants particuliers de l'aimant.* — *Si l'aimant inducteur perd son magnétisme, ou si l'on éloigne cet aimant, il se produit un courant d'induction direct.*

628. **Emploi du fer doux comme moyen d'augmenter l'induction volta-électrique.** — Supposons que, dans une bobine B dont le fil communique avec un galvanomètre, on place une bobine A (fig. 479), et, à l'intérieur de celle-ci, un barreau de fer doux D : à

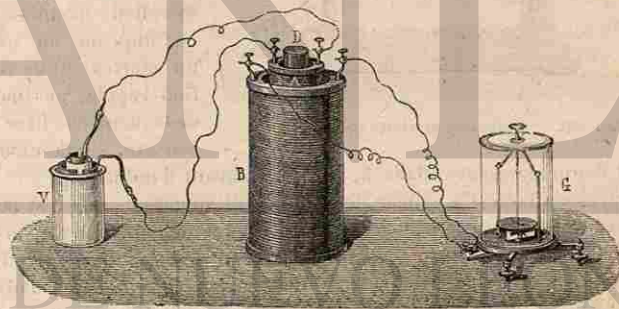


Fig. 479. — Emploi du fer doux, pour augmenter l'induction volta-électrique. (R)

l'instant où l'on établit la communication entre la bobine A et la pile V, il se produit dans le fil A un courant d'induction volta-électrique, qui est inverse du courant inducteur (626, 1°). Mais, en même temps, le fer doux s'aimante, comme le noyau d'un électro-aimant, et ses courants particuliers sont de même sens que ceux de la bobine A; ce magnétisme naissant développe, dans le fil B, un courant d'induction magnéto-électrique, dont le sens est inverse de celui des courants particuliers (627). — Donc, dans le fil B, le courant volta-électrique et le

courant magnéto-électrique sont de même sens, et, comme ils se produisent au même instant, leurs intensités s'ajoutent : on constate, en effet, que la déviation de l'aiguille du galvanomètre est beaucoup plus grande.

L'expérience montre qu'un *faisceau de fils* de fer, substitué au barreau D, renforce le courant induit plus énergiquement encore que ne fait un barreau unique de même diamètre.

**629. Induction produite par la Terre, ou induction telluro-électrique.** — On sait que l'action de la Terre est assimilable, soit à l'action d'un *aimant*, dirigé du nord au sud (495), soit à l'action d'un *courant*, dirigé de l'est à l'ouest (602). — Dès lors, si l'on prend un circuit fermé, et si on lui imprime un déplacement rapide par rapport à la direction de l'aimant terrestre, il doit y avoir, dans ce circuit, production d'un courant induit. — C'est ce qu'on vérifie de la manière suivante.

Un cadre circulaire MN (fig. 480), mobile autour d'un axe horizontal AB, porte un fil conducteur couvert de soie et enroulé un grand nombre de fois sur ce cadre. L'axe AB étant placé perpendiculairement au méridien magnétique, on imprime au cadre un mouvement de rotation rapide, au moyen de la manivelle fixée sur son axe. — Ce mou-

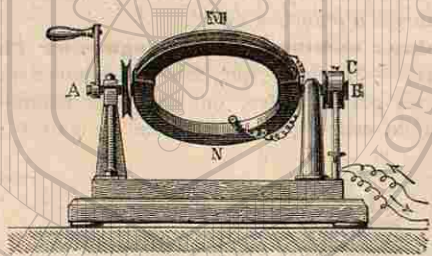


Fig. 480. — Induction produite par la Terre.

vement donne naissance, dans le fil, à un courant d'induction.

Supposons l'ouest à gauche de la figure, et supposons que N se porte en arrière du plan vertical, vers le nord, tandis que M se porte vers le sud. La partie N du cadre s'éloigne du courant terrestre, dirigé de l'est à l'ouest : il se produit donc en N un courant induit *direct*, dans le sens BNA. En même temps, la partie M se rapproche du courant terrestre : le courant induit en M est un courant *inverse*, dans le sens AMC. Ces deux courants induits concordent, suivant BNAMC. — Mais, au bout d'une demi-révolution, N vient prendre la place de M, et le courant induit se produit dans le sens BMNC ; il change donc de sens dans le fil du cadre, et il en est ainsi, alternativement, à chaque demi-révolution. — Les deux extrémités de ce fil aboutissent à un *commutateur* C, placé sur l'axe, et sur lequel s'appuient deux ressorts communiquant respectivement avec les deux bornes d'un galvanomètre : le commutateur a pour effet de donner aux courants d'induction une direction *constante* dans le galvanomètre. On constate alors que l'aiguille

du galvanomètre est déviée d'un angle d'autant plus grand que la rotation est plus rapide.

**630. Loi de Lenz. — Dépense d'énergie correspondante à la production des courants d'induction.** — On a vu, dans l'étude de l'électro-dynamique et de l'électro-magnétisme, que, lorsqu'on soumet un courant mobile à l'action d'un autre courant ou à l'action d'un aimant fixe, ses diverses parties éprouvent des attractions ou des répulsions, qui peuvent avoir pour effet de lui imprimer des mouvements de telle ou telle nature, suivant la manière dont il est lui-même assujéti. — Or, tous les phénomènes d'*induction* peuvent être compris dans la loi générale suivante, qui a été énoncée par le physicien russe Lenz :

Étant donné un circuit fermé, si l'on vient à déplacer, d'une manière quelconque, ce circuit par rapport à un courant voisin, ou par rapport à un aimant, *le sens du courant induit est tel, que ce courant tende à s'opposer au mouvement qui le produit* (\*). — Si l'on se reporte, en effet, aux divers résultats des expériences que nous venons de décrire, il est facile de s'assurer que chacun d'eux satisfait à la loi de Lenz.

Mais la loi de Lenz n'a pas seulement l'avantage de relier entre eux, par un même énoncé, les divers phénomènes d'induction. Elle rend manifeste la nécessité de l'intervention d'une *source d'énergie*, pour la production des courants d'induction eux-mêmes. — Considérons, par exemple, un circuit fermé, que l'on mettra en mouvement de manière à le rapprocher d'un courant voisin, ou d'un aimant. Tant que durera ce rapprochement, il se produira un courant induit, dont le sens sera tel, qu'il tende à s'opposer au rapprochement lui-même : dès lors, le travail nécessaire à l'accomplissement de ce mouvement sera plus grand que si le même circuit avait subi le même déplacement sans éprouver aucune influence électrique ou magnétique. — En d'autres termes, le développement des courants d'induction exige toujours une *dépense d'énergie* : cette énergie est précisément celle qui doit être employée à l'accomplissement des divers effets produits par les courants eux-mêmes.

L'expérience suivante, qui est due à Foucault, permet de mettre en évidence cette dépense d'énergie. — Entre les pièces de fer doux A et B, qui forment les armatures d'un électro-aimant EE (fig. 481), passe librement un disque de cuivre D, que l'on peut faire tourner autour de son axe, au moyen d'un système de roues dentées, et d'une manivelle qui n'est pas représentée sur la figure. Tant que l'électro-aimant n'est pas aimanté, il suffit d'un effort assez faible pour imprimer au disque un mouvement de rotation très rapide. — Mais si, au moment où le

(\*) Nous avons vu (595) que dans les galvanomètres, les oscillations de l'aiguille aimantée sont amorties par la réaction électro-magnétique des courants induits qui prennent naissance dans le cadre du multiplicateur.

disque est animé d'une grande vitesse, on vient à faire passer dans le fil de l'électro-aimant le courant de quelques éléments de Bunsen, on constate que le disque est brusquement arrêté : cet arrêt est dû à la

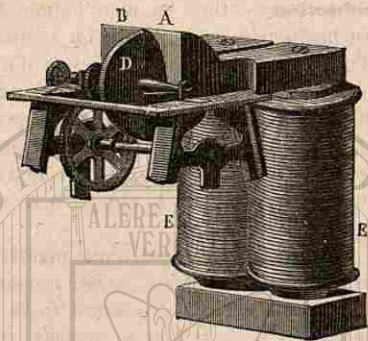


Fig. 481. — Expérience de Foucault.

résistance développée par les courants induits, qui se sont produits dans le disque lui-même. — Enfin, si l'on veut alors continuer à faire tourner le disque, on ne parvient à lui imprimer qu'un mouvement de rotation beaucoup plus lent, même avec un effort considérable. Cette dépense d'énergie se traduit ici par un *dégagement de chaleur*, dû aux courants induits qui continuent à circuler dans le disque pendant la rotation. Le dégagement de chaleur est bientôt assez considérable pour produire, dans la masse de cuivre, une élévation de température que l'on peut constater en y appliquant la main. On peut également y appliquer un morceau de cire mélangée de stéarine, qui entre en fusion au contact du métal échauffé (\*).

On peut donc dire, en résumé, que la production des courants d'induction constitue un mode de transformation de l'énergie mécanique en électricité. Dans les effets produits par ces courants, se retrouve, soit sous forme de chaleur, soit sous toute autre forme, l'équivalent de l'énergie dépensée.

651. **Comparaison des deux courants induits, direct et inverse.** — Dans toutes les expériences qui précèdent, il faut, pour observer la production des courants induits, imprimer des déplacements rapides aux conducteurs dans lesquels ils prennent naissance; les courants induits cessant à peu près instantanément avec ces déplacements eux-mêmes (626), la durée  $\theta$  d'un courant induit est toujours une petite fraction de seconde.

Il en résulte que l'on ne peut pas comparer les *intensités* de deux courants induits par le procédé ordinaire du galvanomètre. — En effet, quand on fait passer dans un galvanomètre un courant dont la durée  $\theta$  est assez petite pour que l'aiguille soit encore sensiblement au zéro à l'instant où le courant cesse, l'impulsion donnée à l'aiguille est à la fois proportionnelle à l'intensité  $i$  et à la durée  $\theta$  du courant;

(\*) On peut encore opérer avec un disque présentant une petite cavité que l'on remplit d'éther et qu'on ferme avec un bouchon. La force élastique de la vapeur d'éther chasse le bouchon avec explosion.

c'est-à-dire que, dans ce cas, la déviation observée, au lieu de mesurer l'intensité  $i$  du courant, mesure le produit  $i\theta$ , qui représente la *quantité d'électricité* mise en mouvement pendant la durée du courant. — Or, dans les expériences décrites précédemment (626 et 627), on obtient toujours, pour le courant direct, et pour le courant inverse, des déviations *égales et contraires* de l'aiguille du galvanomètre. On doit en conclure que les quantités d'électricité mises en mouvement, dans ces deux courants induits, sont égales entre elles; c'est ce que l'on énonce souvent en disant que *les deux courants, direct et inverse, sont égaux en quantité*.

Mais il n'en est pas de même des *intensités*. — Pour le vérifier grossièrement, il suffit de faire communiquer les deux extrémités du fil induit avec deux poignées métalliques, que l'on tient dans les mains. On éprouve, chaque fois qu'il se développe un courant induit, une commotion comparable à celle que donnerait le courant d'une pile d'un grand nombre d'éléments; mais on observe que la commotion la plus forte est toujours celle qui est produite par le courant direct. — C'est donc le courant direct qui a la *plus grande intensité*, et par suite la *plus petite durée*.

652. **Induction d'un courant sur lui-même. Extra-courants.** — On a vu (626, 1°) que lorsqu'un courant parcourt un circuit, et qu'on vient à rompre ou à rétablir ce circuit, il y a production d'un courant induit, dans tout circuit fermé, voisin du premier. — Il est naturel de penser que chacun des éléments d'un courant doit aussi exercer une action inductrice sur les éléments voisins qui font partie de son propre circuit : cette action doit être surtout sensible, si le circuit est enroulé sur lui-même, de manière que chacun de ses éléments ait dans son voisinage un grand nombre d'autres éléments. C'est la disposition adoptée dans les deux expériences suivantes, qui sont dues à Faraday. — Ces courants, ont reçu le nom d'*extra-courants*, ou de courants de *self-induction*.

1° On fait passer le courant d'une pile PN (fig. 482) dans un long fil métallique, que l'on enroule en une hélice C dans une grande partie de sa longueur : on réunit deux de ses points D, E, situés de part et d'autre de l'hélice, par un fil de dérivation, sur le trajet duquel est interposé un galvanomètre G. Le courant de la pile se partage ainsi entre les deux branches de dérivation, DCE, DGE, qu'il parcourt dans le sens des flèches indiquées sur la figure; si  $mn$  est la direction du diamètre passant par le zéro du galvanomètre, on voit le pôle austral de l'aiguille venir, sous l'action du courant, à droite de  $mn$ , en  $a$  par exemple. On ramène alors, avec la main, l'aiguille dans la direction  $am$  et l'on place sur le cadran un petit obstacle  $d$  à la droite du point  $m$ , de manière à empêcher l'aiguille de s'écarter de ce côté. — Les choses étant ainsi disposées, si l'on interrompt le courant au voisinage de la pile, en A

par exemple, le pôle austral reçoit une vive impulsion à gauche, après laquelle l'aiguille revient au zéro. Donc, au moment de la rupture du courant de la pile, le circuit fermé DGECD a été parcouru par un courant, et ce courant avait, dans la portion DGE, un sens contraire à celui du courant de la pile; par suite, avait, dans l'hélice C, le même sens que

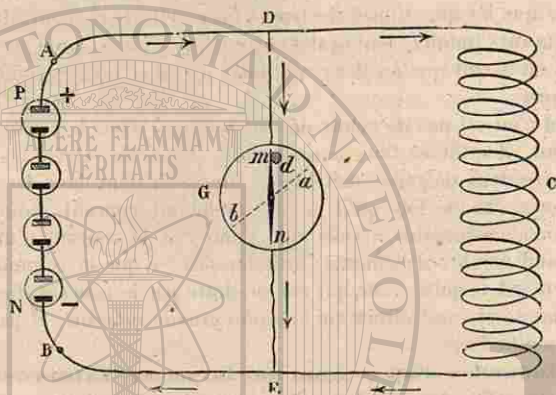


Fig. 482. — Démonstration de l'extra-courant de rupture.

le courant de la pile. — C'est là, comme on l'a vu (626, 1°), le caractère général du courant induit dû à l'interruption d'un courant inducteur : c'est l'extra-courant de rupture.

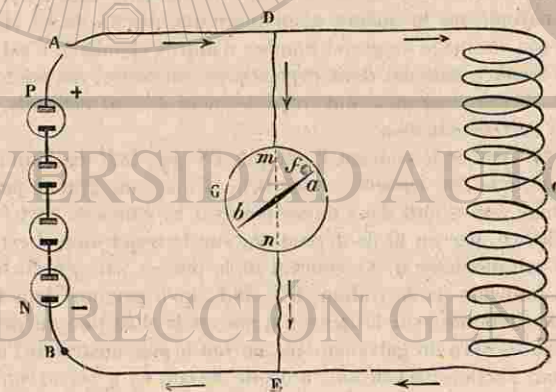


Fig. 485. — Démonstration de l'extra-courant de fermeture.

2° On détermine, par une expérience préliminaire, la position *ab* (fig. 485) que prend l'aiguille du galvanomètre sous l'action du courant

de la pile, et l'on place sur le cadran un petit obstacle *f* à la gauche du point *a*, de manière à empêcher l'aiguille de revenir au zéro quand on interrompra le courant en A. — Les choses étant ainsi disposées, et le circuit de la pile étant ouvert au point A, on constate que, à l'instant où l'on referme le circuit en A, le pôle austral de l'aiguille reçoit une vive impulsion à droite, après laquelle il revient en *a*. Donc, au moment de la fermeture du circuit, le fil DGE n'a pas été seulement parcouru par une portion du courant de la pile, ayant une intensité telle qu'elle amenât l'aiguille en *ab*; mais à ce courant s'en est ajouté un autre, d'une durée très courte, ayant le même sens dans la partie DGE, et ayant, par conséquent, dans l'hélice C, un sens contraire à celui du courant de la pile. — C'est le caractère général d'un courant induit dû à la fermeture du courant inducteur : c'est l'extra-courant de fermeture.

655. **Conséquences de la superposition des extra-courants et du courant principal.** — L'extra-courant de fermeture, qui se produit au moment où l'on complète le circuit d'une pile, est, comme on vient de le voir, de sens contraire au courant principal. En se superposant au courant principal, il a donc pour effet d'en diminuer l'intensité, dans les premiers instants : par suite, le courant de la pile n'acquiert que *graduellement* son régime régulier.

Au contraire, l'extra-courant de rupture est de même sens que le courant principal; en se superposant à ce courant, il doit donc en *augmenter brusquement* l'intensité. — C'est ce que prouvent diverses expériences : il suffira d'en indiquer quelques-unes.

La rupture du circuit d'une pile formée d'une dizaine d'éléments de Bunsen, lorsque le conducteur interpolaire n'est pas replié sur lui-même, donne naissance à une faible étincelle. Au contraire, si l'on interpose dans le circuit une bobine portant un fil enroulé un grand nombre de fois, l'étincelle de rupture éclate avec un bruit comparable à celui d'une capsule fulminante. Cependant, la résistance introduite par la bobine ne peut que diminuer l'intensité du courant de la pile, à l'état permanent; l'effet qui se produit ici doit donc être attribué à la superposition d'un extra-courant très intense, au moment de la rupture.

Lorsque le circuit d'une pile contient une bobine, et que, prenant dans les mains les deux extrémités du fil de cette bobine, on les détache vivement de la pile, de manière que l'hélice forme alors avec le corps de l'opérateur un circuit fermé, on ressent une commotion violente. L'intensité de cette commotion est encore beaucoup augmentée, si l'on introduit dans la bobine un faisceau de fils de fer doux. — On reconnaît, dans ces effets, ceux qui caractérisent les courants induits en général : ils sont dus à l'extra-courant de rupture, qui vient s'ajouter brusquement au courant de la pile.

## II. — BOBINE D'INDUCTION.

654. **Bobine de Ruhmkorff.** — La bobine de Ruhmkorff est un appareil dans lequel les courants induits sont produits par les alternatives de rupture et de rétablissement d'un courant inducteur, à des intervalles de temps très courts. — La première idée de cet appareil est due à Masson; les détails de construction ont été réalisés par Ruhmkorff, vers 1851.

Sur un cylindre de bois, on a enroulé d'abord un fil *inducteur*, dans lequel devra passer le courant d'une pile: par-dessus on a enroulé ensuite un fil beaucoup plus long et plus fin, qui constituera le circuit *induit*, le tout forme une grosse bobine S (fig. 484), terminée par deux

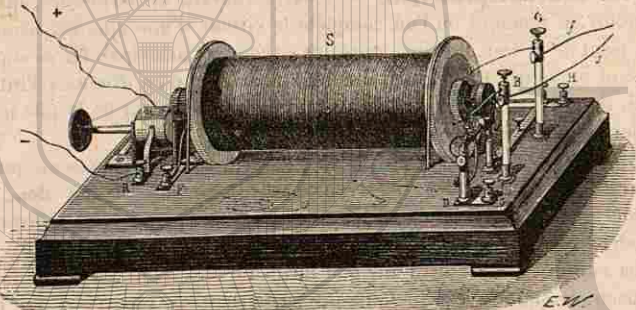


Fig. 484. — Bobine de Ruhmkorff.

disques de verre. — Dans l'intérieur de cette bobine est placé un faisceau de fils de fer doux, qui s'aimantera sous l'action du courant inducteur chaque fois que ce courant sera établi, et qui perdra son aimantation chaque fois que ce courant sera interrompu. Ce faisceau de fils de fer doux aura donc pour effet d'augmenter les effets d'induction produits par le courant de la pile, comme il a été dit (628). — On a représenté, sur la gauche de la figure, marqués des signes + et —, les conducteurs qui mettent la pile en communication avec le fil *inducteur*. Le courant arrive en R' dans un *commutateur*, dont la position est telle, que le courant passe en E et arrive par une bande métallique fixée sur le socle de l'appareil (fig. 485) au point I. Le courant passe ensuite dans un *interrupteur*, qui est représenté à droite dans la figure 484; la figure 486 en indique les détails, à une échelle un peu plus grande. — L'interrupteur se compose d'un petit marteau dont la tête O, qui est en fer doux, est placée à une petite distance au-dessous de l'extré-

mité du faisceau de fils de fer qui forme le noyau de la bobine, et qui dépasse le disque de verre, comme le montre la figure 484; le manche

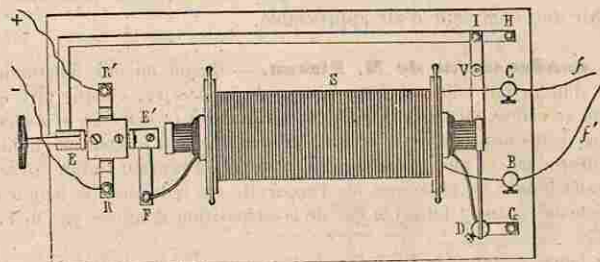
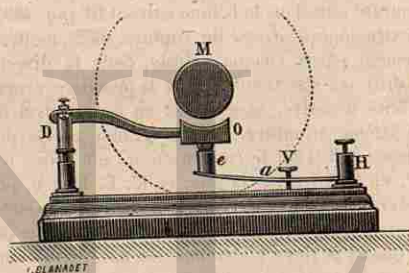


Fig. 485.

du marteau, qui est en cuivre, est articulé à la partie supérieure de la colonne métallique D (fig. 486); au-dessous de la tête du marteau est

une sorte de petite enclume e, formée par un cylindre de cuivre vertical qui est supporté par une lame métallique. — Le courant, après avoir suivi l'enclume e et le marteau O, passe de D dans la bobine inductrice (fig. 485), sort par le fil qui aboutit à la borne F, et retourne à la pile après avoir traversé le commutateur.

Fig. 486.  
Interrupteur de la bobine de Ruhmkorff.

Voici maintenant comment fonctionne l'*interrupteur*. — Dès que, par le jeu du commutateur (note de la page 503), le courant inducteur est établi, le faisceau de fer s'aimante, attire la tête O du marteau, lui fait abandonner l'enclume, et le circuit inducteur est interrompu: le faisceau de fils de fer n'étant plus aimanté, le marteau retombe par son poids, et le courant est rétabli. Ces alternatives se reproduisent indéfiniment. — A chaque *rupture* du courant inducteur, il se développe dans le fil induit un courant *direct*; à chaque *rétablissement* du courant inducteur, un courant induit *inverse*.

Les extrémités du fil induit traversent le disque de verre de droite, et viennent aboutir aux bornes métalliques B et C. Si l'on réunit les fils f et f' par un conducteur, on obtiendra, dans ce circuit, une série de courants dirigés alternativement dans un sens et dans l'autre. — Lorsqu'on laisse un petit intervalle entre les extrémités libres des fils f et f', on peut faire éclater entre eux une série continue d'étin-

celles. Poggendorff a montré que ces étincelles sont dues exclusivement au courant *direct*, produit au moment de la *rupture* du courant inducteur : le courant inverse n'a pas une intensité suffisante pour franchir une épaisseur d'air appréciable.

655. **Condensateur de M. Fizeau.** — Quand on fait fonctionner la bobine d'induction telle que nous venons de la décrire, chaque fois que le marteau se relève, on voit jaillir une étincelle entre le marteau et l'enclume. Or, plus cette étincelle sera courte, plus rapidement le courant inducteur sera interrompu, et plus grande sera l'intensité du courant induit direct. On augmentera donc la puissance de l'appareil, en réduisant la longueur de l'étincelle de rupture; tel est le but de la disposition imaginée par M. Fizeau en 1855.

Deux lames d'étain, de 4 mètres de longueur, séparées par une lame isolante de taffetas ciré, sont plusieurs fois repliées sur elles-mêmes, et forment un *condensateur*, à grande surface, qui est logé dans le socle de l'appareil (fig. 484). Les deux armatures communiquent, la première avec l'extrémité F du fil inducteur, la seconde avec l'extrémité D. Supposons encore que le courant aille dans la bobine suivant DF (fig. 485) : au moment de l'interruption, l'extra-courant *direct* de rupture (652) mettra l'électricité positive en mouvement, dans chaque spirale, dans la direction générale DF, et le fluide positif ira s'accumuler dans la première armature du condensateur; l'électricité négative, se mouvant en sens contraire, viendra s'accumuler dans la deuxième armature. La plus grande partie de l'extra-courant est donc employée à charger le condensateur; une faible fraction seulement passe de F en E', en R, à travers la pile, en R', E, H et D, et franchit, sous la forme d'une *très courte étincelle*, l'intervalle d'air qui existe entre l'enclume et le marteau : l'interruption du courant inducteur est donc presque instantanée.

Quand la *force électromotrice* de l'extra-courant n'agit plus, les fluides de noms contraires, répartis sur les deux armatures, se recombinaient à travers le fil inducteur, en donnant un courant dont le sens général est FD; ce courant *secondaire* aura pour effet de désaimanter instantanément le faisceau de fer doux, et de supprimer le magnétisme rémanent. Le condensateur de M. Fizeau rend donc plus rapides et plus régulières les oscillations de l'interrupteur.

656. **Interrupteur de Foucault.** — L'interrupteur à marteau, que nous avons décrit (fig. 486), ne peut pas être employé avec les bobines de grandes dimensions, actionnées par des courants inducteurs intenses. On constate en effet que, dans ces conditions, malgré l'emploi du condensateur de M. Fizeau, l'étincelle qui se produit au moment où le marteau abandonne l'enclume, est assez forte pour produire un arrachement des particules de platine; les surfaces de l'enclume et du marteau sont rapidement détériorées. — On emploie alors l'*interrupteur de Foucault* (fig. 487).

Deux pointes de platine verticales T, S, sont fixées vers l'une des extrémités du levier TF, qui est supporté en E par une lame élastique verticale : ces deux pointes pénètrent dans deux godets qui contiennent du mercure, couvert d'une couche d'alcool. A l'autre extrémité du levier est une armature de fer F, placée à une petite distance d'un électro-aimant. Le fil de cet électro-aimant communique, par l'une de ses extrémités Q, avec le pôle

positif d'une petite pile spéciale, formée d'un ou deux éléments de Bunsen; par son autre extrémité, avec la pointe S, par l'intermédiaire de la lame élastique qui porte le levier; le godet S communique, par le fil P, avec le pôle négatif de la même pile.

Le godet T et le levier lui-même sont introduits dans le circuit *inducteur* de la bobine de Ruhmkorff, par les fils A et N. — Dès que le circuit de la pile spéciale de l'interrupteur est fermé, l'armature F est attirée par l'électro-aimant, en sorte que l'extrémité T du levier, en se relevant, fait sortir du mercure les deux pointes, et interrompt les deux circuits; mais, l'électro-aimant ayant alors perdu son aimantation, le levier est ramené en sens contraire par l'élasticité de la lame qui le supporte : les deux circuits sont de nouveau fermés, et ainsi de suite. — L'alcool étant très mauvais conducteur, l'interruption du circuit inducteur de la bobine est instantanée, et par suite l'intensité des courants induits est aussi grande que possible.

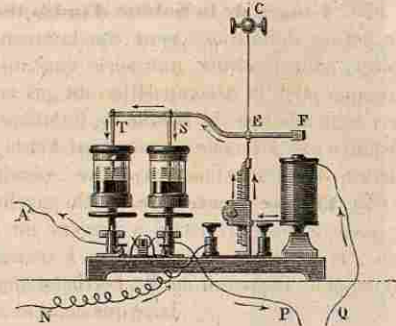


Fig. 487. — Interrupteur de Foucault.

657. **Fractionnement de la bobine induite.** — Supposons que l'on fasse fonctionner la bobine d'induction, sans réunir les extrémités des fils *f* et *f'*; à chaque interruption du courant inducteur, il s'établira entre les extrémités *f* et *f'* une différence de potentiel *V*, qui sera d'autant plus grande que le fil induit sera plus long, et que le courant inducteur sera plus intense. De l'extrémité *f* à l'extrémité *f'*, le potentiel croîtra progressivement avec la longueur de fil parcourue; par suite, la différence de potentiel en deux points contigus appartenant à deux spires superposées, dépendra de la longueur de fil parcourue par le courant, pour aller d'un de ces points à l'autre; on conçoit donc que, pour un même courant inducteur, cette différence de potentiel puisse être d'autant plus grande que la bobine sera plus longue; si l'intensité du courant inducteur dépasse une certaine limite, une décharge tendra à se produire entre ces deux points, qui ne sont séparés que par une mince couche isolante : la couche isolante sera percée. — Pour atténuer cette cause de détérioration, Poggendorff a proposé de fractionner la bobine induite en un certain nombre de bobines partielles, quatre par exemple. On peut alors employer un courant inducteur d'une intensité quatre fois plus grande, sans courir de plus grandes chances de rupture.

658. **Dimensions du fil inducteur et du fil induit.** — Toutes choses égales d'ailleurs, l'intensité du courant induit augmente avec la longueur du fil induit : dans les bobines de grandes dimensions, la longueur de ce fil peut atteindre 120 000 mètres; son diamètre est d'environ un cinquième de millimètre.

Le fil inducteur est beaucoup moins long. Nous avons démontré (614) que, pour obtenir le maximum d'intensité, il faut donner à la bobine inductrice

une résistance égale à celle de la pile. — Le diamètre du fil varie de 2 millimètres à 2<sup>mm</sup>,5; sa longueur varie de 40 à 50 mètres.

**639. Usages de la bobine d'induction.** — Les bobines d'induction de petites dimensions sont constamment employées dans les laboratoires, pour produire une série continue d'étincelles électriques, par exemple pour la décomposition du gaz ammoniac (fig. 540). — On se sert également de la bobine de Ruhmkorff pour faire jaillir à grande distance une étincelle à un instant donné, et déterminer ainsi l'inflammation d'une substance explosive : poudre, fulmi-coton (\*), etc.

**640. Effluve électrique.** — On appelle *effluve*, ou *décharge obscure*, le passage de l'électricité à travers un gaz, sans production d'étincelle. Pour faire passer l'effluve à travers un gaz tel que l'oxygène, on emploie l'appareil de M. Berthelot (fig. 488). Dans l'espace annulaire que laissent entre eux deux tubes de verre concentriques *h* et *k*, soudés l'un à l'autre en *e*, on fait passer lentement un courant d'oxygène : le gaz entre par le tube *b*, et sort par le tube *a*. Les deux pôles de la bobine d'induction communiquent, par des fils de platine *f*, *f'*, avec deux masses d'eau acidulée, *cc'*, *dd'*, contenues, l'une dans le tube *h*, l'autre dans l'éprouvette à pied *V*. Quand la bobine fonctionne, la couche d'eau acidulée qui est au contact de la paroi intérieure du tube *h*, et celle qui est au contact de la paroi extérieure du tube *k*, sont chargées d'électricités contraires : mais, selon que le courant induit est direct ou inverse, chacune de ces électrodes est alternativement positive ou négative ; par suite, sur chacune des molécules du gaz interposé, les fluides positif et négatif se portent en sens inverse, tantôt d'un côté, tantôt de l'autre ; on comprend que, de ces mouvements, puisse résulter un accroissement de l'énergie du gaz. — Quand on fait l'expérience dans l'obscurité, on observe une lueur continue dans l'espace compris entre les deux tubes *h* et *k*. — Lorsque l'oxygène a été soumis ainsi à l'action de l'effluve électrique, on constate qu'une partie plus ou moins considérable du gaz s'est transformée en *ozone*.

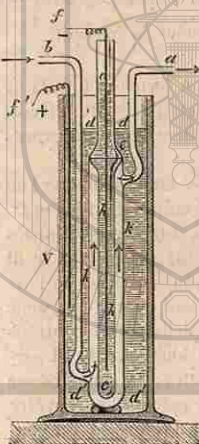


Fig. 488.  
Effluve à travers un gaz.

(\*) La bobine d'induction peut encore être employée pour charger une batterie : on relie les deux pôles *f* et *f'* de la bobine aux deux armatures de la batterie, en ayant soin de ménager, sur l'un des fils de communication, une petite *distance explosive*, qui interceptera le courant inverse (634). — Avec une bobine de grandes dimensions, on peut, en quelques secondes, charger une batterie de très grande surface.

**641. Tubes de Geissler.** — Lorsque les extrémités du fil induit d'une bobine de Ruhmkorff sont placées dans un espace contenant un gaz raréfié, on observe, à chaque décharge, des lueurs qui remplissent une partie de cet espace. Si la raréfaction est poussée suffisamment loin, il se produit, entre les extrémités des fils, une succession de couches alternativement brillantes et obscures, qui ont reçu le nom de *stratifications*.

Pour obtenir ces effets, on emploie généralement des tubes de verre qui sont désignés sous le nom de *tubes de Geissler*. — On leur donne les formes les plus diverses : la figure 489 représente l'une des plus simples. — Aux deux extrémités A et B du tube sont soudés des fils métalliques, auxquels on attache les extrémités du fil induit de la bobine. Après avoir poussé très loin la raréfaction du gaz, on a fermé le tube à la lampe : on peut alors le faire servir à un nombre indéfini d'expériences. — Le fil A, qui communique avec celui des conducteurs qui est positif pour les courants induits directs, présente, à son extrémité, un point très brillant ; on observe des stratifications dans toute l'étendue du tube large qui contient ce fil. Le fil B, qui communique avec le conducteur négatif, est entouré d'une gaine lumineuse, et les stratifications s'arrêtent à une certaine distance de son extrémité. La partie étroite C n'offre généralement pas de stratifications, mais une lumière vive, dont la couleur dépend de la nature du gaz contenu dans l'appareil. — Certains tubes de Geissler présentent des parties formées de différents verres qui acquièrent, par *fluorescence*, des teintes diverses au moment du passage du courant. On obtient ainsi des effets lumineux d'une grande beauté. — Les tubes comme celui de la figure 489 sont particulièrement employés pour l'étude spectrale, comme on le verra plus loin (811).

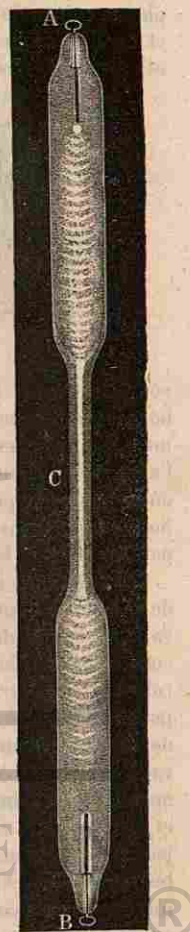


Fig. 489.  
Tube de Geissler.

**642. Téléphone de Bell.** — L'une des applications les plus remarquables des courants électriques est celle qui a conduit à l'invention du *téléphone*, pour la transmission des sons ou de la parole à de grandes distances.



Le téléphone imaginé en Amérique par M. Bell se compose d'une plaque mince de fer M (fig. 490), placée au fond d'une embouchure E, et derrière laquelle est fixée une tige d'acier aimantée A. Sur cette tige est assujettie une bobine B, sur laquelle est enroulé un fil métallique

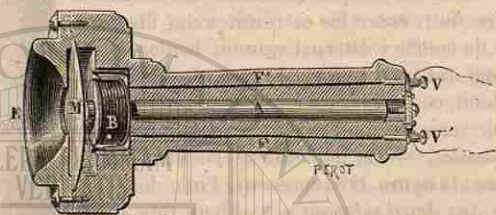


Fig. 490. — Téléphone de Bell.

couvert de soie : les deux bouts de ce fil, F, F', viennent aboutir à deux bornes métalliques V, V', fixées à l'étui de bois qui contient tout l'instrument. — Dans ces bornes, on assujettit des fils conducteurs, qui mettent l'appareil en communication avec un appareil identique, placé au point où se trouve la personne avec laquelle on doit entrer en conversation. Nous supposons que les pièces de ce second appareil soient désignées par les mêmes lettres, affectées de l'indice 1.

Celui des deux interlocuteurs qui prend le premier la parole approche de sa bouche l'embouchure E de l'appareil qu'il tient à la main, et qui va jouer le rôle de *transmetteur* de la voix. L'autre personne applique contre son oreille l'embouchure E<sub>1</sub> de l'autre appareil, qui va jouer le rôle de *récepteur*. — Les impulsions communiquées par la voix, à la petite plaque de fer M du *transmetteur*, déterminent une succession de rapprochements et d'éloignements alternatifs de cette plaque par rapport à l'extrémité de l'aimant. A chaque rapprochement, il y a accroissement du magnétisme développé par influence dans la plaque, et, par réaction, accroissement du magnétisme de l'aimant A lui-même : par suite, production d'un courant électrique *induit* dans le fil de la bobine B (627). A chaque éloignement, il se produit encore un courant induit, de sens contraire au premier et ainsi de suite. — Ces courants, en traversant la bobine B<sub>1</sub> du *récepteur*, augmentent ou diminuent alternativement le magnétisme de son aimant A<sub>1</sub> : ils ont donc pour effet de déterminer des rapprochements ou des éloignements alternatifs de la plaque de fer M<sub>1</sub> par rapport à cet aimant, en sorte que les mouvements de cette plaque reproduisent ceux de la plaque du *transmetteur*. L'air de l'embouchure E<sub>1</sub> est ainsi mis en vibration, et communique le son à l'oreille de celui qui écoute.

Chacun des deux appareils peut fonctionner alternativement comme *transmetteur* ou comme *récepteur*.

645. **Combinaison du téléphone et du microphone.** — Dans la disposition précédente, les courants induits étant très faibles, le son est toujours peu intense au point d'arrivée. — L'invention du *microphone*, qui est due encore à un physicien américain, M. Hughes, a fait faire à la question un progrès considérable. Voici la disposition, d'une simplicité merveilleuse, qu'il a d'abord imaginée.

Deux petites pièces de charbon de cornue sont fixées en C et C' sur une planche de bois MN (fig. 491) ; entre elles est placée une sorte de crayon du même charbon A, dont les deux pointes sont reçues dans de petites cavités, de manière qu'il appuie légèrement sur chacune d'elles. On fait passer dans l'appareil le *courant d'une pile*, dont le circuit est mis en communication avec la bobine d'un téléphone, placé à une grande distance. — C'est la succession des pièces de charbon qui constitue le *microphone*. Le microphone va jouer le rôle de *transmetteur* ; le téléphone fonctionnera ici exclusivement comme *récepteur*.

Dès qu'on produit un son dans le voisinage du microphone, les vibrations sonores suffisent pour modifier les contacts du crayon A avec ses supports, et pour faire subir au courant de la pile des variations qui modifient le magnétisme de l'aimant du téléphone, et qui mettent ainsi sa plaque de fer en mouvement.

644. **Système Ader.** — Un très grand nombre de modifications ont été apportées, soit au microphone transmetteur, soit au téléphone récepteur. — Nous nous contenterons de décrire sommairement le système qui a été imaginé par M. Ader, et qui a été adopté en France par la Société des Téléphones.

Chacun des postes comprend, d'une part, un transmetteur, dont le jeu repose sur le même principe que le microphone de Hughes, et qui sera mis en vibration par la voix de l'interlocuteur placé à ce poste ; d'autre part, un récepteur, formé par un système de deux téléphones, que l'on appliquera sur les deux oreilles, afin de mieux percevoir les paroles prononcées par l'interlocuteur placé à l'autre poste.

Dans le système d'Ader, le microphone transmetteur est fixé sous une plaque de bois mince, disposée comme la table d'un petit pupitre (fig. 492), et devant laquelle on se place pour émettre la voix. — Il se compose d'une série de petites baguettes de charbon de cornue, assujetties à peu près comme dans le microphone de Hughes, de manière que les contacts de ces baguettes avec leurs supports soient modifiés

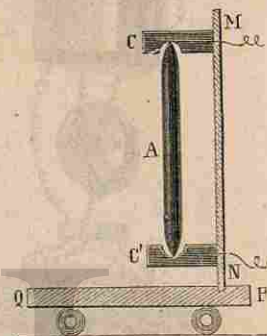


Fig. 491.  
Microphone de Hughes.

par toutes les vibrations imprimées à la plaque de bois. Il se produit ainsi, dans le courant de la pile qui est mise en communication avec le système, des variations d'intensité, qui s'accusent par des mouvements imprimés à la petite plaque de fer de chaque téléphone, au poste d'arrivée. — Quant aux téléphones récepteurs, que la figure 492

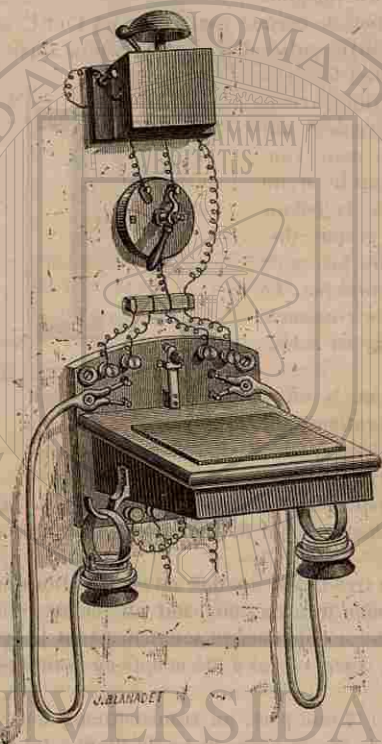


Fig. 492. — Système Ader.

représente suspendus par des anneaux de chaque côté du transmetteur, leur disposition diffère un peu de celle du téléphone de Bell. L'aimant est un petit aimant en fer à cheval, fixé à l'intérieur du disque de caoutchouc durci qui forme la base de l'embouchure. Dans la même monture, en regard de chacun des pôles de l'aimant, se trouve une petite bobine de fils conducteurs, que traverse le courant : on a ainsi l'avantage de soumettre la petite plaque de fer à l'action des deux pôles à la fois, ce qui donne aux sons produits plus d'intensité.

Enfin chaque poste présente diverses pièces accessoires, semblables à celles qui sont en usage sur les lignes télégraphiques, et destinées à faciliter le service. La figure 492 représente, à la partie supérieure, une sonnerie qui sert d'avertisseur ; au-dessous, est un commutateur, que l'on tourne de manière à recevoir le courant dans les fils des téléphones, quand on est prêt à entrer en correspondance (\*).

(\*) La correspondance par téléphone peut être établie à une distance quelconque, par une *ligne aérienne* ou *souterraine*. — Le transmetteur et le récepteur doivent communiquer par deux fils, un fil *d'aller*, et un fil *de retour* ; les fils en bronze silicieux sont ceux qui paraissent le plus avantageux. — Quand la ligne est aérienne, il est économique de suspendre les fils aux poteaux des fils télégraphiques ; mais alors il est indispensable de croiser les fils téléphoniques, d'une façon telle que les cou-

IV. — MACHINES MAGNÉTO-ÉLECTRIQUES ET DYNAMO-ÉLECTRIQUES.

643. **Machine de Clarke.** — La machine de Clarke est un appareil d'induction *magnéto-électrique*, c'est-à-dire que les courants d'induction y sont produits par les changements de positions relatives d'un circuit fermé et d'un aimant (627).

Un système de deux bobines H (fig. 495), sur lesquelles est enroulé

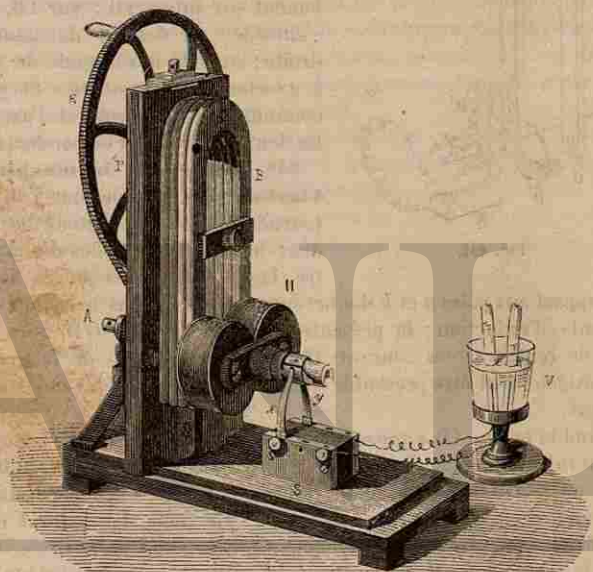


Fig. 495. — Machine de Clarke.

un fil métallique dont les tours contigus sont isolés les uns des autres, est assujéti sur un axe horizontal A, qui traverse la planche P : cet axe peut recevoir un mouvement de rotation rapide, à l'aide d'une chaîne sans fin qui passe sur la roue R ; dans l'axe de chacune des bobines est placé un noyau de fer doux. Un aimant puissant B, formé de plusieurs fers à cheval superposés, est fixé à la planche P : ses

rants télégraphiques ne puissent pas y faire naître de courants induits, qui troubleraient la correspondance. — On n'est point encore parvenu jusqu'ici à correspondre téléphoniquement par câbles sous-marins.

deux pôles sont placés à la même hauteur que l'axe de rotation A.

L'axe porte une pièce métallique CC', à laquelle sont fixées deux pièces de fer doux CD et C'D' qui forment les noyaux des bobines (fig. 494).

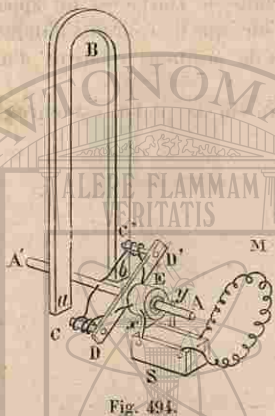


Fig. 494.

L'une des extrémités du fil de la bobine CD est fixée à l'axe, l'autre extrémité est soudée à une virole E, isolée de l'axe métallique par un cylindre en ivoire; il en est de même de l'autre bobine C'D', mais le sens de l'enroulement est interverti: sur CD, le fil s'enroule, en dessus, de gauche à droite; sur C'D' il s'enroule de droite à gauche. Deux ressorts  $x$  et  $y$  font communiquer la virole et l'axe avec les deux extrémités d'un conducteur M.

**646. Théorie de la machine de Clarke.** — Supposons que l'on fasse tourner les bobines autour de l'axe, dans le sens des aiguilles d'une montre. Les déplacements de ces bobines

par rapport aux pôles  $a$  et  $b$  donneront naissance, dans leurs fils, à des courants d'induction; la présence des noyaux CD et C'D' aura pour effet de renforcer ces courants (628), mais la théorie de la machine peut évidemment être présentée en faisant abstraction des noyaux renforçants.

Quand la bobine CD s'approche du pôle  $a$ , d'après la loi de Lenz (650) le courant induit doit contrarier le mouvement, c'est-à-dire qu'il doit avoir un sens tel, que la bobine CD devienne un solénoïde ayant un pôle austral en C (pôle repoussé par  $a$ ) (fig. 494). Le courant induit doit donc avoir sa gauche du côté C; il se rend à la virole, et va dans le conducteur M, de  $x$  vers  $y$ . — Quant à l'autre bobine C'D', elle s'approche en même temps du pôle boréal  $b$ ; dès lors, si le sens de l'enroulement du fil était le même pour les deux bobines, les deux courants induits seraient de sens inverse, et s'annuleraient dans le conducteur M; l'inversion du sens de l'enroulement a pour effet de rétablir les deux courants induits dans le même sens. — Il en est évidemment de même pendant toute la suite du mouvement; par suite, il suffira d'analyser le phénomène pour l'une des bobines, CD par exemple.

Quand la bobine CD a dépassé le pôle austral, elle s'éloigne du pôle  $a$ ; donc, d'après la loi de Lenz, le courant induit doit constituer dans cette bobine un solénoïde ayant son pôle boréal en C (pôle attiré par  $a$ ). Le courant, ayant ainsi sa droite du côté C, passe maintenant de la bobine à l'axe, et marche, dans le conducteur M, de  $y$  vers  $x$ .

Puis la bobine CD se rapproche du pôle boréal  $b$ ; toujours d'après la loi de Lenz, le courant induit constitue dans cette bobine un pôle boréal en C (pôle repoussé par  $b$ ): le sens du courant induit est encore le même, il va dans le conducteur extérieur de  $y$  vers  $x$ .

Enfin, CD s'éloigne de  $b$ , et le point C doit devenir le pôle austral du solénoïde (pôle attiré par  $b$ ). Le courant, ayant sa gauche du côté C, va donc de  $x$  vers  $y$ .

En résumé, quand la bobine CD est au-dessus du plan horizontal  $ab$ , le courant, dans le conducteur extérieur M, va de  $y$  vers  $x$ ; quand CD est au-dessous de ce plan, le courant va, dans ce même conducteur, de  $x$  vers  $y$ ; il y a donc inversion du courant, au moment où le plan déterminé par les axes des noyaux devient horizontal. A ce moment, l'intensité du courant est nulle: elle est maxima, dans un sens ou dans l'autre, lorsque ce plan devient vertical.

Si l'on veut employer cette succession de courants à décomposer l'eau, par exemple, il est nécessaire d'employer une disposition qui amène les courants à passer toujours dans un même sens, au travers du voltamètre V qui sera interposé dans le circuit (fig. 495). C'est là le but du commutateur, qui est représenté à part dans la figure 495. —

Sur l'axe métallique qui porte les bobines, est assujettie une gaine isolante en ivoire: sur cette gaine, sont fixées deux plaques métalliques  $aa'$ ,  $bb'$ , embrassant chacune à peu près la moitié de son contour, mais séparées l'une de l'autre par deux petits espaces vides. Le constructeur a mis la plaque  $bb'$  en communication permanente avec la virole; la plaque  $aa'$  communique avec l'axe par l'intermédiaire de la vis  $v$  qui pénètre jusqu'à cet axe. — Or, pendant la rotation, ces deux plaques arrivent tour à tour en contact avec les ressorts  $x$  et  $y$ , fixés sur les bandes métalliques qui sont appliquées sur le bloc de bois S, et qui reçoivent les conducteurs, G, H, dans lesquels doivent passer les courants. Dès lors, au moment où le courant change de sens dans les bobines, la communication des plaques avec les ressorts  $x$  et  $y$  est également intervertie, en sorte que les courants conservent toujours le même sens dans la partie GH du circuit. — Si l'on interpose un voltamètre dans cette partie, comme le représente la figure 495, on constate en effet que, dans l'une des éprouvettes, il se dégage uniquement de l'hydrogène; dans l'autre, uniquement de l'oxygène.

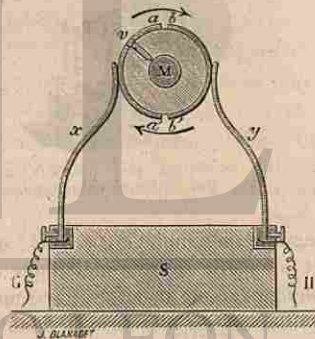


Fig. 495. — Commutateur de la machine de Clarke.

Remarquons cependant que si, au moyen du commutateur, on obtient des courants toujours de même sens dans le circuit extérieur, ces courants ne conservent pas une intensité constante pendant la durée d'une demi-rotation : l'intensité passe par un maximum, comme nous l'avons vu, à l'instant où le plan des axes des bobines passe par la position verticale; l'intensité devient nulle, à l'instant où ce plan devient horizontal. — Ce défaut de constance du courant est un inconvénient de la machine de Clarke et des machines industrielles construites sur le même type (648).

**647. Dispositions de la machine, pour la production des divers effets.** — Nous venons d'indiquer la disposition qui, dans la machine de Clarke, permet d'employer les courants induits à la production d'effets chimiques. — Si l'on veut employer ces courants à faire rougir un fil métallique fin, il suffit de placer ce fil entre deux petites pinces métalliques, fixées dans les bandes métalliques qui portent les ressorts (fig. 496).

Pour obtenir des étincelles, on fixe sur l'axe du commutateur une

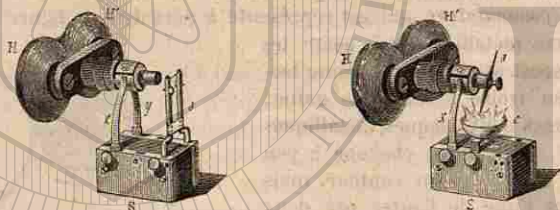


Fig. 496. — Effets calorifiques.

Fig. 497. — Inflammation de l'éther.

aiguille métallique *a* (fig. 497); sur la pièce *S*, on place un seul ressort, et une petite capsule métallique *c* pleine de mercure. Lorsque l'aiguille plonge dans le mercure, le circuit est fermé; mais, au moment où l'aiguille sort du mercure, il éclate une étincelle, qui est due surtout à l'extra-courant de rupture (655). — En versant une couche d'éther à la surface du mercure, on arrive facilement à enflammer l'éther.

Enfin, quand on veut employer la machine de Clarke à produire des commotions, on adapte, aux bandes métalliques de la pièce *S*, des fils conducteurs terminés par des poignées de laiton *M*, *M'* (fig. 498); que l'on saisit entre les mains humides. — D'après ce qu'on a vu (655), les commotions seront surtout intenses, si l'on fait en sorte qu'il se produise des interruptions brusques des courants, aux instants où ils acquièrent leur intensité maxima, c'est-à-dire aux instants où le plan des axes des bobines passe par la position verticale. Dès lors, les ressorts *x* et *y* étant placés comme précédemment, on fixe un troisième ressort *z* sur la bande qui porte déjà le ressort *x* (fig. 498). Aux ins-

tants où les bobines passent par la position verticale, ce ressort est rencontré par un petit prolongement de la plaque métallique sur laquelle appuyé déjà le ressort *y* (\*); le circuit se trouvant alors fermé par les deux ressorts *x*, *x* et par la bande métallique qui les supporte, le courant cesse brusquement de traverser le corps de la personne soumise à l'expérience : elle éprouve, à ce moment, une commotion produite surtout par l'extra-courant de rupture. — Le même effet se répète à chaque demi-révolution du système des bobines.

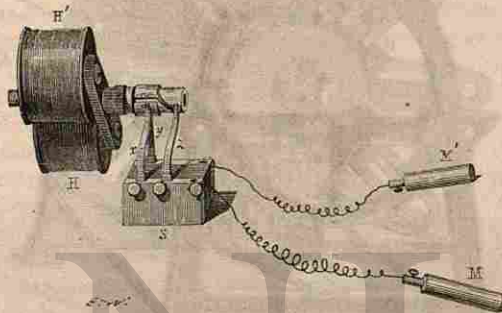


Fig. 498. — Effets physiologiques.

L'appareil comporte deux systèmes de bobines. L'un, à fil fin et long (fig. 495 et 498), est employé quand le circuit extérieur est très résistant (décomposition de l'eau, commotions physiologiques); il importe peu alors d'augmenter la résistance intérieure des bobines, tandis que l'on a intérêt à multiplier le nombre des spires, pour augmenter l'induction. L'autre système de bobines (fig. 496), à fil gros et court, est employé lorsque le circuit extérieur, entièrement métallique, est peu résistant.

**648. Machine de l'Alliance.** — On a réalisé, pour les usages industriels, des machines puissantes fondées sur le principe de la machine de Clarke. — La figure 499 représente la machine de la Compagnie l'Alliance, qui est employée pour l'éclairage électrique des phares; elle a été construite par Nollet et perfectionnée par Van Malderen.

Au lieu d'un seul aimant en fer à cheval et d'un seul couple de bobines, la machine comprend jusqu'à quarante aimants en fer à cheval, *E*, *E*..., assujettis sur un bâti de fonte et placés autour d'un même axe horizontal. Ils sont répartis en cinq groupes, comprenant

(\*) Chacune des plaques du commutateur porte un petit prolongement semblable, qui contourne la gaine d'ivoire, et vient se terminer dans un plan perpendiculaire à celui qui passerait par les deux intervalles de séparation des plaques elles-mêmes. On aperçoit l'un de ces prolongements sur la figure 498 : il est représenté au moment où il va être rencontré par le ressort *z*.

chacun huit aimants dans un même plan vertical. — Les bobines sont fixées sur une sorte de tambour, dont l'axe est horizontal, et auquel une machine à vapeur imprime un mouvement de rotation rapide, par

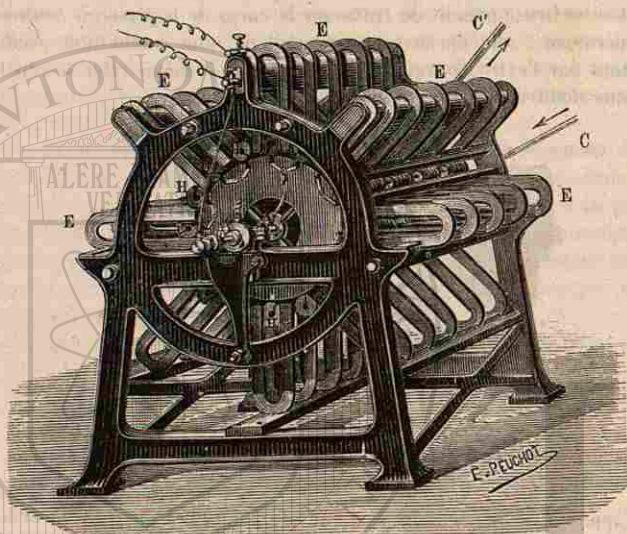


Fig. 499. — Machines de l'Alliance.

l'intermédiaire de la courroie C C'. Ces bobines sont associées les unes aux autres, comme les éléments d'une pile, de manière à former une seule série. — Cette machine fonctionne avec une régularité remarquable.

649. **Principe de la machine de Gramme.** — La machine de Gramme est l'une de celles qui paraissent présenter le plus d'avenir, particulièrement au point de vue industriel. — Bien qu'elle semble d'abord analogue à la machine de Clarke, elle repose, comme on va le voir, sur un principe tout différent.

Soit un anneau circulaire de fer doux  $nn'$  (fig. 500), placé entre les branches d'un aimant en fer à cheval  $AMB$  ou d'un électro-aimant, de manière que son diamètre horizontal corresponde à la ligne  $AB$  qui joindrait les pôles de l'aimant. L'influence de ces pôles détermine, dans chacun des demi-anneaux  $bn$ ,  $b'n'$ , une aimantation par influence, d'où résulte, en face du pôle  $A$ , la production d'un *double pôle boréal*  $bb'$ ; en face du pôle  $B$ , la production d'un *double pôle austral*  $aa'$ ; enfin, en  $n$  et en  $n'$ , sont deux *régions neutres*. — Concevons d'abord que, l'anneau étant fixe, on ait enroulé, autour de l'un de ses points, une

petite hélice  $s$ , formée par un fil métallique couvert de soie, et que cette hélice puisse glisser sur l'anneau, dans le sens indiqué par la flèche, de manière à prendre successivement les positions  $n$ ,  $bb'$ ,  $n'$ ,  $aa'$ ,  $n$ , etc.; concevons enfin que les extrémités du fil soient réunies par un conducteur, c'est-à-dire que le circuit soit fermé. Si l'on déplace l'hélice d'une manière continue, l'expérience montre qu'il se produit une succession de courants induits, dont le sens est *constant* pendant la demi-révolution  $nbb'n'$  qui s'effectue à droite de la verticale passant par la ligne neutre; pendant la demi-révolution  $n'a'n'$  qui s'effectue à gauche, les courants ont encore un sens *constant*, mais *inverse* du premier.

Pour nous rendre compte de ces résultats, nous supposons que les courants induits sont dus uniquement à l'influence des pôles de l'anneau,  $aa'$  et  $bb'$ , les pôles  $A$  et  $B$  de l'aimant n'ayant d'autre effet que de faire naître les pôles de l'anneau. — Remarquons alors que, eu égard à la position des pôles dans l'anneau, les courants particuliers du fer doux doivent être considérés comme circulant dans un même sens pour la partie  $anb$ , et en sens contraire pour la partie  $a'n'b'$ . (Pour la partie  $anb$ , le sens des courants particuliers est, en avant du plan de la figure, de l'intérieur à l'extérieur de l'anneau; pour la partie  $a'n'b'$ , de l'extérieur à l'intérieur). — Or, quand l'hélice  $s$  glisse de  $n$  en  $b$ , les courants particuliers de la portion  $nb$  ne peuvent faire naître aucun courant induit dans l'hélice, qui s'éloigne des uns et se rapproche des autres. Mais, dans ce mouvement, l'hélice se rapproche des courants particuliers de la portion  $b'n'$ , elle s'éloigne des courants particuliers de la portion d'anneau  $na$ ; d'après la loi de Lenz (650), il se développera donc dans l'hélice un courant induit de sens contraire aux premiers, de même sens que les seconds; donc pendant le quart de révolution  $nb$ , qui rapproche l'hélice de  $b$ , il se développe un courant de même sens que les courants particuliers de la portion  $nb$ . — Une analyse du même genre montrerait que, pendant le quart de révolution  $b'n'$  qui l'éloigne de  $b'$ , il se développe dans l'hélice un courant de sens con-

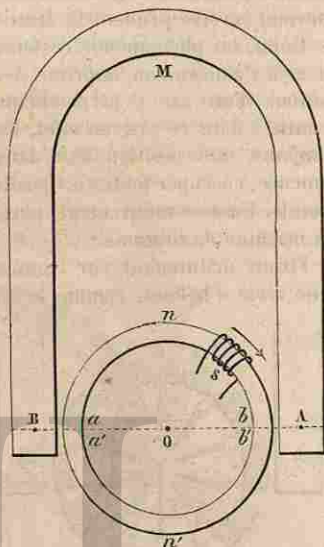


Fig. 500. — Production des courants dans la machine de Gramme.

traire à celui des courants particuliers de la portion d'anneau  $b'n'$ , c'est-à-dire de même sens que le courant induit précédent. — Les mêmes considérations montrent que le sens des courants de l'hélice devient inverse pendant la demi-révolution  $n'a'n$  (\*).

Enfin, les phénomènes resteront encore les mêmes si, l'hélice étant fixée à l'anneau, on imprime à l'anneau un mouvement de rotation autour d'un axe  $O$  perpendiculaire à son plan et passant par son centre : dans ce cas, en effet, les doubles pôles  $bb'$  et  $aa'$  occuperont toujours une position fixe dans l'espace, et l'hélice  $s$  sera encore amenée à occuper toutes les positions possibles par rapport à ces deux points. C'est ce mouvement, plus facile à réaliser, qui est adopté dans la machine de Gramme.

Fixons maintenant sur l'anneau, non plus une seule hélice, mais une série d'hélices, comme le représente la figure 501 : soudons, à

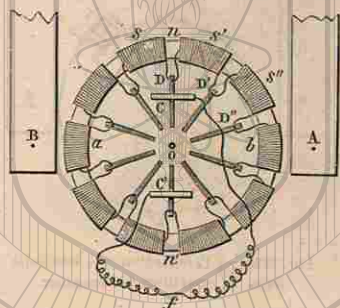


Fig. 501  
Anneau de la machine de Gramme.

une pièce de cuivre  $D$ , l'extrémité terminale de l'hélice  $s$  et l'extrémité initiale de l'hélice suivante  $s'$ ; à une autre pièce de cuivre  $D'$ , l'extrémité terminale de l'hélice  $s'$ , et l'extrémité initiale de l'hélice suivante  $s''$ , et ainsi de suite, le système de ces pièces de cuivre étant d'ailleurs assujéti à l'anneau, de manière à tourner avec lui autour de l'axe  $O$ . Disposons enfin, dans une position fixe, et dans la verticale passant par le point  $O$ , deux lames métalliques  $C, C'$ , qui, pendant le mouvement

de rotation, se trouveront toujours respectivement en contact avec les deux pièces de cuivre rayonnantes qui correspondront à la ligne neutre  $nn'$ . — Ces deux lames  $C$  et  $C'$  étant réunies par un conducteur  $f$ , on voit que, à chaque période de la rotation, les deux systèmes d'hélices situés, l'un à droite et l'autre à gauche de  $nn'$ ,

(\*) En réalité, les pôles  $A$  et  $B$  de l'aimant en fer à cheval (fig. 500) interviennent dans la production des courants induits, aussi bien que les pôles  $a$  et  $b$  de l'anneau. — Supposons l'hélice  $s$  dans la position de la figure 500, parcourue par un courant de même sens que les courants particuliers de la portion  $ab$ , c'est-à-dire allant de l'avant à l'arrière du plan de la figure extérieurement à l'anneau : nous pouvons alors considérer l'hélice comme un solénoïde, dont le pôle boréal se rapproche du pôle austral  $A$  de l'aimant; le mouvement de l'hélice est alors contrarié par l'action magnétique du pôle  $A$ ; donc, d'après la loi de Lenz, quand l'hélice se déplace dans le sens de la flèche, le pôle inducteur  $A$  doit développer dans cette hélice un courant induit de même sens que les courants particuliers de la portion  $ab$  de l'anneau. — La présence des pôles  $A$  et  $B$  de l'aimant en fer à cheval renforce donc les courants produits par les pôles  $a$  et  $b$  de l'anneau.

pourront être assimilés à deux systèmes d'éléments de piles, associés en série, chacune des séries ayant son pôle positif à l'une des lames  $C$ , son pôle négatif à l'autre lame  $C'$ . En d'autres termes, ces deux systèmes d'hélices seront assimilables aux deux séries d'éléments de la figure 445 (en supposant que dans la figure 445, les deux séries d'éléments de pile soient disposés verticalement). — Il en résulte, dans le conducteur  $f$ , qui réunit ces deux lames, un courant très intense. Ce courant conservera d'ailleurs le même sens pendant toute la rotation. C'est ce qu'on exprime en disant que la machine est à courant continu.

650. Machine magnéto-électrique. Type de laboratoire. — La figure 502 représente un petit modèle de la machine de Gramme,

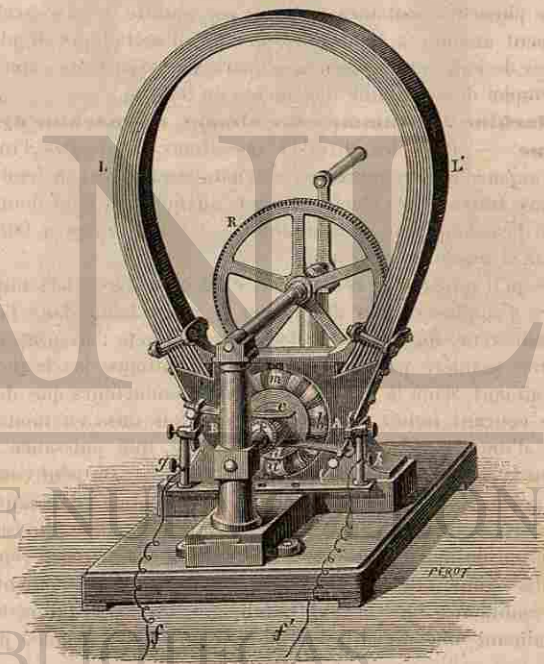


Fig. 502. — Machine de Gramme.

construit par M. Bréguet pour les expériences de laboratoire ou de cours. — L'aimant  $LL'$  est un aimant du système de Jamin (528), dont les armures  $A$  et  $B$  forment les pôles entre lesquels tourne l'anneau  $mbn$ ; on a représenté, avec des teintes alternativement plus

claires et plus foncées, les hélices successives qui sont appliquées sur l'anneau de fer doux (\*). Les pièces de cuivre rayonnantes, auxquelles sont soudées les extrémités des fils des hélices, se prolongent en avant de l'anneau, de manière à former un cylindre *k*, de diamètre plus petit : elles sont séparées les unes des autres par des rubans de soie, ou de toute autre matière isolante. Sur ce cylindre *k* viennent s'appuyer, aux deux extrémités d'un diamètre perpendiculaire à la ligne des pôles A, B, deux lames *c*, *d*, ou plutôt deux balais de fils métalliques assujettis aux colonnes fixes *g*, *h*, qui reçoivent les fils *f* et *f'* et permettent de faire passer le courant dans un appareil quelconque (\*\*). — Le mouvement est imprimé à l'anneau au moyen d'une manivelle et d'une roue dentée R, qui engrène avec un pignon fixé à l'anneau (ce pignon est masqué sur la figure). On obtient facilement ainsi une vitesse de plusieurs centaines de tours par minute. — Avec cet appareil, on peut amener à l'incandescence un fil métallique de plusieurs décimètres de long, et réaliser la plupart des expériences qui exigeraient l'emploi d'une dizaine d'éléments de Bunsen.

651. **Machine de Gramme sans aimant, ou machine dynamo-électrique.** — Pour les diverses opérations auxquelles l'industrie applique aujourd'hui les machines magnéto-électriques, on tend à substituer, aux aimants, des électro-aimants auxquels on peut donner une puissance beaucoup plus considérable. — C'est ce qu'on a fait également pour la machine de Gramme.

Mais ce qu'il importe de remarquer, c'est qu'il n'est alors nullement nécessaire d'employer, pour développer le magnétisme dans l'électro-aimant inducteur, une source d'électricité distincte : il suffit d'introduire d'une manière permanente le fil qui entoure les branches de l'électro-aimant, dans le circuit même des conducteurs que doit parcourir le courant induit : la machine, une fois mise en mouvement, acquiert, d'une manière presque instantanée, une puissance qui va ensuite en croissant avec la vitesse de rotation. — On peut considérer alors le noyau de l'électro-aimant inducteur comme possédant, avant que le mouvement se produise, une aimantation faible, qui est due, soit à l'action du magnétisme terrestre, soit au magnétisme rémanent. Cette faible aimantation suffit pour développer, au moment où la rotation commence, un courant induit, qui développe lui-même dans l'électro-aimant une aimantation de plus en plus grande, jusqu'au

(\*) L'anneau est formé, non pas par une pièce de fer doux massive, mais par un faisceau de fils de fer, soudés en anneaux et juxtaposés.

(\*\*) Les fils métalliques qui forment les balais *c* et *d* sont assez flexibles pour toucher simultanément plusieurs des pièces de cuivre voisines. Il en résulte, d'une part, que le courant n'est jamais interrompu ; d'autre part, qu'on supprime ainsi la résistance des hélices qui sont voisines de la ligne neutre, et qui ne contribueraient qu'à diminuer l'intensité du courant total, puisque les courants développés loin des pôles sont toujours très faibles.

moment où la machine atteint son régime régulier. — C'est donc, à proprement parler, le *travail* développé pour mettre la machine en mouvement, qui se transforme en une succession de courants. De là le nom de machines *dynamo-électriques*, qui a été donné à ces machines, et à toutes les machines analogues.

La figure 505 représente l'un des types de machines Gramme con-

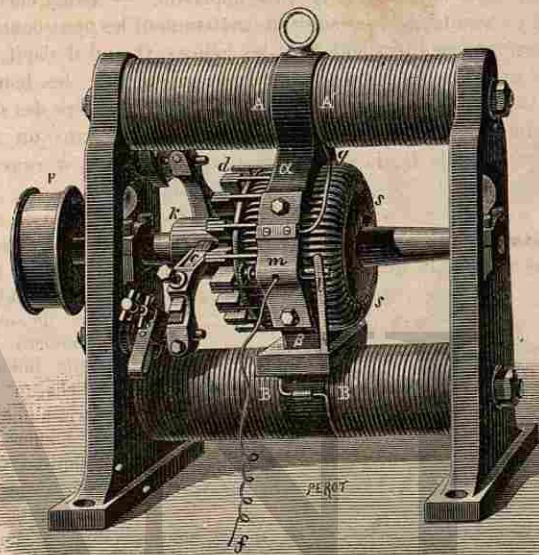


Fig. 505. — Machine de Gramme sans aimant, ou machine dynamo-électrique.

struites d'après ces principes. — La machine comprend deux électro-aimants inducteurs, l'un AB à gauche, l'autre A'B' à droite : leurs pôles de même nom, A et A', appliqués sur une même armure de fer doux  $\alpha$ , font de cette armure un pôle austral ; de même les pôles B et B', appliqués sur l'armure  $\beta$ , en font un pôle boréal. Pour introduire les électro-aimants dans le circuit parcouru par le courant induit, on fixe dans la pièce de cuivre *m* l'un des fils *f* qui servent à fermer ce circuit ; cette même pièce de cuivre, isolée des armures  $\alpha$  et  $\beta$ , reçoit le fil *g* qui vient passer successivement sur les bobines A', B', B, A, et se termine au support du balai qui ferme définitivement le circuit (dans la figure ci-contre, c'est celui qui est masqué par le cylindre *k*).

Les deux pôles de la machine sont donc le balai *c* et la pièce *m*(\*). —

(\*) Les fils des hélices sont plus ou moins fins, selon les usages auxquels la machine est destinée. — Quant aux fils des électro-aimants, ils doivent toujours être

La machine reçoit son mouvement d'un moteur à vapeur, dont l'arbre porte une courroie sans fin qui vient passer sur le tambour P.

Cette machine telle que nous venons de la décrire est à *courant continu*, comme la petite machine de Gramme que nous avons décrite d'abord (650), c'est-à-dire qu'elle donne, dans la partie du circuit qui est extérieure à la machine elle-même, un courant de sens constant; elle peut donc être employée à la galvanoplastie. — Dans certains autres cas, il y a avantage à recueillir alternativement les deux courants de sens inverse qui se succèdent dans les hélices. Quand il s'agit, par exemple, de produire la lumière électrique au moyen des bougies Jablochhoff (fig. 508), on obtient une usure plus régulière des deux charbons en faisant arriver le courant alternativement dans un sens et dans l'autre. — De là, la construction des machines à *courants alternatifs*.

652. **Machine de Gramme à courants alternatifs.** — Les figures 504 et 505 représentent la disposition donnée à la machine Gramme, pour recueillir des courants alternatifs, et en même temps pour obtenir plusieurs circuits indépendants, avec chacun desquels on pourra alimenter un certain nombre de foyers de lumière électrique. — Ce sont ici les électro-aimants qui sont mobiles : l'anneau qui porte les hélices induites est fixe. Sur l'axe de rotation, sont disposés huit électro-aimants

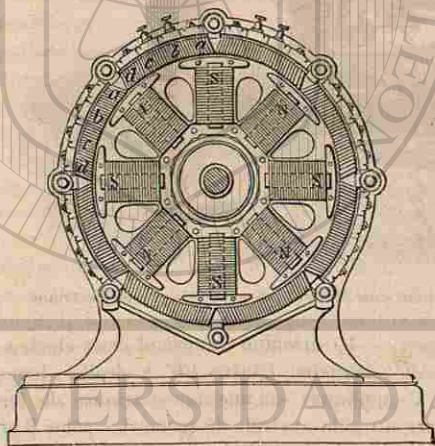


Fig. 504. — Disposition de la machine de Gramme à courants alternatifs.

droits, dont les pôles N. S. N. S. sont alternés. L'anneau qui porte les hélices induites est remplacé par un cylindre de fer, extérieur aux électro-aimants, et fixe. Les hélices y sont distribuées au nombre de huit; mais chacune d'elles est décomposée en quatre hélices partielles, distinctes, *a, b, c, d*. On réunit entre elles les hélices *a*, de manière à en former un circuit; puis, les hélices *b*, de manière à en former un autre circuit; et de

très gros, afin de n'introduire dans le circuit qu'une faible résistance. Dans certaines machines, on emploie même, au lieu de fils, des feuilles de cuivre ayant une largeur égale à la longueur des branches de l'électro-aimant, et enroulées quatre ou cinq fois autour de chacune d'elles.

même pour les hélices *c*, et pour les hélices *d*. Chacun de ces groupes d'hélices éprouvant, pendant le mouvement, la même succession d'influences de la part des pôles alternés des électro-aimants, on voit que chacun des quatre groupes constitue un générateur indépendant de courants alternatifs. — En multipliant les groupes d'hélices partielles, on peut augmenter le nombre des

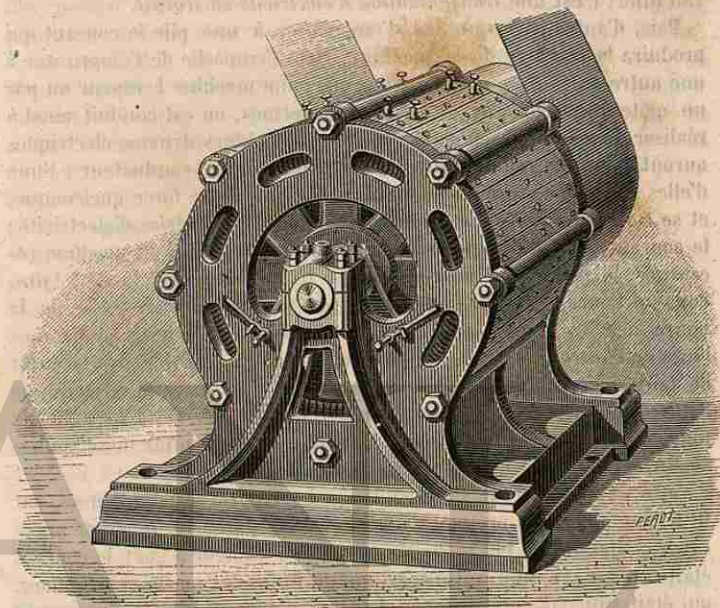


Fig. 505. — Machine de Gramme, à courants alternatifs.

circuits distincts. C'est ainsi que M. Gramme a construit des machines 12 circuits indépendants dont chacun peut entretenir 5 bougies électriques en tout, 60 bougies.

Un certain nombre d'autres machines dynamo-électriques, telles que celles de Siemens, de Brush, etc., reposent sur les mêmes principes, et présentent des dispositions plus ou moins différentes. — Les unes et les autres peuvent d'ailleurs être construites pour fournir, soit un courant *continu*, soit des courants *alternatifs*.

653. **Réversibilité des machines dynamo-électriques.** — **Transport de la force à distance.** — Nous venons de voir comment l'application d'une force motrice, à une machine dynamo-électrique, permet d'obtenir une succession de courants électriques : c'est une *transformation de travail en électricité*. — Or, les machines magnéto-électriques ou dynamo-électriques, en général, sont *réversibles*; c'est-à-dire que si l'on prend, par exemple, une machine de Gramme (fig. 502 ou



505), et si l'on fait passer dans le fil le courant d'une pile suffisamment énergique, on la voit se mettre en mouvement. C'est la dépense de l'électricité produite par la pile qui donne naissance au mouvement de la machine, et ce mouvement peut être utilisé pour la production d'un travail utile : c'est une *transformation d'électricité en travail*.

Mais, d'autre part, au lieu d'emprunter à une pile le courant qui produira la rotation de la machine, rien n'empêche de l'emprunter à une autre machine semblable, mue par une machine à vapeur ou par un moteur quelconque. — En d'autres termes, on est conduit ainsi à réaliser la combinaison suivante. Deux machines dynamo-électriques auront leurs fils réunis entre eux par un circuit conducteur : l'une d'elles sera mise en mouvement sous l'action d'une force quelconque, et se comportera alors comme une machine *génératrice* d'électricité; le courant ainsi produit, arrivant à l'autre machine, ou machine *réceptrice*, la mettra en mouvement. — L'expérience est facile à faire, dans les Cours, avec deux machines de Gramme comme celle de la figure 502; les deux machines étant placées à une certaine distance l'une de l'autre, et réunies de façon à former un circuit fermé, il suffit de faire tourner l'une d'elles, au moyen de sa manivelle, pour voir l'autre se mettre en mouvement dans le même sens. Les deux anneaux tournent en même temps et avec la même vitesse, comme deux poulies égales, qui seraient entraînées par une même courroie.

Cette expérience fut faite en 1875, à l'Exposition de Vienne, par M. H. Fontaine. Une première machine de Gramme, la machine *génératrice*, était mise en mouvement par un moteur à gaz; le courant était transmis à une autre machine de Gramme, machine *réceptrice*, qui était située à une distance de 1 kilomètre, et dont le mouvement faisait fonctionner une pompe centrifuge. — Ce fut la première réalisation du *transport de la force* par l'électricité, l'un des plus beaux problèmes qui aient été posés à notre époque, et à la solution duquel M. Marcel Deprez a le mérite d'avoir fourni déjà la plupart des éléments essentiels.

Il est facile de concevoir, en effet, de quel intérêt serait pour l'industrie la solution complète de ce problème. — Combien de chutes d'eau, de cascades, de torrents, sont restés jusqu'ici sans emploi, en raison de leur éloignement par rapport aux grands centres industriels! Une machine dynamo-électrique, mise en mouvement par une chute d'eau et fonctionnant comme machine *génératrice* d'électricité, pourrait transmettre le courant électrique, par des fils conducteurs, à une machine *réceptrice*, située dans l'usine même où le travail devrait être utilisé (\*). — D'autre part, dans les villes, combien de petites indus-

(\*) On ne retrouve jamais, au point d'arrivée, toute l'énergie dépensée au point de départ. L'une des principales causes de déperdition est l'échauffement des fils, c'est-à-dire la transformation d'une partie de l'énergie en chaleur sensible. — D'après des

tries n'ont besoin d'avoir à leur disposition qu'une petite force motrice, et sont cependant contraintes à des installations dispendieuses ou encombrantes, pour les machines motrices qui ont été employées jusqu'ici! Des machines dynamo-électriques puissantes, installées en des points convenablement choisis et actionnées par des moteurs puissants, produiraient un courant capable de mettre en mouvement une série de petites machines réceptrices, placées dans les divers quartiers de la ville, et entre lesquelles on répartirait la force, suivant les besoins des industries qui auraient à en faire usage. Le même courant pourrait d'ailleurs être employé, en d'autres points ou à d'autres instants, pour produire de la lumière, ou pour la galvanoplastie, etc.

654. **Appareils divers fondés sur l'induction magnétique.** — Outre les machines que nous venons d'étudier, et qui servent à produire des courants intenses, il existe des appareils d'induction magnétique moins puissants, fondés toujours sur le même principe, mais présentant des dispositions variables, suivant les usages auxquels on les destine. — Ainsi, le téléphone de Bell (642) est évidemment un appareil d'induction magnétique. — Pour l'*électro-thérapie*, c'est-à-dire pour le traitement de certaines maladies par l'électricité, on fait usage d'appareils magnéto-électriques présentant une assez grande analogie avec la machine de Clarke.

Enfin, il est des circonstances où l'on n'a besoin que d'un courant d'une durée très courte, mais d'une assez grande intensité, pour produire un effet déterminé (explosion d'une mine ou d'une torpille, mouvement à imprimer à un signal mobile, etc.). On fait alors usage d'appareils d'une construction particulièrement simple, dans lesquels le courant est produit par le déplacement brusque d'une bobine, au voisinage d'un aimant.

Nous citerons comme exemple l'inducteur Postel-Vinay (fig. 506), qui est employé sur certaines lignes de chemin de fer pour transmettre des signaux d'une station à l'autre.

Entre les deux pôles A et B d'un aimant, se trouve une bobine dont le noyau de fer doux CD sert d'armure à l'aimant. En agissant sur la manivelle M, on fait d'abord décrire à la bobine, assez lentement, une demi-révolution autour de l'axe H, qui est parallèle aux branches de l'aimant : on communique ainsi une tension à un ressort spiral, qui est disposé à l'intérieur du cylindre R. Si l'on abandonne alors brusquement la manivelle, le système, sollicité par le ressort, revient ra-

considérations théoriques que nous ne pouvons développer ici, on a cru d'abord que le rendement d'un pareil système ne pouvait pas dépasser 50 pour 100. Les expériences de M. Marcel Deprez ont montré la possibilité d'obtenir, dans des conditions déterminées, un rendement supérieur. — Il paraît cependant difficile, pour de grandes distances, de dépasser le rendement de 50 pour 100.

pidement à sa position primitive : le sens de l'aimantation du noyau CD étant brusquement interverti, il en résulte, dans la bobine, un courant induit d'autant plus intense que le mouvement est plus rapide. La force électromotrice du courant (différence des potentiels des deux

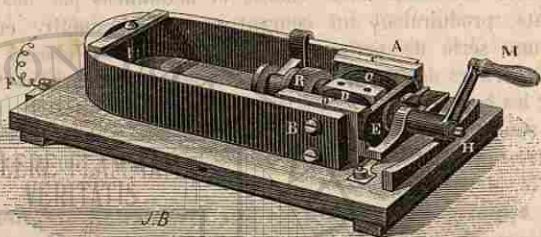


Fig. 506. — Inducteur Postel-Vinay.

extrémités du fil de la bobine) peut atteindre 500 volts. — Comme dans la machine de Clarke, l'une des extrémités du fil de la bobine est soudée à l'axe II, l'autre extrémité communique avec une virole en cuivre E, isolée de l'axe. On recueille le courant au moyen de ressorts frotteurs, convenablement disposés.

L'appareil inducteur de chaque station communique, par un fil télégraphique, avec une sonnerie électrique (615) placée à la station suivante, la terre servant de fil de retour. A chaque déplacement brusque de la bobine, correspond un choc du marteau sur le timbre, c'est-à-dire un appel. — Chacun des signaux à transmettre est représenté conventionnellement par un nombre déterminé d'appels successifs.

Cet appareil peut aussi servir pour déterminer, à distance, l'explosion d'une mine ou d'une torpille, etc.

#### V. — ÉCLAIRAGE ÉLECTRIQUE.

655. **Éclairage par l'arc voltaïque.** — L'arc voltaïque, dont nous avons décrit le mode de production et les principales propriétés (565), et qui a été observé pour la première fois par Davy au commencement du siècle, constitue une source de lumière très intense, qui a été utilisée pour l'éclairage.

Le courant peut être produit soit par une pile, soit par une machine magnéto-électrique ou dynamo-électrique. — Quand on emploie une pile de Bunsen, il faut au moins 40 éléments, associés en série (\*).

(\*) On obtient un bel arc voltaïque, dont l'intensité lumineuse est équivalente à celle de 100 becs Carcel (liv. V, chap. 1), au moyen d'un courant continu, d'environ 15 am-

Pour que la lumière conserve une intensité constante, il est nécessaire que les extrémités des baguettes de charbon, malgré leur usure progressive, soient maintenues toujours à une même distance. — Cette condition a d'abord été réalisée au moyen d'appareils régulateurs.

656. **Régulateur de Foucault.** — Le premier régulateur a été imaginé par Foucault. La figure 507 représente cet appareil, avec les modifications qui y ont été apportées par Duboscq.

Les baguettes de charbon *p, n*, sont fixées aux extrémités de deux tiges métalliques *T, T'* : la tige *T* est munie, à sa partie inférieure, d'une crémaillère qui engrène avec les dents de la roue *R*; la tige *T'* est supportée de même par une crémaillère, qui passe dans la colonne creuse *S* et vient engrèner avec un pignon fixé à la même roue *R*. Cette roue *R* est assujettie à un ressort qui tend toujours à lui imprimer un mouvement de rotation, de manière à faire monter la crémaillère de la tige *T* et à faire descendre en même temps la crémaillère de la tige *T'*. Si ces pièces étaient abandonnées à elles-mêmes, les deux charbons seraient toujours entraînés l'un vers l'autre, jusqu'au contact. Mais ce mouvement n'est possible qu'à la condition d'entraîner aussi le système des roues *r, r'* et de la vis sans fin *v* : le principe de l'appareil consiste précisément à rendre ce système immobile tant que le courant passe convenablement de *p* en *n*, et à le laisser au contraire se mettre en mouvement dès que le courant commence à s'affaiblir par

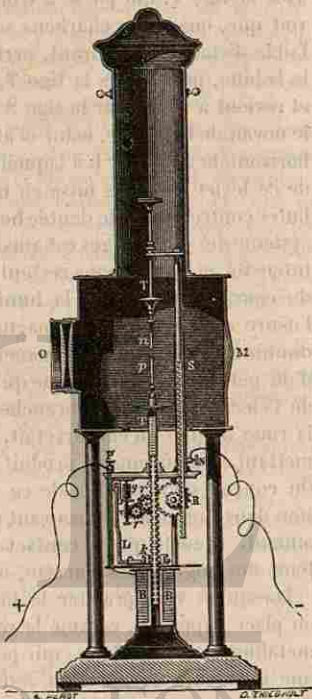


Fig. 507.

Régulateur de la lumière électrique.

pières. — La résistance de l'arc est d'environ  $1^{m} 35$ ; si l'on calcule alors la différence de potentiel des deux pointes des charbons, par la formule  $i = \frac{V}{R}$ , on trouve 20 volts. — M. Edlund a démontré que l'arc voltaïque donne naissance à une force électromotrice d'environ 50 volts, qui est en sens inverse de celle de la pile; le courant de la pile doit donc produire, aux deux extrémités des charbons, une chute de potentiel de 50 volts. La perte d'énergie correspondante à la production de la lumière est donc de  $15 \times 50 \times 10^7$  ergs par seconde (576); et pour un carcel, la dépense d'énergie est de  $7,5 \times 10^7$  ergs.

l'usure des charbons. — Pour cela, on a placé dans le pied de l'appareil une bobine dont le noyau est formé par un tube de fer doux, et dont le fil métallique est représenté par sa section en BB : l'une des extrémités de ce fil part du bouton P et est mise en communication avec le pôle positif de la pile; l'autre extrémité communique avec la plaque métallique qui forme la base de la bobine, et par suite avec la tige T, qui passe à frottement doux à travers cette plaque. On voit que, quand les charbons sont au contact, ou situés encore à une faible distance, le courant, arrivant par le bouton P, parcourt le fil de la bobine, passe dans la tige T, franchit l'intervalle qui sépare  $p$  de  $n$ , et revient à la pile par la tige S et le bouton N. Or, le courant aimantant le noyau de la bobine, celui-ci attire l'anneau de fer doux  $k$  et la branche horizontale du levier L à laquelle l'anneau est fixé; la branche verticale de ce levier est alors mise en mouvement de gauche à droite, et vient buter contre une roue dentée horizontale, fixée à l'axe de la vis  $v$ . Tout le système des engrenages est ainsi arrêté tant que le courant conserve son intensité, et les charbons restent fixes. — Au contraire, quand l'intensité du courant et celle de la lumière produite viennent à diminuer par l'usure des charbons, le magnétisme développé dans l'électro-aimant diminue, et il arrive un moment où le contact  $k$ , obéissant à l'action d'un petit ressort métallique qu'on aperçoit au-dessous de lui, s'éloigne de l'électro-aimant : la branche verticale du levier L s'écarte alors de la roue dentée qu'elle arrêta, et tout le système des engrenages, se mettant en mouvement, produit un rapprochement des charbons  $p$  et  $n$ . On conçoit qu'il résulte, de ce rapprochement même, une augmentation dans l'intensité du courant et dans la force magnétique de l'électro-aimant, de sorte que le contact  $k$  est bientôt attiré de nouveau, le système des engrenages s'arrête, et ainsi de suite (\*).

Lorsqu'on veut projeter la lumière dans une direction déterminée, on place l'appareil, comme le représente la figure 507, dans une boîte métallique rectangulaire, qui porte, dans l'une de ses faces verticales, une ouverture garnie d'un système de lentilles O. — A l'intérieur de la boîte, sur la face opposée à l'ouverture, est un miroir concave M, qui renvoie vers les lentilles la lumière qu'il reçoit.

Parmi les nombreux appareils qui peuvent être considérés comme des modifications de celui de Foucault, il convient de citer, en particulier, celui de M. Serrin, qui donne, par un mécanisme un peu différent, mais avec une disposition semblable des charbons, une régularité de lumière presque absolue.

(\*) Le pignon de la roue R a un nombre de dents égal à la moitié du nombre des dents de la roue elle-même : il en résulte que, à chaque mouvement effectué par la roue, le point  $n$  descend d'une quantité qui est la moitié de celle dont le point  $p$  s'élève; l'observation ayant montré que le pôle positif s'use à peu près deux fois plus vite que le pôle négatif, la position de ces extrémités dans l'espace reste ainsi sensiblement constante.

657. **Régulateurs fonctionnant sans mécanisme. — Expériences de M. E. Fernet.** — Au commencement de l'année 1866, M. E. Fernet publia une disposition destinée à supprimer tout mécanisme, pour la production et le réglage de la lumière électrique.

Une tige métallique horizontale est suspendue par deux fils de soie fixés, de part et d'autre, à une petite distance de son milieu, de manière qu'une force très faible puisse l'écartier de sa position d'équilibre. A l'extrémité de cette tige, et perpendiculairement à sa direction, est assujéti l'un des charbons, dirigé lui-même horizontalement; l'autre charbon est placé en regard, dans une position fixe, et tangentiellement à l'arc de cercle que décrira l'extrémité du charbon mobile, dans son mouvement. L'un des pôles est mis en communication avec le charbon fixe; l'autre pôle, avec la tige métallique, au moyen d'une pointe verticale, placée au milieu de cette tige et plongeant dans un petit godet de mercure. — Les pointes des deux charbons étant amenées au contact, on tord légèrement le système des fils de suspension, de manière à appuyer les pointes des deux charbons l'une contre l'autre; dès que le circuit est fermé, on voit le charbon mobile s'écartier du charbon fixe, en vertu de la force répulsive qui s'exerce entre deux portions consécutives d'un même courant (note de la page 500); il se forme donc un arc électrique, et comme la force de torsion augmente avec l'angle d'écart, on obtient bientôt une position d'équilibre.

Cet équilibre est stable; puisque tout accroissement de distance des charbons diminue la force répulsive et augmente la force de torsion, tandis qu'un rapprochement diminue la force de torsion et augmente la force répulsive. L'usure des charbons fait passer le charbon mobile, d'une manière continue, par une série de positions d'équilibre : les extrémités des charbons conservent entre elles une distance sensiblement constante pendant un temps très long.

L'appareil peut d'ailleurs être employé soit avec une pile électrique, soit avec les machines magnéto-électriques, à courants continus ou à courants alternatifs. Mais il a, comme défaut, sa sensibilité même; il ne peut fonctionner régulièrement que sur un support à peu près immobile : des trépidations un peu fortes, imprimées au sol sur lequel il est placé, suffisent pour amener des irrégularités dans la lumière (\*).

658. **Bougie électrique de M. Jablochhoff.** — L'idée essentiellement pratique, et d'une remarquable simplicité, qui est due à M. Jablochhoff (novembre 1876) consiste à placer les deux charbons parallèlement entre eux, dans une position fixe (fig. 508), de manière que la combustion simultanée de leurs deux extrémités laisse toujours à une même distance les points entre lesquels doit se produire l'arc électrique. Pour obliger l'arc à jaillir toujours entre les extrémités libres,

(\*) Quelques essais ont été faits par M. Fernet, pour réaliser la mobilité de la tige avec d'autres dispositions; par exemple, en l'assujettissant à un axe métallique légèrement incliné sur la verticale, de manière qu'elle tienne à prendre, sous l'action de son poids, la direction de la ligne de plus grande pente, dans le plan qu'elle décrit dans son mouvement : la force antagoniste de la répulsion électrique peut alors être rendue très petite, en réglant l'inclinaison de l'axe de rotation. L'appareil, ainsi disposé, se dérange moins facilement que le précédent, mais il exige cependant toujours une installation sur un sol à peu près immobile.

il suffit de séparer les charbons, dans toute leur longueur, par un corps isolant, tel que le kaolin, qui soit suffisamment fusible, à la température élevée de l'arc électrique, pour dégager successivement les deux baguettes. « Ces deux charbons et le corps isolant constituent, à proprement parler, dit M. Jablochhoff, une *bougie électrique*, qui se place dans un chandelier spécial. Ce chandelier se compose de deux pièces métalliques S, A, isolées l'une de l'autre, et montées sur une base d'ardoise ou de quelque autre matière. Ces deux pièces constituent une pince, dans laquelle les deux charbons sont serrés par un ressort *r*, de manière à établir un bon contact. Les deux fils, qui amènent le courant, aboutissent à cette pince. »

Pour allumer la bougie, il faut, si elle est à portée de la main, établir la continuité entre les charbons en plaçant, pendant quelques secondes, sur le sommet de la bougie, un morceau de mine de crayon. — Si la bougie doit être allumée à distance, on place à l'avance, entre les extrémités des charbons, un petit fil métallique fin, un morceau de plomb ou un fragment de mine : dès que le courant est établi, la fusion ou la combustion de ce corps conducteur supprime la continuité, et l'arc voltaïque reste établi.

L'un des principaux progrès qu'a permis de réaliser le système de M. Jablochhoff est la *division* de la lumière électrique. Avec les régulateurs comme celui de Foucault ou ses modifications, lorsque deux appareils sont placés dans un même circuit, il suffit que l'un des arcs s'allonge, pour que les électro-aimants des deux appareils entrent en action : il en résulte que le second arc, qui avait sa longueur normale, se raccourcit en même temps que le premier, c'est-à-dire que le réglage du premier appareil aboutit à un dérèglement du second, et réciproquement, en sorte que le fonctionnement de l'un et de l'autre devient impossible. — Avec le système de M. Jablochhoff, pourvu que la source ait une tension suffisante pour franchir plusieurs arcs successifs, on peut placer, dans un même circuit, plusieurs bougies séparées par des distances considérables (\*).

(\*) Une bougie Jablochhoff, fonctionnant normalement, doit avoir une intensité lumineuse de 40 carcel (liv. V, chap. 1). — Pour qu'il en soit ainsi, le courant doit avoir une intensité de 8 à 9 ampères, et la différence de potentiel aux deux bornes de la bougie doit être égale à 42 volts. Quant à l'énergie dépensée par le courant pour la production de cette quantité de lumière, elle est égale au produit  $i \times V \times 10^7$  ergs (576), soit environ  $360 \times 10^7$  ergs. La dépense, par carcel, est donc de  $9 \times 10^7$  ergs.

Pour éviter l'usure inégale des deux charbons, il faut employer des machines à courants alternatifs, comme la machine de l'Alliance (648), ou la machine Gramme (652).

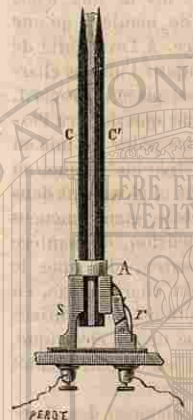


Fig. 508. — Bougie de M. Jablochhoff.

659. **Brûleur électrique de Jamin.** — En conservant le parallélisme des charbons, comme dans la bougie Jablochhoff, Jamin a eu l'idée (mars 1879) de supprimer la matière isolante qui les sépare, et d'employer, pour fixer l'arc électrique aux extrémités des charbons, l'action exercée, sur ce conducteur de nature particulière, par un cadre de fils métalliques, disposé à peu près comme le cadre d'un galvanomètre. En effet, si le courant a les directions indiquées par les flèches de la figure 509, on voit, en se reportant aux lois des courants parallèles et aux lois des courants angulaires (598 et 599), que les quatre parties du cadre, MN, NP, PQ, QM, doivent exercer des actions concordantes pour transporter et maintenir le petit courant mobile qui constitue l'arc, à la pointe des baguettes de charbon. — L'appareil, auquel M. Jamin donne le nom de *brûleur*, peut être placé des pointes en bas, et c'est même la disposition la plus favorable ; en même temps que le courant d'air chaud tend à courber l'arc vers le haut, l'action électrodynamique tend alors à le courber vers le bas, en sorte qu'il devient à peu près rectiligne, par conséquent plus court et moins résistant, et le nombre des foyers interposés dans un même circuit peut être augmenté. Enfin, cette dernière disposition présente, au point de vue des applications à l'éclairage, l'avantage de supprimer l'ombre portée par l'appareil : la plus grande partie de la lumière est dirigée vers le sol, au lieu de se perdre vers le ciel.

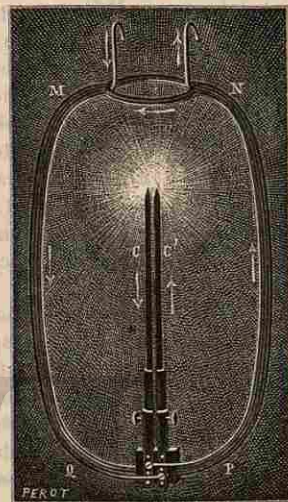


Fig. 509. — Brûleur de M. Jamin.

660. **Éclairage par un fil conducteur porté à l'incandescence.** — **Système Edison.** — L'Exposition d'électricité qui a eu lieu en 1881, a fait connaître en France un mode d'éclairage électrique tout différent, qui permet de multiplier beaucoup les foyers de lumière en donnant à chacun d'eux moins d'intensité. On évite, par cette répartition, les inconvénients que présente parfois l'éclat éblouissant des systèmes d'éclairage précédents.

Dans la disposition imaginée par M. Edison, de New-York, le courant passe dans un fil de charbon C (fig. 510), de la grosseur d'un crin de cheval, placé dans un petit globe de verre A dans lequel on a fait un vide parfait. Ce fil a été obtenu par la carbonisation d'un filament découpé dans une tige de bambou : il est recourbé et fixé par ses extrémités à deux fils de platine, isolés l'un de l'autre, qui servent de conducteurs. — Le fil de charbon, porté à une vive incandescence par

le courant, produit une lumière d'un jaune doré. Si le vide a été bien fait dans le globe de verre, le charbon ne brûle pas, puisqu'il ne trouve pas d'oxygène dans l'espace qui l'entoure (\*).



Fig. 510.  
Lampe  
Edison.



Fig. 511.  
Lampe  
Maxim.

On a imaginé un grand nombre de dispositions analogues à la précédente. — La figure 511 représente la *lampe Maxim*, dans laquelle le fil de charbon est plusieurs fois replié sur lui-même; il provient de la carbonisation d'une bande mince de carton bristol. Le globe a été rempli d'un gaz hydrocarboné, dans lequel la combustion ne peut s'effectuer. Une clef, placée à la base du globe, et présentant la forme du robinet d'un bec de gaz, permet d'établir ou d'interrompre le courant, de manière à allumer ou à éteindre la lampe.

Ces systèmes, et un grand nombre d'autres qui n'en diffèrent que par des détails, peuvent être disposés de manière à former des candélabres ou des lustres, et à satisfaire aux diverses exigences de l'éclairage, dans des locaux plus ou moins vastes. — Les courants destinés à alimenter ces foyers de lumière peuvent être produits, soit par des accumulateurs (558), soit par des machines de Gramme (651 et 652) ou par d'autres machines dynamo-électriques (\*\*).

(\*) L'expérience a montré cependant que la durée d'un même fil n'est pas indéfinie quand il a fonctionné, à divers intervalles, pendant 600 à 900 heures, il éprouve une désorganisation qui en détermine la rupture; il faut alors le renouveler.

(\*\*) On construit deux types de lampe Edison, dont les intensités lumineuses sont respectivement 2 carcel et 1 carcel (liv. V, chap. 1). — Ces lampes exigent un courant de 0<sup>m</sup>,65; pour la lampe de grand calibre, la différence des potentiels aux deux bornes, et la résistance du fil de charbon (quand la lampe est allumée) sont respectivement 90 volts et 140 ohms; pour le petit modèle, ces deux quantités sont réduites de moitié. — L'énergie dépensée par le courant pour produire 2 carcel, dans la lampe de grand calibre, est donnée par l'expression  $W = i \times V \times 10^7$  ergs (576); elle est représentée par  $58,5 \times 10^7$  ergs. — La dépense d'énergie, par carcel, est donc  $29 \times 10^7$  ergs.

Il en résulte que l'éclairage par les lampes à incandescence est plus coûteux que l'éclairage par l'arc voltaïque. En effet, en se reportant aux notes des pages 564 et 568, on voit que la dépense d'énergie, par carcel et par seconde, est :

- 29 × 10<sup>7</sup> ergs, pour les lampes Edison;
- 9 × 10<sup>7</sup> ergs, pour les bougies Jablochhoff;
- 7,5 × 10<sup>7</sup> ergs, pour les lampes à régulateur.

Le prix de revient de l'éclairage électrique est donc d'autant plus élevé que la lumière est répartie en un plus grand nombre de foyers.

## LIVRE QUATRIÈME

### ACOUSTIQUE

#### CHAPITRE PREMIER

##### PRODUCTION ET PROPAGATION DU SON

###### I. — PRODUCTION DU SON.

661. **Production du son en général.** — Un son quelconque est toujours produit par un mouvement vibratoire, imprimé à un corps matériel.

Ainsi, quand un verre à boire est ébranlé par un choc, il produit un son : si l'on applique le doigt sur le bord du verre, on sent une sorte de frémissement, que l'on exprime en disant que le verre *vibre*. Dès que le contact du doigt fait cesser la vibration, on entend le son s'éteindre.

Prenons de même un *diapason* (fig. 512), et faisons-lui rendre un son, en écartant ses deux branches avec



Fig. 512. — Diapason.

une tige de bois et la faisant sortir vivement par l'extrémité de la fourche. Si nous appliquons le doigt sur l'une des branches, nous sentons le diapason vibrer : ici encore, le son s'éteint dès que la vibration cesse.

Les sons produits par les tuyaux d'orgue, résultent également d'un

le courant, produit une lumière d'un jaune doré. Si le vide a été bien fait dans le globe de verre, le charbon ne brûle pas, puisqu'il ne trouve pas d'oxygène dans l'espace qui l'entoure (\*).



Fig. 510.  
Lampe  
Edison.

Fig. 511.  
Lampe  
Maxim.

On a imaginé un grand nombre de dispositions analogues à la précédente. — La figure 511 représente la *lampe Maxim*, dans laquelle le fil de charbon est plusieurs fois replié sur lui-même; il provient de la carbonisation d'une bande mince de carton bristol. Le globe a été rempli d'un gaz hydrocarboné, dans lequel la combustion ne peut s'effectuer. Une clef, placée à la base du globe, et présentant la forme du robinet d'un bec de gaz, permet d'établir ou d'interrompre le courant, de manière à allumer ou à éteindre la lampe.

Ces systèmes, et un grand nombre d'autres qui n'en diffèrent que par des détails, peuvent être disposés de manière à former des candélabres ou des lustres, et à satisfaire aux diverses exigences de l'éclairage, dans des locaux plus ou moins vastes. — Les courants destinés à alimenter ces foyers de lumière peuvent être produits, soit par des accumulateurs (558), soit par des machines de Gramme (651 et 652) ou par d'autres machines dynamo-électriques (\*\*).

(\*) L'expérience a montré cependant que la durée d'un même fil n'est pas indéfinie quand il a fonctionné, à divers intervalles, pendant 600 à 900 heures, il éprouve une désorganisation qui en détermine la rupture; il faut alors le renouveler.

(\*\*) On construit deux types de lampe Edison, dont les intensités lumineuses sont respectivement 2 carcel et 1 carcel (liv. V, chap. 1). — Ces lampes exigent un courant de 0<sup>m</sup>,65; pour la lampe de grand calibre, la différence des potentiels aux deux bornes, et la résistance du fil de charbon (quand la lampe est allumée) sont respectivement 90 volts et 140 ohms; pour le petit modèle, ces deux quantités sont réduites de moitié. — L'énergie dépensée par le courant pour produire 2 carcel, dans la lampe de grand calibre, est donnée par l'expression  $W = i \times V \times 10^7$  ergs (576); elle est représentée par  $58,5 \times 10^7$  ergs. — La dépense d'énergie, par carcel, est donc  $29 \times 10^7$  ergs.

Il en résulte que l'éclairage par les lampes à incandescence est plus coûteux que l'éclairage par l'arc voltaïque. En effet, en se reportant aux notes des pages 564 et 568, on voit que la dépense d'énergie, par carcel et par seconde, est :

- 29 × 10<sup>7</sup> ergs, pour les lampes Edison;
- 9 × 10<sup>7</sup> ergs, pour les bougies Jablochkoff;
- 7,5 × 10<sup>7</sup> ergs, pour les lampes à régulateur.

Le prix de revient de l'éclairage électrique est donc d'autant plus élevé que la lumière est répartie en un plus grand nombre de foyers.

## LIVRE QUATRIÈME

### ACOUSTIQUE

#### CHAPITRE PREMIER

##### PRODUCTION ET PROPAGATION DU SON

###### I. — PRODUCTION DU SON.

661. **Production du son en général.** — Un son quelconque est toujours produit par un mouvement vibratoire, imprimé à un corps matériel.

Ainsi, quand un verre à boire est ébranlé par un choc, il produit un son : si l'on applique le doigt sur le bord du verre, on sent une sorte de frémissement, que l'on exprime en disant que le verre *vibre*. Dès que le contact du doigt fait cesser la vibration, on entend le son s'éteindre.

Prenons de même un *diapason* (fig. 512), et faisons-lui rendre un son, en écartant ses deux branches avec



Fig. 512. — Diapason.

une tige de bois et la faisant sortir vivement par l'extrémité de la fourche. Si nous appliquons le doigt sur l'une des branches, nous sentons le diapason vibrer : ici encore, le son s'éteint dès que la vibration cesse.

Les sons produits par les tuyaux d'orgue, résultent également d'un

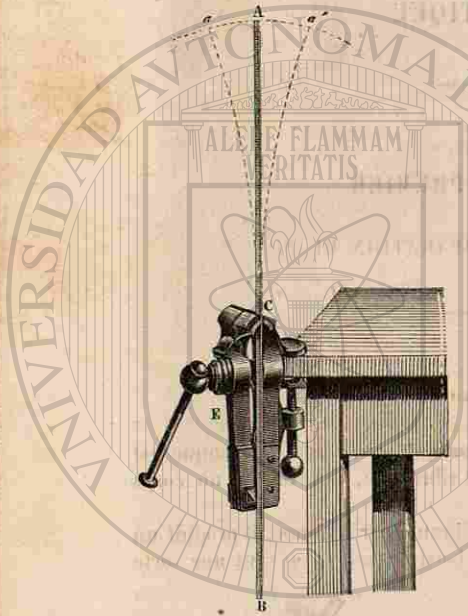
mouvement vibratoire. Nous verrons que ce mouvement réside dans la masse d'air que contient le tuyau.

662. **Mouvement vibratoire.** — Pour nous faire une idée plus précise des mouvements qui produisent les sons, fixons dans un étau une lame d'acier AC (fig. 515), et laissons d'abord une assez grande longueur à la partie située au-dessus de l'étau. Si nous l'écartons avec le doigt, de manière à l'amener dans la position Ca, et si nous l'abandonnons, nous la voyons exécuter une série de mouvements, de part et d'autre de sa position d'équilibre; elle va de la position Ca à la position symétrique Ca', revient en Ca, et ainsi de suite. La succession d'une allée et d'une venue de la lame est ce que nous appellerons une *vibration*. — Or, si nous répétons plusieurs fois l'expérience, en raccourcissant à chaque fois la partie vibrante, nous voyons les vibrations devenir de plus en plus rapides. Tant qu'elles étaient assez lentes, nous pouvions les suivre des yeux; quand elles sont plus rapides, nous cessons de distinguer les allées et venues; mais l'extrémité libre de la lame nous paraît éprouver une sorte de gonflement, qui est dû à ce que notre œil l'aperçoit à la fois dans toutes les positions qu'elle occupe successivement entre Ca et Ca'. — Enfin, lorsque les vibrations deviennent suffisamment rapides, nous entendons un son, et la lame présente encore la même apparence.

Fig. 515. — Mouvement vibratoire d'une lame d'acier.

Le *mouvement vibratoire* qui produit le son consiste donc en une succession d'allées et venues des points vibrants, de part et d'autre de leur position d'équilibre. Ce mouvement est trop rapide pour que notre œil puisse le suivre: il ne peut que le constater par des apparences comme celles que nous venons d'indiquer.

On peut faire des observations semblables sur une corde blanche, tendue au-dessus d'une planche noire entre deux chevalets A et B (fig. 514); on règle la tension de cette corde, au moyen d'une cheville sur laquelle elle s'enroule à l'une de ses extrémités. — Si la corde est peu tendue, et si on l'écarte avec le doigt, l'œil distingue les allées et



venues, de part et d'autre de la position d'équilibre. A mesure qu'on augmente la tension, les vibrations deviennent plus rapides; on n'observe bientôt plus qu'un gonflement apparent, sensible surtout vers le milieu de la corde. Enfin, on entend un son, lorsque les vibrations deviennent suffisamment rapides.

665. **Caractères distinctifs des sons. Intensité, hauteur, timbre.** — Nous étudierons plus loin, avec quelques détails, les caractères qui distinguent entre eux les divers sons. Mais nous pouvons dès maintenant, au moyen des expériences précédentes, préciser les conditions du mouvement qui correspondent à chacun de ces caractères.

Revenons à l'expérience de la lame vibrante (fig. 515), et après avoir donné à la lame une longueur assez petite pour qu'elle puisse rendre un son, laissons cette longueur invariable. Selon que nous écartons plus ou moins la lame, elle rend un son plus ou moins fort; mais il est facile de constater qu'elle donne toujours la même note musicale: elle la donne seulement avec plus ou moins d'intensité. — On peut donc dire que l'intensité du son dépend de l'amplitude des vibrations, c'est-à-dire de la grandeur des allées et venues de la lame, entre ses positions extrêmes Ca et Ca' (\*).

De quoi dépend maintenant la hauteur du son, c'est-à-dire le caractère musical qu'on exprime en disant qu'une note est plus haute qu'une autre? — Nous avons constaté que la lame vibrante, lorsqu'on la raccourcit, produit des vibrations de plus en plus rapides. Or, en procédant ainsi, on obtient des sons dont la hauteur est de plus en plus grande. — La hauteur musicale du son dépend donc de la rapidité des vibrations: la hauteur est d'autant plus grande, qu'il se produit un plus grand nombre de vibrations en un même temps (\*\*).

Enfin deux sons de même hauteur et de même intensité peuvent différer par un troisième caractère, qu'on nomme le timbre. C'est par la différence des timbres qu'on distinguera toujours, par exemple, les

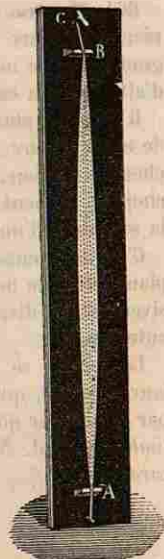


Fig. 514. — Vibration transversale d'une corde.

(\*) On peut remarquer encore que, si on laisse les vibrations se continuer quelque temps, l'intensité du son diminue progressivement, à mesure que l'amplitude diminue elle-même. — Les mêmes observations peuvent être faites sur la corde vibrante (fig. 514).

(\*\*) Il en est de même avec la corde vibrante. Nous savons déjà que, si l'on augmente la tension de la corde, on rend ses vibrations plus rapides. Or, en augmentant la tension, on obtient des sons de plus en plus élevés. Donc, ici encore, la hauteur du son dépend du nombre des vibrations qui se produisent en un temps déterminé.

sons d'une trompette de ceux d'un violon. Les causes des différences de timbres sont complexes; nous y reviendrons plus loin (Chap. V).

664. **Bruits.** — Le choc d'un marteau sur une planche ou sur une pierre ne nous fait éprouver qu'une sensation vague, que nous désignons sous le nom de *bruit*, et à laquelle il paraît d'abord difficile d'attribuer un caractère de hauteur musicale.

Il n'en est plus de même, si nous comparons entre eux des bruits de même nature. — Ainsi, en laissant tomber sur le sol de petites planchettes de bois, dont les dimensions auront été convenablement choisies, on peut obtenir une série de bruits, donnant à l'oreille soit la sensation d'une gamme, soit celle d'un accord parfait.

C'est ainsi encore que l'on construit des *harmonicas* formés par des planchettes de bois, placées sur deux fils tendus; en frappant successivement les diverses planchettes avec un petit marteau, on peut exécuter un air.

Les bruits se distinguent donc entre eux, comme les sons, par leur *intensité*, qui dépend de l'amplitude du mouvement vibratoire; par la *hauteur* qui dépend de la rapidité des vibrations; enfin par un *timbre* spécial. Nous reviendrons plus loin (719, 5<sup>e</sup>) sur ce dernier caractère.

II. — PROPAGATION DU SON.

665. **Mode de propagation du son dans l'air. — Ondes sonores.** — Quand un corps sonore est mis en vibration dans l'atmosphère, les mouvements qu'il exécute se communiquent à l'air qui l'environne, et parviennent ainsi jusqu'à notre oreille.

Pour se rendre compte de la manière dont s'effectue cette transmission du mouvement vibratoire, il suffit d'observer ce qui se produit à la surface d'une eau tranquille, lorsqu'on y laisse tomber une pierre. Le choc de la pierre donne naissance à une petite vague, de forme circulaire, qui s'éloigne progressivement du point où elle s'est formée. — Si maintenant on produit, à la surface de l'eau, avec l'extrémité d'un bâton, une série de chocs se succédant à intervalles réguliers, la succession de ces mouvements produit une succession de vagues semblables, courant les unes à la suite des autres, autour du point où elles se forment. — Cependant, si l'on regarde avec attention un petit corps flottant à la surface de l'eau, comme un bouchon ou un brin de paille, on voit qu'il est soulevé chaque fois qu'il est rencontré par une vague, mais qu'il reste toujours sensiblement à la même place. Cette observation montre que les ébranlements communiqués à l'eau ont pour effet d'imprimer à chacun de ces points un mouvement de va-et-vient, semblable à celui du point d'où partent les ébranle-

ments eux-mêmes, mais qu'il n'y a pas transport de l'eau d'un bord vers l'autre.

Ce phénomène est l'image de ce qui se produit dans l'atmosphère, autour d'un corps sonore; chacun des mouvements exécutés par le corps se communique successivement, et de proche en proche, à l'air qui l'environne. On donne, par analogie, le nom d'*ondes sonores*, aux couches d'air ébranlées à la suite les unes des autres, autour du point où se produisent les vibrations. — Dans la production de ces ondes, il n'y a pas transport de la masse d'air: chacun des points ébranlés exécute simplement de petits mouvements de *va-et-vient*, semblables à ceux qui constituent le mouvement vibratoire du corps sonore lui-même. — Enfin, notre oreille perçoit le son, par le mouvement vibratoire transmis à la couche d'air qui est en contact avec elle.

Nous reviendrons plus loin (675 et 674), avec un peu plus de détails, sur la production des ondes sonores, et sur le mode de constitution de chacune d'elles.

666. **Le son ne se propage pas dans le vide.** — Lorsqu'un corps est mis en vibration dans le vide, ses vibrations ne peuvent plus se transmettre à notre oreille. On le démontre en prenant un ballon de verre (fig. 515), dans lequel se trouve une clochette suspendue par un fil. Quand le ballon contient de l'air à la pression ordinaire, il suffit de l'agiter, pour entendre le son de la clochette: les vibrations sont transmises, par l'air du ballon, à la paroi de verre; puis, par la paroi de verre, à l'air environnant, et enfin à notre oreille. — Si l'on fait le vide dans le ballon, on n'entend plus le son de la clochette. — Si l'on ouvre progressivement le robinet du ballon, de manière à y laisser rentrer lentement l'air, on constate que le son, d'abord très faible, reprend son intensité primitive lorsque la pression de l'air dans le ballon a repris sa première valeur.

Cette dernière remarque montre que l'air, lorsqu'il est raréfié, transmet le son avec moins d'intensité que lorsqu'il est à la pression ordinaire. — Au sommet des hautes montagnes, où la pression de l'air est bien moindre que dans la plaine, le son de la voix est affaibli. Les mêmes observations ont été faites dans les ascensions en ballon, à de grandes hauteurs dans l'atmosphère.

667. **Propagation du son par les liquides et par les solides.** — Les *liquides* peuvent transmettre les vibrations sonores. Un ouvrier placé au fond de l'eau, dans une cloche à plongeur, entend les bruits

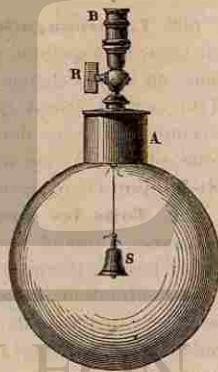


Fig. 515.  
Le son ne se propage pas dans le vide.



qui se produisent sur le rivage. L'observation montre aussi que les poissons entendent les bruits qui se produisent autour d'eux.

Les corps *solides* transmettent aussi les sons : ils les transmettent même, en général, beaucoup mieux que l'air. — En appliquant l'oreille à l'extrémité d'une longue poutre, on entend distinctement les choes produits, à l'autre extrémité, par une pointe d'épingle, ou le tic-tac d'une montre placée contre la poutre. — En appliquant l'oreille sur le sol, on entend, à plusieurs kilomètres de distance, le roulement d'une voiture. — On peut entendre ainsi une décharge d'artillerie, à des distances où l'air n'en apporte plus aucun bruit perceptible (\*).

Cependant les corps mous, comme les draperies, l'étoffe, le coton cardé, transmettent si imparfaitement les mouvements vibratoires, qu'on peut les employer pour amortir les sons. — C'est ce qui explique l'usage que l'on fait des portières en étoffe ou des portes rembourrées, pour empêcher d'entendre, dans une pièce, ce qui se dit dans la pièce voisine.

### III. — VITESSE DE PROPAGATION DU SON.

668. **La propagation du son n'est pas instantanée.** — Quand on regarde, à quelque distance, un bûcheron frappant sur une pièce de bois, on voit la cognée arriver sur le bois, et c'est seulement au bout d'un certain temps qu'on entend le bruit du coup. L'intervalle qui s'écoule, entre ces deux instants, est d'autant plus long que l'observateur est placé à une distance plus grande. — On peut faire la même observation en regardant des chasseurs tirer dans la plaine.

669. **Tous les sons se propagent dans l'air avec la même vitesse.** — Quand nous entendons, de loin, un morceau exécuté par un orchestre, il conserve pour notre oreille le même caractère que si nous l'entendions de près. Les notes qui sont produites ensemble, par les divers instruments, nous arrivent ensemble : les notes qui se succèdent, dans un certain ordre et suivant une certaine mesure, nous arrivent dans le même ordre et avec la même mesure. — Ces observations montrent que tous les sons, quelle que soit leur hauteur, leur intensité ou leur timbre, se propagent dans l'air avec la même vitesse.

Dès lors, pour étudier la propagation du son, on peut employer un son quelconque. — On a choisi, comme nous allons le voir, un son qui

(\*) Voici encore une expérience que chacun peut répéter. On place entre ses dents la queue d'une montre, et on applique les mains sur ses deux oreilles, de manière à les boucher hermétiquement. On entend le tic-tac de la montre, transmis par les dents et par les os de la tête. — On peut faire entendre des paroles à certains sourds, en employant une feuille de carton dont ils serrent le bord entre les dents, et en émettant fortement la voix contre cette feuille.

pût être entendu à une très grande distance, afin que le temps écoulé, entre le moment de sa production et le moment de son arrivée, fût assez long pour être facilement mesurable.

670. **Le mouvement de propagation du son est un mouvement uniforme.** — Dès l'année 1758, des expériences avaient été entreprises, par une Commission de l'Académie des sciences, pour mesurer la vitesse du son dans l'air. Une pièce de canon ayant été placée sur un lieu élevé, des observateurs situés à diverses distances déterminaient les intervalles de temps qui s'écoulaient, entre l'instant où ils apercevaient la lueur du coup de canon et celui où le son leur parvenait. — Dans ces expériences, on avait négligé quelques causes d'erreurs, dont on reconnut plus tard l'influence. Mais elles servirent au moins à constater que le son met un temps double, triple, quadruple, pour parcourir une distance double, triple, quadruple, c'est-à-dire que le mouvement de propagation du son est un *mouvement uniforme*.

Nous appellerons *vitesse du son*, l'espace (exprimé en mètres) que parcourt le son en une seconde.

671. **Détermination de la vitesse du son dans l'air.** — En 1822, le Bureau des longitudes reprit la détermination de la vitesse du son dans l'air, en cherchant à introduire dans les expériences toute la précision possible.

Les observateurs s'étaient partagés en deux groupes, placés, l'un sur les hauteurs de Villejuif, l'autre sur les hauteurs de Montlhéry; une pièce de canon était disposée à chacune de ces deux stations. Les observations furent faites pendant la nuit, de la manière suivante. — Un coup de canon étant tiré à Villejuif, les observateurs placés à Montlhéry déterminaient, avec une montre à secondes, l'intervalle de temps qui s'écoulait entre le moment où ils apercevaient de la lumière et le moment où ils entendaient la détonation : la lumière pouvant être considérée comme franchissant une distance de quelques kilomètres en un temps tout à fait négligeable, l'intervalle que l'on avait observé mesurait le temps nécessaire à la transmission du son, d'une station à l'autre. — Mais, comme la direction du vent pouvait avoir une influence sur la vitesse de transmission, on recommençait l'expérience en sens inverse, c'est-à-dire qu'on tirait ensuite un coup de canon à Montlhéry, et les observateurs placés à Villejuif effectuaient une détermination semblable. — On répéta plusieurs fois l'expérience, les deux stations alternant toujours entre elles; enfin, on prit la moyenne des résultats obtenus.

On trouva ainsi que le son mettait à peu près 55 secondes pour parcourir la distance d'environ 18 700 mètres. — Pour obtenir la valeur de la *vitesse du son*, c'est-à-dire l'espace parcouru en *une seconde*, il suffisait de diviser 18 700 mètres par 55, ce qui donne

540 mètres.

Cette vitesse, de 340 mètres par seconde, se rapporte aux conditions dans lesquelles se trouvait l'air au moment des expériences. La température était d'environ 15°, et la pression était voisine de la pression normale : ce sont donc les conditions les plus ordinaires. — Des expériences plus récentes de Regnault, effectuées dans des conditions très variées, ont montré que la vitesse du son augmente ou diminue, dans le même sens que la température, d'environ 0<sup>m</sup>,6 pour un degré. — Il en résulte que, à la température de 0°, la vitesse du son est

$$340^m - 0^m,6 \times 15, \text{ c'est-dire } 331 \text{ mètres } (*).$$

672. **Vitesse du son dans les liquides et dans les solides.** — En 1827, Sturm et Colladon, par une méthode semblable à la précé-

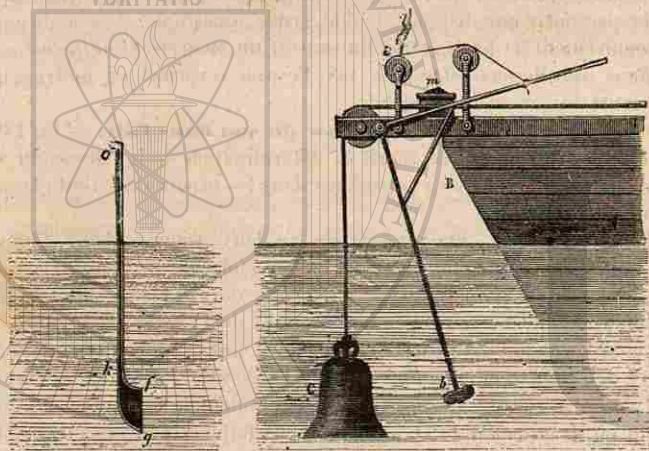


Fig. 516. — Détermination de la vitesse du son dans l'eau.

dente, mesurèrent la vitesse de propagation du son dans l'eau. — Des expériences furent faites sur le lac de Genève. Une cloche C (fig. 516),

(\*) Pour déduire de la vitesse  $v$ , observée à la température  $t$ , la vitesse  $v_0$  à la température zéro, on peut employer la formule suivante, qui a été donnée par Newton

$$v_0 = \frac{v}{\sqrt{1 + \alpha t}}$$

formule dans laquelle  $\alpha$  représente le coefficient [de dilatation de l'air. En remplaçant, dans les expériences du Bureau des longitudes,  $v$  par sa valeur 340<sup>m</sup>,9,  $\alpha$  par 0,00507 et  $t$  par 16°, on trouve  $v_0 = 331^m,3$ . — Les expériences effectuées par Regnault, dans la plaine de Satory, ont fourni, pour la vitesse de propagation du son dans l'air, à la température zéro, la valeur moyenne 330<sup>m</sup>,5.

Inversement, connaissant la vitesse  $v_0$ , la formule de Newton permet de trouver la vitesse  $v$  à une température quelconque  $t$ .

suspendue à un bateau B et plongée dans l'eau du lac, était frappée par un marteau  $b$  dont le manche sortait de l'eau; au moment même où le choc avait lieu, le mouvement du marteau produisait l'inflammation d'une certaine quantité de poudre, placée en  $m$ . Au rivage opposé, on notait l'instant où l'on apercevait la lumière, et l'instant où arrivait le son transmis par l'eau; ce son était perçu à l'aide d'une sorte de *cornet acoustique*, fermé en  $fg$  par une membrane, et à l'extrémité supérieure  $o$  duquel on appliquait l'oreille. — On trouva, pour la vitesse de propagation du son dans l'eau, à la température de 8°, le nombre 1455 mètres par seconde; c'est une vitesse environ quatre fois plus grande que dans l'air.

On doit à Biot la détermination expérimentale de la vitesse du son dans la fonte de fer. — Un timbre avait été fixé à l'extrémité d'une conduite formée par des tuyaux de fonte (\*), dont la longueur était de 951<sup>m</sup>,25. Un des expérimentateurs frappait un coup sur le timbre, à un certain instant. Un autre expérimentateur appliquait son oreille à l'autre extrémité de la conduite; il entendait distinctement, à 2 secondes et demie d'intervalle, deux sons successifs, le premier transmis par le métal, le second transmis par l'air intérieur. — En désignant respectivement par  $a$  et  $x$  les vitesses du son dans l'air et dans la fonte,  $\frac{951,25}{a}$  et  $\frac{951,25}{x}$  représentaient les durées de la transmission par l'air et par le métal; on avait donc

$$\frac{951,25}{a} - \frac{951,25}{x} = 2,5.$$

En résolvant cette équation, on trouve  $x = a \times 10,5$ ; c'est-à-dire que le son se propage dix fois et demie aussi vite dans la fonte que dans l'air.

On verra plus loin comment on a pu déterminer les vitesses du son dans les divers gaz (701), dans les liquides (702) et dans les corps solides (712), par une méthode indirecte, fondée sur les lois des vibrations des tuyaux sonores ou des verges élastiques.

675. **Propagation du son dans un tuyau cylindrique indéfini.** — **Longueur d'onde.** — Nous pouvons maintenant concevoir, d'une manière plus précise, comment s'effectue la propagation du mouvement vibratoire dans un milieu comme l'air. — Nous considérerons d'abord, pour simplifier, le cas où la propagation a lieu, non pas dans un espace indéfini en tous sens, mais dans un tuyau cylindrique (fig. 517), que nous supposerons indéfini vers la droite, et à l'entrée duquel une lame solide A exécutera une série de vibrations entre deux

(\*) Ces tuyaux venaient d'être établis pour amener à Paris les eaux de la source d'Arcueil.

positions extrêmes  $a$  et  $a'$ , d'un mouvement semblable à celui de l'extrémité de la lame représentée par la figure 515. — Nous appellerons toujours *vibration*, la succession de deux oscillations en sens inverse, c'est-à-dire le mouvement *d'allée* et de *retour*.

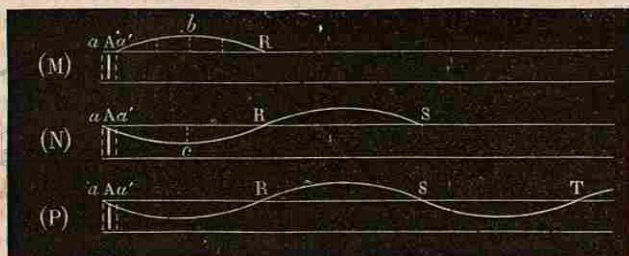


Fig. 517.

Voyons d'abord ce qui se passe dans le tuyau pendant la *première demi-vibration*, de  $a$  en  $a'$  (fig. 517, M). — La vitesse de la lame solide, d'abord très petite en partant de  $a$ , va en croissant jusqu'à la position moyenne  $A$ , et en décroissant ensuite jusqu'en  $a'$ . Pendant ce mouvement, la lame peut être considérée comme imprimant, à la tranche d'air qui est en contact avec elle, une série d'ébranlements dont chacun se transmet, avec une vitesse égale à la vitesse de propagation du son, aux tranches successives du tuyau. Or, à l'instant où la lame arrive en  $a'$ , l'ébranlement *initial* est parvenu à une tranche d'air située en  $R$ , par exemple; l'ébranlement *final* est encore en  $a'$ ; les ébranlements correspondants aux positions intermédiaires de la lame se trouvent dans les tranches d'air situées entre  $a'$  et  $R$ . Donc, à cet instant, la vitesse d'ébranlement est sensiblement nulle en  $a'$  et en  $R$ ; elle est maximum au milieu de cet intervalle. — Enfin, à l'instant que nous considérons, chacune de ces tranches d'air, par le fait même de l'ébranlement qui lui est imprimé dans le sens de la propagation du son, éprouve aussi une *compression* : la compression est sensiblement nulle en  $a'$  et en  $R$ ; elle est maximum au milieu de cet intervalle. Si l'on représente la valeur de la compression, dans chaque tranche, par une perpendiculaire élevée sur l'arête du tuyau, la courbe qui joindra les extrémités de ces perpendiculaires présentera une forme telle que  $a'BR$ . Cette courbe peut être considérée comme représentant aussi la loi de variation des vitesses d'ébranlement, entre  $a'$  et  $R$ . — La colonne d'air, de longueur  $a'R$ , à laquelle s'est communiquée le mouvement de la lame pendant la durée de cette demi-vibration, s'appelle une *demi-onde condensée*. La distance  $a'R$  s'appelle la *demi-longueur d'onde* (\*).

(\*) Il est essentiel de remarquer que ce sont les vitesses d'ébranlement et les com-

Voyons maintenant ce qui se passe pendant la *seconde demi-vibration*, de  $a'$  en  $a$  (fig. 517, N). — La tranche d'air qui est en contact avec la lame, du côté du tuyau, reçoit une série d'ébranlements, qui sont maintenant dirigés vers la gauche, en sens inverse de la propagation du son, et dont chacun produit une *dilatation*. Chacun de ces ébranlements se transmet encore aux tranches d'air successives, avec une vitesse égale à la vitesse de propagation du son. D'où il résulte que, à l'instant où la lame solide revient en  $a$ , l'ébranlement *initial* de cette seconde demi-vibration parvient en  $R$ , à une distance égale à la demi-longueur d'onde, et la colonne d'air  $aR$  contient une *demi-onde dilatée* : les dilatations ou les vitesses d'ébranlement, dans les tranches successives, peuvent être représentées par la branche de courbe  $aCR$ , située au-dessous de la droite  $aR$ . — D'ailleurs, pendant la durée de cette seconde demi-vibration, les ébranlements produits par la première ont continué à se transmettre dans le tuyau, sur une longueur  $RS$  égale à la demi-longueur d'onde. — En d'autres termes, après une vibration complète de la lame solide, on trouve, dans le tuyau, une onde entière  $aS$ , formée d'une demi-onde dilatée et d'une demi-onde condensée, et représentée par la courbe  $aCRS$ . — La distance  $aS$  est ce qu'on appelle la *longueur d'onde*.

Après un nombre entier quelconque de vibrations complètes, il se sera produit de même une série d'ondes, formées de demi-ondes alternativement dilatées et condensées, celles-ci se succédant toujours dans le même ordre (fig. 517, P).

Il est aisé de voir, d'après cela, qu'une tranche d'air quelconque, dans le tuyau, vibre comme la lame solide elle-même. — En effet, quand la lame solide vibre d'une manière continue, on peut se représenter l'état de l'air dans le tuyau, aux instants successifs, en imagi-



Fig. 518.

nant que la courbe  $ARST$  (fig. 518), dont les diverses parties se reproduisent progressivement d'une manière toujours identique, se transporte d'un mouvement continu vers la droite, avec une vitesse égale à la vitesse de propagation du son. Or, considérons une tranche quelconque

pressions qui se déplacent, dans la longueur du tuyau, et non les tranches d'air. Chaque tranche ne se déplace que d'une quantité très petite, pour transmettre à la tranche suivante la compression qu'elle a reçue de la tranche qui la précède.

du tuyau. La figure 518 représente la position de la courbe au moment où parvient en K une demi-onde condensée. Pendant tout le temps que cette demi-onde met à traverser la tranche K, c'est-à-dire pendant la durée d'une demi-vibration de la lame solide, cette tranche acquiert des vitesses d'ébranlement d'abord croissantes, puis décroissantes, mais toujours dirigées vers la droite. Une demi-onde dilatée arrive ensuite en K : elle emploie encore le même temps pour traverser cette tranche, qui acquiert alors des vitesses d'ébranlement d'abord croissantes, puis décroissantes, mais dirigées vers la gauche; et ainsi de suite. — Donc, en définitive, une tranche d'air quelconque, prise dans le tuyau, vibre comme la lame solide, entre deux positions extrêmes, peu distantes l'une de l'autre. La durée d'une vibration de cette tranche est égale à la durée d'une vibration de la lame solide.

**674. Propagation du son dans un milieu indéfini en tous sens. — Diminution progressive d'intensité.** — Lorsque le

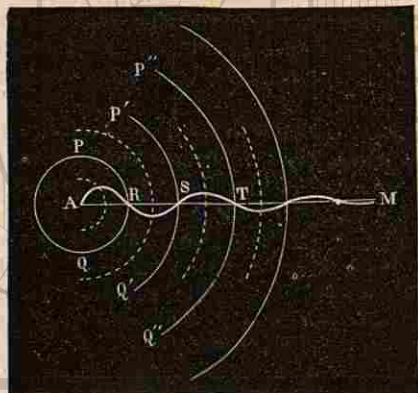


Fig. 519. — Propagation d'un mouvement vibratoire dans un espace indéfini en tous sens.

mouvement vibratoire se produit dans un milieu indéfini en tous sens, comme l'atmosphère, la transmission du mouvement s'effectue dans toutes les directions, avec la même vitesse que dans un tuyau cylindrique. — Dès lors, si A est le point d'où émanent les vibrations (fig. 519), le mouvement se communique, pendant la durée d'une demi-vibration, à l'air compris dans une sphère PQ ayant pour centre A et pour rayon la demi-longueur d'onde. Puis, pendant la demi-vibration suivante, cette même sphère reçoit les mouvements correspondants à cette seconde demi-vibration, en même temps que les mouvements correspondants à la première se propagent dans l'espace compris entre la surface PQ et la surface P'Q' d'une sphère de rayon double; et ainsi de suite. — Or les volumes d'air compris entre les surfaces sphériques consécutives PQ, P'Q', P''Q'', ..., vont en augmentant : il en résulte que les amplitudes des mouvements vibratoires acquis par les couches d'air successives vont en diminuant : par suite, l'intensité du son va en décroissant, à mesure qu'on s'éloigne du point A où il se produit. Si l'on considère une droite indéfinie quelconque AM, partant du point A,

la courbe ARST..., qui représente, à un instant déterminé, soit les vitesses d'ébranlement, soit les compressions ou les dilatations aux différents points de cette droite, va en se rapprochant de plus en plus de la droite AM, à mesure qu'elle s'éloigne du point de départ.

L'observation montre en effet que, dans l'atmosphère, l'intensité du son perçu est d'autant plus faible que l'oreille est placée plus loin du corps sonore.

**675. Propagation du son dans un tuyau indéfini. — Conservation de l'intensité.** — Dans un tuyau cylindrique, les ondes successives conservant un volume constant, le son conserve une intensité sensiblement constante à toute distance. La seule cause de diminution d'intensité consiste dans les frottements que l'air éprouve, dans ses mouvements, contre les parois du tuyau.

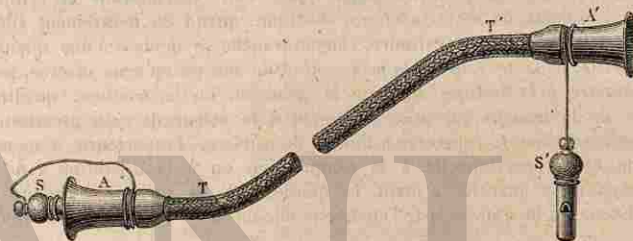


Fig. 520. — Tube acoustique.

On connaît, par exemple, l'usage des tubes acoustiques (fig. 520) qui permettent de transmettre la voix au travers des murs ou des planchers. Ce sont des tubes de caoutchouc TT', terminés à chacune de leurs extrémités par une embouchure en forme d'entonnoir, A, A'. Dans chacune des embouchures, on engage un sifflet S, destiné à jouer le rôle d'avertisseur. — Lorsqu'une personne placée à l'extrémité A' veut entrer en conversation avec une autre personne placée à l'extrémité A, elle enlève le sifflet S', et souffle fortement dans le tube, de manière à faire résonner le sifflet S. Cet appel ayant été entendu, la conversation peut s'engager presque à voix basse : celui qui parle place sa bouche contre l'embouchure, tandis que celui qui écoute applique son oreille contre l'autre extrémité.

**676. Relation entre la vitesse du son et la longueur de l'onde.** — Lorsqu'un son est produit à l'ouverture d'un tuyau cylindrique indéfini, contenant de l'air, la vitesse de propagation du son dans l'air étant environ 340 mètres par seconde, l'extrémité antérieure de la première onde produite se trouve, au bout d'une seconde, à 340 mètres du point de départ. Si, pendant une seconde, le corps vibrant a exécuté 60 vibrations, cet espace de 340 mètres se décompose alors en 60 parties égales, dont chacune a pour longueur la longueur d'onde. — D'a-

près ce qui a été dit plus haut (674), le même raisonnement s'applique au cas où le son se propage dans un milieu indéfini en tous sens.

En général, soit  $v$  la vitesse de propagation du son dans un milieu quelconque; soient  $n$  le nombre de vibrations exécutées par un corps sonore pendant une seconde, et  $\lambda$  la longueur particulière de l'onde correspondante à ce nombre de vibrations; on aura

$$v = n\lambda.$$

Cette relation permet de calculer l'une des trois quantités  $v, n, \lambda$ , lorsqu'on connaît les deux autres.

**677. Propagation du son dans un milieu élastique. — Formule de Newton.** — Dans tout milieu élastique, solide ou liquide, la propagation du son s'effectue comme dans l'air. Considérons un cylindre indéfini, rempli de cette substance élastique; quand un mouvement vibratoire se propage dans ce cylindre, chaque tranche se déplace d'une quantité très petite, dans le sens de la propagation du son ou en sens inverse, pour transmettre à la tranche suivante la *pression*, ou la *traction*, qu'elle a reçue de la tranche qui précède. Quant à la valeur de cette pression ou de cette traction  $f$ , rapportée à l'unité de surface, l'expérience a montré qu'elle est proportionnelle à la compression ou à la dilatation  $\varepsilon$  de la tranche; cette quantité  $\varepsilon$  étant le quotient de la variation absolue de l'épaisseur de la tranche, par l'épaisseur elle-même. — On appelle *élasticité*, ou *coefficient d'élasticité*, le rapport constant  $\frac{f}{\varepsilon} = e$ . Pour une même dilatation  $\varepsilon$ , la traction  $f$ , transmise par une tranche à la suivante, sera donc d'autant plus grande que l'élasticité du milieu considéré sera plus grande: on conçoit ainsi que la vitesse de propagation du son augmente avec l'élasticité du milieu. — Pour deux milieux d'élasticité égale, la dilatation étant la même pour une tranche du premier milieu et pour une tranche du second milieu, l'effet de la même traction  $f$ , appliquée à la tranche suivante, dans chacun des deux milieux, sera d'autant plus grand que la densité de la substance sera plus faible. — On conçoit donc aussi que, à élasticité égale, la vitesse du son augmente quand la densité diminue. — Newton a démontré que la vitesse de propagation du son est *proportionnelle à la racine carrée de l'élasticité, et inversement proportionnelle à la racine carrée de la densité du milieu*. La formule  $v = \sqrt{\frac{e}{d}}$  fait connaître la vitesse en centimètres,  $d$  et  $e$  étant évalués en unités C. G. S.

Le coefficient  $e$  doit être déterminé par l'expérience, pour chaque solide (\*). Mais quand il s'agit d'un gaz, les lois de Mariotte et de Gay-Lussac permettent de calculer, comme on va le voir, le quotient  $\frac{f}{\varepsilon} = e$ , qui entre dans la formule de Newton.

(\*) Pour déterminer le coefficient d'élasticité d'un métal, on prend un fil de ce métal de section connue  $s$ , et on marque, vers les extrémités, deux traits fins distants de  $l$  on suspend alors le fil par une de ses extrémités à une potence solide, et on attache à l'autre extrémité un plateau de balance que l'on charge d'une masse  $M$ ; on déter-

**678. Vitesse du son dans l'air et dans les gaz. — Formule de Laplace.** — Supposons que l'on ait, dans une enveloppe cylindrique, une masse gazeuse, à la température  $\theta^0$ , isolée de l'atmosphère par un piston qui peut glisser dans le cylindre; soient  $F$  la force élastique du gaz, évaluée en dynes,  $s$  et  $l$  la section et la hauteur du cylindre, évaluées en centimètres. — Exerçons sur le piston une pression  $f$ , très petite par rapport à  $F$ ; le piston se déplacera d'une quantité  $\varepsilon l$ , et la hauteur du cylindre deviendra  $l(1 - \varepsilon)$ ; mais en même temps la température s'élèvera de  $\theta$ . D'ailleurs la force élastique de la masse gazeuse, qui sera  $F$ , est devenue  $F + f$ . Si l'on applique la formule de Gay-Lussac, on a la relation

$$(1) \quad sF = \frac{s l (1 - \varepsilon) (F + f)}{1 + \alpha \theta}.$$

La variation de température  $\theta$  correspond à la compression  $\varepsilon$ ; si l'on désigne par  $\omega$  la variation de température que produirait une compression égale à  $\alpha$  (552), on a

$$(2) \quad \frac{\theta}{\omega} = \frac{\varepsilon}{\alpha}, \quad \text{ou} \quad \alpha \theta = \omega \varepsilon.$$

En tenant compte de cette relation, et en remarquant que le rapport des chaleurs spécifiques du gaz, à pression constante et à volume constant, n'est autre que  $\gamma = 1 + \omega$  (552), l'équation (1) fait connaître  $\frac{f}{\varepsilon}$ ; il vient

$$(3) \quad \frac{f}{\varepsilon} = F\gamma + f, \quad \text{ou sensiblement,} \quad \frac{f}{\varepsilon} = F\gamma,$$

si  $f$  est très petit par rapport à  $F$ . — La vitesse du son dans un gaz, dont la force élastique est égale à  $F$  dynes, et dont la masse spécifique est  $d$  grammes, est donc exprimée, en centimètres, par la formule qui a été donnée par Laplace:

$$(4) \quad v = \sqrt{\frac{F\gamma}{d}}.$$

Soient  $H$  la pression du gaz, évaluée en centimètres de mercure,  $D$  la densité du gaz par rapport à l'air, et  $t$  la température. On a:  $F = H \times 13,596 \times 981$  dynes (note de la page 95);  $d = 0,001293 \times \frac{H}{76} \times \frac{D}{1 + \alpha t}$  (note de la page 204);  $\gamma = 1,4$  (553); la formule (4) devient alors:

$$v = 55100 \sqrt{\frac{1 + \alpha t}{D}} \quad \text{ou} \quad v = 551^M \sqrt{\frac{1 + \alpha t}{D}}.$$

La vitesse du son dans un gaz quelconque est donc *proportionnelle à la racine carrée du binôme de dilatation, inversement proportionnelle à la racine carrée de la densité, et indépendante de la pression*.

mine au cathétomètre la nouvelle distance  $l'$  des deux traits; l'allongement, par unité de longueur, est donc  $\varepsilon = \frac{l' - l}{l}$ ; d'autre part la traction, par unité de surface, est  $f = \frac{Mg}{s}$ . Le quotient  $\frac{f}{\varepsilon}$  est le coefficient cherché.

Dans l'air, à la température 0°, la vitesse du son serait donc de 331 mètres, en admettant pour  $\gamma$  la valeur 1,4, fournie par les expériences analogues à celles de Clément et Desormes (355). — Des expériences effectuées par Regnault, dans la plaine de Satory, il résulte que, dans l'air à 0°, la vitesse du son est de 330<sup>m</sup>.5. De ce résultat, au moyen de la formule de Laplace, Regnault a déduit pour  $\gamma$  la valeur 1,39, qui est d'accord avec le résultat des mesures directes.

## IV. RÉFLEXION DU SON.

679. **Réflexion du son.** — Lorsque des ondes sonores PQ, P'Q', P''Q'',..., émanant d'un point A (fig. 521), et se propageant dans l'air,

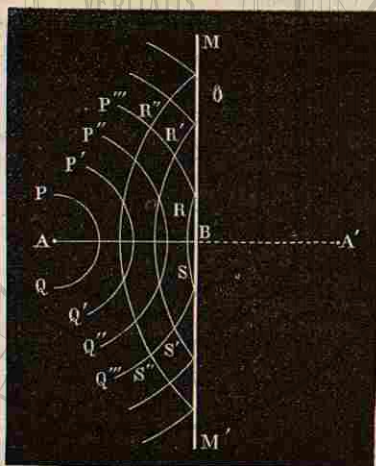


Fig. 521. — Réflexion des ondes sonores.

par exemple, viennent rencontrer un plan rigide MM', le mouvement vibratoire ne peut plus se transmettre au delà de ce plan : les molécules d'air qui sont au voisinage du plan, au moment où elles sont ébranlées, rebondissent sur la surface du plan, en sorte que les vitesses d'ébranlement changent de signe. Il se produit ainsi une série d'ondes réfléchies RS, R'S',..., se propageant en sens inverse des ondes directes, comme si elles émanaient d'un point A', symétrique de A par rapport au plan MM'. Ce phénomène, qui constitue la *réflexion du son*, est absolument analogue au phénomène de la réflexion de la lumière, que nous étudierons plus loin. — Un point lumineux A étant placé en face d'un miroir plan, nous verrons que la lumière se comporte, après réflexion, comme si elle émanait d'un point A', symétrique du point A par rapport au miroir, et qu'on appelle l'*image* du point A. — Par analogie, dans la réflexion des ondes sonores que nous venons d'indiquer (fig. 521), le point A' pourrait être appelé l'*image sonore* du point A.

L'identité des lois de la réflexion du son avec les lois de la réflexion de la lumière peut se démontrer par l'expérience suivante. — On place, devant un miroir sphérique concave, la lumière d'une bougie, en un point qu'on appelle le *foyer principal* du miroir : la lumière émise par

la bougie est réfléchiée par le miroir dans une direction parallèle à son axe. On la reçoit sur un autre miroir sphérique, disposé en face du premier, à une distance de plusieurs mètres : il la réfléchit à son tour, et la concentre en son foyer principal, de manière à éclairer vivement un petit écran placé en ce point. Si l'on remplace la bougie par une montre, et qu'on mette l'oreille au point où se trouvait l'écran, on perçoit distinctement le tic-tac de la montre, qui devient imperceptible dans toute autre position.

Un phénomène analogue se produit dans une des salles du Conservatoire des Arts et métiers, à Paris. Deux personnes, placées à deux angles opposés de la salle, et tournées vers le mur, peuvent causer entre elles à voix basse, sans que leur conversation soit entendue des personnes qui se trouvent dans l'intervalle; ce phénomène est dû à la réflexion du son sur les parois de la voûte.

Le *porte-voix* (fig. 522), dont on se sert pour transmettre la voix dans



Fig. 522. — Porte-voix.

une direction déterminée et à une assez grande distance, est un tube de forme conique AB, présentant une large embouchure E dans laquelle on émet la voix. Les réflexions qu'éprouvent les vibrations sonores, à l'intérieur du tube, les amènent à se propager, au sortir du pavillon P, dans une direction parallèle à son axe : la voix peut ainsi porter à une distance beaucoup plus grande que si elle était émise à l'air libre.

Le *cornet acoustique* (fig. 525) dont se servent les personnes qui ont l'ouïe dure, est un tube conique, de dimensions beaucoup plus petites, et recourbé à ses extrémités. Le sommet S du cône étant introduit dans l'oreille, le pavillon P étant tourné vers le point où se produisent les sons que l'on veut entendre, l'instrument recueille toutes les vibrations qui viennent frapper sa partie élargie, et les fait converger vers l'oreille.

680. **Échos.** — Il n'est personne qui n'ait entendu le phénomène de l'*écho*. Un cri étant poussé à une certaine distance d'un obstacle, comme un mur ou une montagne, les vibrations renvoyées par cet obstacle reviennent à l'oreille, au bout d'un temps plus ou moins long. Pour nous rendre compte des conditions dans lesquelles l'écho peut



Fig. 525. — Cornet acoustique.

s'entendre distinctement, supposons, par exemple, que l'obstacle soit placé à 170 mètres; le son doit alors parcourir, dans l'aller et retour, une distance de 2 fois 170 mètres, ou 340 mètres : c'est précisément l'espace que le son parcourt en une seconde. Donc, dans ce cas, c'est *au bout d'une seconde* qu'on entend l'écho. — Selon que la distance de l'obstacle est plus ou moins considérable, le temps qui s'écoule, avant le retour de l'écho, augmente ou diminue proportionnellement. Mais, en général, notre oreille ne peut distinguer l'un de l'autre deux sons successifs, que s'ils sont séparés par un intervalle de temps au moins égal à  $\frac{1}{10}$  de seconde. Or, en  $\frac{1}{10}$  de seconde, le son parcourt environ 34 mètres. Dès lors, le son direct ne pourra se distinguer du son dû à la réflexion, que si la distance de l'obstacle est plus grande que la moitié de 34 mètres, ou 17 mètres.

Dans certaines circonstances, il arrive que des obstacles multiples se trouvent disposés de façon à renvoyer un même son plusieurs fois à l'oreille, après plusieurs réflexions successives. Les échos qui se succèdent présentent alors une intensité décroissante, à cause de l'accroissement des distances parcourues par le son (\*).

**681. Résonance.** — Quand on parle dans un appartement de dimensions restreintes, les échos renvoyés par les murs, pour chaque son, reviennent à l'oreille au bout d'un temps inappréciable. Pour chaque son, l'oreille ne distingue donc plus le son lui-même de l'écho qui lui succède, et la parole paraît simplement acquérir *plus d'intensité* qu'à l'air libre.

Il n'en est plus de même dans une salle un peu vaste : chacun des sons produits semble alors se continuer avec les échos qui lui succèdent, et peut même arriver à se confondre avec les sons suivants. — Cet effet, que l'on désigne sous le nom de *résonance*, est tellement manifeste dans certaines salles, que la parole y devient difficilement intelligible; les syllabes successives se confondent les unes avec les autres, en une sorte de bourdonnement.

On peut atténuer ces effets en disposant, le long des murs, des draperies qui amortissent les vibrations et rendent la salle moins sonore. — Dans nos salles de théâtre, les résonances sont amoindries par tous les détails d'architecture, qui interrompent la régularité des murs : par les galeries, le colonnades, les balcons en saillie, etc.

(\*) On rencontre assez fréquemment des échos de ce genre dans les pays de montagnes. — On cite, comme l'un des plus remarquables, celui de la villa Simonetta, près de Milan. Un coup de pistolet, tiré d'une fenêtre de la villa est répété une quarantaine de fois.

## CHAPITRE II

## HAUTEUR DES SONS. — INTERVALLES MUSICAUX.

## I. — APPAREILS DESTINÉS A COMPTER LES VIBRATIONS.

**682. Sirène.** — Nous avons vu déjà (665) qu'un corps sonore, comme une lame élastique ou une corde tendue, donne un son dont la *hauteur musicale* est d'autant plus grande qu'il se produit un plus grand nombre de vibrations dans un même temps. — C'est ce que nous allons vérifier maintenant d'une manière plus précise, au moyen d'appareils qui permettent de *compter* les vibrations effectuées en un temps déterminé. — L'un des premiers appareils qui aient été imaginés pour cet objet est la sirène, dont l'invention est due à Cagniard de Latour.

La *sirène* (fig. 524) se compose d'une petite caisse cylindrique HH, dont le fond porte un tube F qui permet de l'adapter sur une soufflerie. La face supérieure de cette caisse est formée par une plaque AA (fig. 525), qui est percée d'un certain nombre de trous tels que *a*, distribués sur une circonférence, à égale distance les uns des autres : c'est par ces trous que s'échappera l'air amené dans la caisse par la soufflerie. Au-dessus, et à une très petite distance, se trouve un plateau BB, mobile autour d'un axe vertical D : il est également percé de trous tels que *b*, en même nombre que ceux de la caisse, et distribués exactement de la même manière, en sorte que, lorsqu'un trou du plateau mobile se trouvera en face de l'un des trous de la plaque fixe, tous les autres trous se correspondront en même temps. — Ajoutons enfin que les trous *a* de la plaque fixe sont inclinés dans un certain sens, et les trous *b* du plateau mobile sont inclinés en sens contraire, comme le montre la figure 525; dès lors, quand les trous se correspondent, l'air qui sort par les trous inférieurs vient frapper contre les parois des trous supérieurs et, en s'échappant dans l'atmosphère, il communique une impulsion au plateau mobile, dans le sens de la flèche *c*. Ce mouvement du plateau B détruit la coïncidence des deux systèmes de trous, et fait cesser l'échappement de l'air; mais une nouvelle coïncidence se produit, dès que le plateau B a tourné d'un angle égal à celui qui cor-

s'entendre distinctement, supposons, par exemple, que l'obstacle soit placé à 170 mètres; le son doit alors parcourir, dans l'aller et retour, une distance de 2 fois 170 mètres, ou 340 mètres : c'est précisément l'espace que le son parcourt en une seconde. Donc, dans ce cas, c'est *au bout d'une seconde* qu'on entend l'écho. — Selon que la distance de l'obstacle est plus ou moins considérable, le temps qui s'écoule, avant le retour de l'écho, augmente ou diminue proportionnellement. Mais, en général, notre oreille ne peut distinguer l'un de l'autre deux sons successifs, que s'ils sont séparés par un intervalle de temps au moins égal à  $\frac{1}{10}$  de seconde. Or, en  $\frac{1}{10}$  de seconde, le son parcourt environ 34 mètres. Dès lors, le son direct ne pourra se distinguer du son dû à la réflexion, que si la distance de l'obstacle est plus grande que la moitié de 34 mètres, ou 17 mètres.

Dans certaines circonstances, il arrive que des obstacles multiples se trouvent disposés de façon à renvoyer un même son plusieurs fois à l'oreille, après plusieurs réflexions successives. Les échos qui se succèdent présentent alors une intensité décroissante, à cause de l'accroissement des distances parcourues par le son (\*).

**681. Résonance.** — Quand on parle dans un appartement de dimensions restreintes, les échos renvoyés par les murs, pour chaque son, reviennent à l'oreille au bout d'un temps inappréciable. Pour chaque son, l'oreille ne distingue donc plus le son lui-même de l'écho qui lui succède, et la parole paraît simplement acquérir *plus d'intensité* qu'à l'air libre.

Il n'en est plus de même dans une salle un peu vaste : chacun des sons produits semble alors se continuer avec les échos qui lui succèdent, et peut même arriver à se confondre avec les sons suivants. — Cet effet, que l'on désigne sous le nom de *résonance*, est tellement manifeste dans certaines salles, que la parole y devient difficilement intelligible; les syllabes successives se confondent les unes avec les autres, en une sorte de bourdonnement.

On peut atténuer ces effets en disposant, le long des murs, des draperies qui amortissent les vibrations et rendent la salle moins sonore. — Dans nos salles de théâtre, les résonances sont amoindries par tous les détails d'architecture, qui interrompent la régularité des murs : par les galeries, le colonnades, les balcons en saillie, etc.

(\*) On rencontre assez fréquemment des échos de ce genre dans les pays de montagnes. — On cite, comme l'un des plus remarquables, celui de la villa Simonetta, près de Milan. Un coup de pistolet, tiré d'une fenêtre de la villa est répété une quarantaine de fois.

## CHAPITRE II

## HAUTEUR DES SONS. — INTERVALLES MUSICAUX.

## I. — APPAREILS DESTINÉS A COMPTER LES VIBRATIONS.

**682. Sirène.** — Nous avons vu déjà (665) qu'un corps sonore, comme une lame élastique ou une corde tendue, donne un son dont la *hauteur musicale* est d'autant plus grande qu'il se produit un plus grand nombre de vibrations dans un même temps. — C'est ce que nous allons vérifier maintenant d'une manière plus précise, au moyen d'appareils qui permettent de *compter* les vibrations effectuées en un temps déterminé. — L'un des premiers appareils qui aient été imaginés pour cet objet est la sirène, dont l'invention est due à Cagniard de Latour.

La *sirène* (fig. 524) se compose d'une petite caisse cylindrique HH, dont le fond porte un tube F qui permet de l'adapter sur une soufflerie. La face supérieure de cette caisse est formée par une plaque AA (fig. 525), qui est percée d'un certain nombre de trous tels que *a*, distribués sur une circonférence, à égale distance les uns des autres : c'est par ces trous que s'échappera l'air amené dans la caisse par la soufflerie. Au-dessus, et à une très petite distance, se trouve un plateau BB, mobile autour d'un axe vertical D : il est également percé de trous tels que *b*, en même nombre que ceux de la caisse, et distribués exactement de la même manière, en sorte que, lorsqu'un trou du plateau mobile se trouvera en face de l'un des trous de la plaque fixe, tous les autres trous se correspondront en même temps. — Ajoutons enfin que les trous *a* de la plaque fixe sont inclinés dans un certain sens, et les trous *b* du plateau mobile sont inclinés en sens contraire, comme le montre la figure 525; dès lors, quand les trous se correspondent, l'air qui sort par les trous inférieurs vient frapper contre les parois des trous supérieurs et, en s'échappant dans l'atmosphère, il communique une impulsion au plateau mobile, dans le sens de la flèche *c*. Ce mouvement du plateau B détruit la coïncidence des deux systèmes de trous, et fait cesser l'échappement de l'air; mais une nouvelle coïncidence se produit, dès que le plateau B a tourné d'un angle égal à celui qui cor-



respond à l'intervalle de deux trous consécutifs : l'air, en s'échappant de nouveau, communique une nouvelle impulsion au plateau mobile, en sorte que les périodes d'échappement de l'air deviennent de plus en plus fréquentes.

Lorsque le plateau B a acquis une vitesse suffisante, l'oreille commence à percevoir un son, dont la hauteur musicale s'élève à mesure que la vitesse augmente. — Pour nous rendre compte des caractères

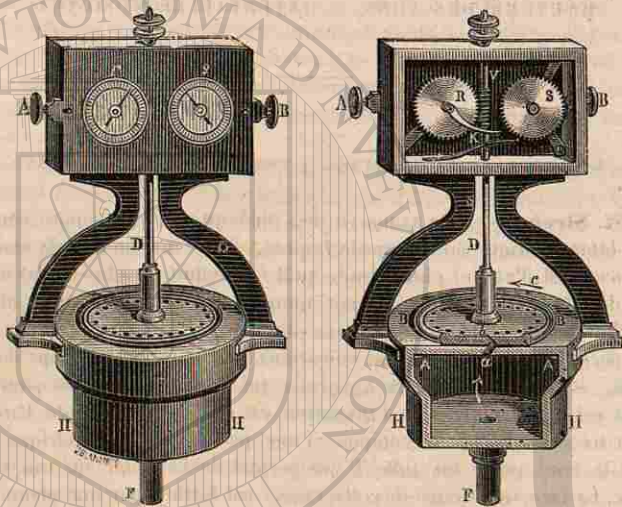


Fig. 524.

Sirène

Fig. 525.

de ce son, considérons, par exemple, une sirène dont la plaque fixe présente 12 trous, et examinons d'abord quel serait l'effet produit si le plateau mobile n'en avait qu'un seul. A chaque tour du plateau, ce trou unique viendrait se mettre successivement en coïncidence avec les 12 trous de la plaque fixe : la sortie de l'air serait donc 12 fois établie et interrompue, mais ne s'effectuerait toujours que par une seule ouverture. La succession des impulsions communiquées à l'air extérieur donnerait naissance à un son, dont la hauteur musicale dépendrait de la vitesse de rotation du plateau mobile. — Si maintenant le plateau mobile porte 11 autres trous, on voit que, au moment où le trou primitivement considéré établira une coïncidence, tous les autres trous correspondront aussi à des ouvertures de la plaque fixe. Dès lors, la sortie de l'air s'effectuant par les 12 ouvertures à la fois, les impulsions communiquées à l'air extérieur seront plus fortes, c'est-à-dire que

l'intensité du son sera augmentée, mais il n'y aura toujours que 12 vibrations pour chaque tour du plateau mobile.

Pour permettre de compter les nombres de vibrations qui correspondent aux divers sons, on a pratiqué, à la partie supérieure de l'axe de rotation D, un filet de vis V (fig. 525), qui engrène avec une roue dentée R dont la circonférence porte 100 dents. A chaque tour du plateau, cette roue avance d'une dent : ce mouvement est indiqué par une aiguille fixée à la roue et mobile sur un cadran extérieur r (fig. 524) : chaque division de ce cadran correspond donc à un tour du plateau. Une seconde roue S, portant également sur son axe une aiguille qui se meut sur un cadran extérieur s, est destinée à compter les centaines de tours du plateau : pour cela, on a fixé à l'axe de la roue R un appendice K (fig. 525), dont l'extrémité arrive en contact avec une dent de la roue S chaque fois que la roue R a fait un tour entier ; la roue S avance alors d'une dent, et son aiguille marche d'une division. — Enfin, il est utile de pouvoir, à volonté, faire engrener la roue R avec la vis V, ou interrompre l'engrenage : pour cela, il suffit de déplacer légèrement, à droite ou à gauche, la plaque verticale qui porte les deux roues, en appuyant sur l'un ou sur l'autre des boutons latéraux que présente cette plaque : on rapproche ou l'on éloigne ainsi les dents de la roue R du filet de la vis V.

Lorsqu'on veut compter le nombre de vibrations d'un son quelconque, on place la sirène sur la soufflerie, les deux aiguilles étant aux zéros de leurs cadrans, et l'engrenage n'étant pas établi. On donne le vent, et l'on amène progressivement le son de la sirène à la même hauteur que celui qu'on se propose d'étudier ; on établit alors l'engrenage, et l'on note cet instant sur une montre à secondes. On maintient l'unisson aussi longtemps que possible, en réglant le vent de la soufflerie ; enfin, on termine l'expérience en supprimant l'engrenage, et l'on note encore cet instant. On connaît, par les positions des aiguilles sur leurs cadrans, le nombre de tours effectués par le plateau en un temps déterminé. — Supposons, par exemple, que l'expérience ait duré 45 secondes ; que l'aiguille des centaines de tours soit arrivée à la 22<sup>e</sup> division, et l'aiguille des tours à la 55<sup>e</sup> division. Le plateau aura fait 2255 tours ; si ce plateau porte 12 trous, il se sera produit un nombre de vibrations égal à  $2255 \times 12$ , ou 26 820. Le nombre de vibrations en une seconde sera le quotient de 26 820 par 45, ou 596 (\*).

(\* Il est important de remarquer que l'aiguille des tours n'avance d'une division qu'après chaque tour entier du plateau, c'est-à-dire après un nombre de vibrations égal au nombre des trous. Le plateau ayant 12 trous, on voit que le nombre des vibrations effectuées pendant la durée totale de l'expérience ne pourra être déterminé qu'à 12 unités près. On atténue l'erreur qui en résulte, sur le nombre des vibrations effectuées en une seconde, en prolongeant l'expérience aussi longtemps que possible. — La seule difficulté consiste à maintenir le son constant pendant un grand nombre de secondes, ce à quoi l'on arrive en donnant le vent, non pas d'une manière continue, mais par intermittences.

685. **Roues dentées.** — Les *roues dentées*, imaginées par Savart, peuvent également servir à compter les vibrations.

Ces roues, au nombre de trois ou quatre, sont fixées sur un axe horizontal (fig. 526); on leur communique un mouvement de rotation au moyen d'une courroie sans fin ACDB, qui passe sur un volant AB muni d'une manivelle M. Un compteur, semblable à celui de la sirène,

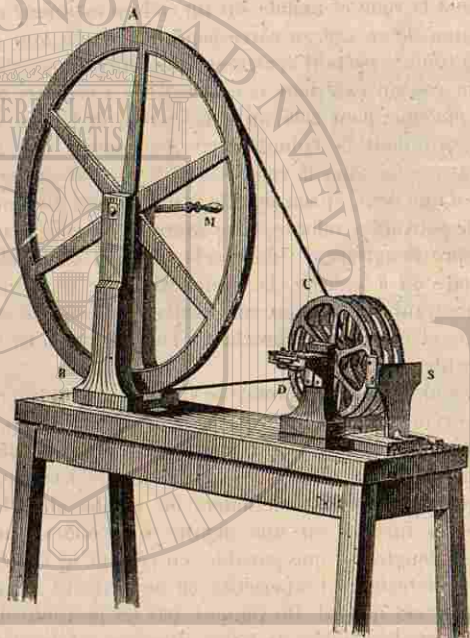


Fig. 526. — Roues dentées.

fait connaître le nombre de tours effectués par les roues dans un temps donné. — On place une carte sur le support S, de manière que, pendant la rotation, la tranche de cette carte soit rencontrée successivement par les dents de l'une des roues. Les chocs successifs déterminent dans l'air un mouvement vibratoire : le son est d'autant plus aigu que le mouvement de rotation est plus rapide. On règle la rotation de manière que le son reste fixe pendant quelque temps, et l'on opère comme avec la sirène.

684. **Compteurs graphiques.** — **Détermination du rapport des nombres de vibrations qui correspondent à deux sons déterminés.** — Les compteurs graphiques sont destinés spécialement à

déterminer le *rapport* des nombres de vibrations effectuées, dans un même temps, par deux sons de hauteurs différentes.

Voici l'une des dispositions les plus simples. Un cylindre EF (fig. 527), dont la surface a été couverte de noir de fumée, est porté sur un axe DV, dont la partie supérieure V, travaillée en filet de vis, s'engage dans un écrou pratiqué dans l'une des branches du support. Lorsqu'on fait tourner le cylindre au moyen de la manivelle M, il s'abaisse, à chaque tour, d'une quantité égale au pas de la vis. — La figure repré-

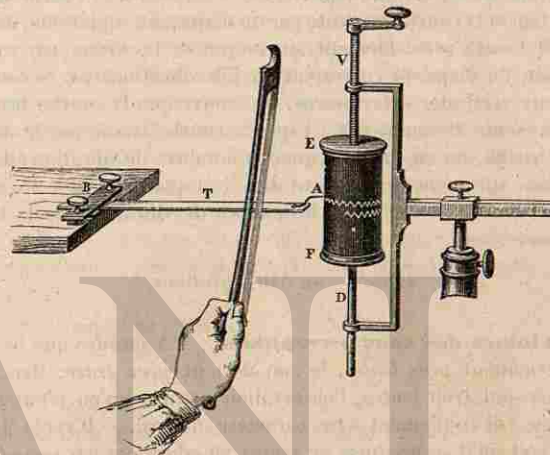


Fig. 527. — Compteur graphique des vibrations.

sente en T une tige métallique, qui est assujettie solidement par l'une de ses extrémités B, et dont l'autre extrémité porte une pointe fine A; cette pointe vient toucher légèrement la surface du cylindre. Si l'on faisait mouvoir le cylindre seul, la pointe, enlevant le noir de fumée, tracerait une hélice; si, en même temps, on fait vibrer la tige au moyen d'un archet, l'hélice paraît dentelée : chacune des sinuosités correspond à une vibration de la tige.

Disposons maintenant, l'un au-dessous de l'autre, deux corps sonores, de manière qu'ils inscrivent en même temps leurs vibrations sur le cylindre, et supposons d'abord que ces deux corps produisent des sons *de même hauteur*. Si, une fois l'expérience faite, on trace sur le noir de fumée deux lignes verticales, à une certaine distance l'une de l'autre, on trouve que les deux courbes présentent un même nombre de sinuosités dans l'intervalle de ces deux lignes. On en conclut que les deux corps ont effectué *un même nombre de vibrations* dans le même temps. — Si les deux corps rendent des sons *de hauteurs différentes*, il suffira de

compter les sinuosités tracées, par l'un et par l'autre, entre deux verticales déterminées : le quotient de l'un de ces nombres par l'autre exprimera le rapport des nombres de vibrations effectuées, dans un même temps, par les deux corps.

Nous remarquerons enfin que, si l'on connaît à l'avance le nombre des vibrations effectuées, en une seconde, par l'un des deux corps, cette expérience permet de déterminer le nombre absolu des vibrations effectuées en une seconde par l'autre corps. — Supposons, par exemple, que l'on ait inscrit simultanément, sur le cylindre, la courbe produite par une tige et la courbe produite par un diapason ; supposons, en outre, qu'on ait trouvé préalablement, au moyen de la sirène par exemple, que le son du diapason correspond à 425 vibrations par seconde. Si, entre deux verticales déterminées, on trouve que la courbe tracée par la tige présente 20 sinuosités, et que la courbe tracée par le diapason en présente 25, on en conclura que les nombres de vibrations des deux corps, dans un même temps, sont dans le rapport de 20 à 25, ou dans le rapport de 4 à 5. Par suite, le nombre de vibrations de la tige, en une seconde, sera

$$425 \times \frac{4}{5}, \text{ ou } 340 \text{ vibrations.}$$

685. **Limites des sons perceptibles.** — A mesure que les vibrations deviennent plus lentes, le son devient plus grave. Mais, si les vibrations sont trop lentes, l'observation montre qu'on n'entend plus qu'une sorte de ronflement, sans caractère musical. — D'après M. Helmholtz, il faut qu'il se produise au moins 20 vibrations par seconde, pour que l'oreille perçoive un véritable son.

Inversement, à mesure que les vibrations deviennent plus rapides, le son devient plus aigu. Mais, si les vibrations sont trop rapides, elles ne produisent plus sur l'oreille qu'une sensation presque douloureuse ; pour une rapidité plus grande encore, l'oreille cesse de percevoir aucun son. — D'après M. König, les nombres de vibrations des sons perceptibles ne dépassent jamais 25 000 par seconde. — Ces limites sont d'ailleurs variables d'une personne à une autre.

## II. — INTERVALLES MUSICAUX. — GAMME.

686. **Intervalle de deux sons.** — On appelle, en Acoustique, intervalle de deux sons, le rapport des nombres de vibrations qui leur correspondent, pendant des temps égaux.

On dit qu'un son est à l'octave aigüe d'un autre, lorsqu'il correspond à un nombre de vibrations double, dans le même temps. L'intervalle de ces deux sons est alors égal à 2.

Le plus souvent, l'intervalle de deux sons musicaux n'est pas représenté par un nombre entier ; mais, si l'on ramène la valeur numérique de cet intervalle à une expression fractionnaire irréductible, les deux termes de cette expression sont généralement des nombres d'autant plus simples, que la consonance formée par la production simultanée des deux sons est plus agréable à l'oreille. — C'est ce que nous allons constater par l'étude des principaux intervalles usités en musique.

687. **Gamme.** — On donne le nom de gamme à une série de huit sons ou notes, dont les deux extrêmes sont à un intervalle d'une octave, et dont les notes intermédiaires sont à des intervalles particuliers, toujours les mêmes pour les diverses gammes. — Les notes de la gamme d'*ut* sont désignées par *ut*<sub>1</sub>, *ré*, *mi*, *fa*, *sol*, *la*, *si*, *ut*<sub>2</sub>. — La première note de la gamme est ce qu'on nomme la tonique.

Supposons qu'on ait déterminé, par l'une des méthodes précédentes, les nombres de vibrations de la gamme d'*ut*, et que l'on calcule ensuite, au moyen de ces nombres, l'intervalle qui existe entre chacune des notes et la tonique, c'est-à-dire le rapport du nombre de vibrations de chaque note, au nombre de vibrations de la tonique. — On trouve, pour ces rapports, réduits à leur plus simple expression, les résultats suivants :

| <i>ut</i> <sub>1</sub> | <i>ré</i>     | <i>mi</i>     | <i>fa</i>     | <i>sol</i>    | <i>la</i>     | <i>si</i>      | <i>ut</i> <sub>2</sub> |
|------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|----------------|------------------------|
| 1                      | $\frac{9}{8}$ | $\frac{5}{4}$ | $\frac{4}{3}$ | $\frac{5}{2}$ | $\frac{5}{3}$ | $\frac{15}{8}$ | 2                      |

688. **Accord parfait.** — De ces divers rapports, le plus simple, après l'octave, est le rapport  $\frac{5}{3}$ , qui exprime l'intervalle musical entre la cinquième note de la gamme et la tonique ; on l'appelle intervalle de quinte (*ut* à *sol*). C'est aussi l'intervalle dont l'oreille apprécie le mieux la justesse, et c'est celui que les musiciens emploient pour accorder entre elles les notes des instruments. Enfin, la production simultanée de la tonique *ut* et de la quinte *sol* produit une sensation particulièrement agréable. — Le rapport  $\frac{4}{3}$ , qui exprime l'intervalle entre la tonique et la troisième note de la gamme ou intervalle de tierce (*ut* à *mi*), donne lieu à des remarques analogues. — La succession de la tonique, de la tierce et de la quinte (*ut*, *mi*, *sol*) constitue ce qu'on appelle un accord parfait (\*).

(\*) La gamme tout entière peut être considérée comme dérivant de l'accord parfait nous allons montrer en effet que, si l'on prend comme point de départ la note *ut*, une succession de trois accords parfaits permet de retrouver toutes les notes de la gamme, avec les nombres de vibrations indiqués plus haut.

Et d'abord, l'accord parfait qui a pour tonique *ut* fournit les trois notes *ut*, *mi*, *sol*, dont les nombres de vibrations sont 1,  $\frac{5}{4}$ ,  $\frac{5}{3}$ .

Si maintenant on forme un accord parfait dont la tonique soit la dernière note de l'accord d'*ut*, c'est-à-dire la note *sol*, on obtient, comme nombre de vibrations de la

689. **Intervalles des notes consécutives de la gamme.** — Servons-nous maintenant des résultats qui précèdent, pour calculer les intervalles successifs entre deux notes consécutives de la gamme d'*ut*. Il suffira, pour cela, de diviser chacune des expressions obtenues par celle qui la précède immédiatement. — Ce calcul est indiqué dans le tableau suivant, avec les noms que les musiciens ont donnés à ces intervalles.

## INTERVALLES DE DEUX NOTES CONSÉCUTIVES DE LA GAMME.

|  |                 |                               |             |
|--|-----------------|-------------------------------|-------------|
| <i>ut</i> <sub>1</sub> à <i>ré</i> . . . . . | $\frac{9}{8}$   | $\frac{9}{8} = 1 \frac{1}{8}$ | ton majeur. |
| <i>ré</i> à <i>mi</i> . . . . .              | $\frac{5}{4}$   | $\frac{10}{9}$                | ton mineur. |
| <i>mi</i> à <i>fa</i> . . . . .              | $\frac{4}{3}$   | $\frac{16}{15}$               | demi-ton.   |
| <i>fa</i> à <i>sol</i> . . . . .             | $\frac{3}{2}$   | $\frac{9}{8}$                 | ton majeur. |
| <i>sol</i> à <i>la</i> . . . . .             | $\frac{5}{3}$   | $\frac{10}{9}$                | ton mineur. |
| <i>la</i> à <i>si</i> . . . . .              | $\frac{15}{8}$  | $\frac{9}{8}$                 | ton majeur. |
| <i>si</i> à <i>ut</i> <sub>2</sub> . . . . . | $\frac{16}{15}$ | $\frac{16}{15}$               | demi-ton.   |

Sans nous arrêter à la distinction entre les tons majeurs et les tons mineurs, nous dirons que les intervalles offerts par les notes consécutives de la gamme d'*ut* forment une série comprenant deux tons, suivis d'un demi-ton, et trois tons, suivis d'un demi-ton (\*).

seconde note de ce nouvel accord,  $\frac{5}{4} \times \frac{3}{4} = \frac{15}{8}$ ; c'est la note *si*. Quant à la troisième note de ce même accord, elle aura comme nombre de vibrations  $\frac{5}{2} \times \frac{3}{2} = \frac{9}{4}$ ; il suffit d'en prendre la moitié, c'est-à-dire l'octave grave, pour obtenir le nombre  $\frac{9}{8}$ , qui correspond au *ré* de la gamme.

Si l'on forme un accord parfait dont la dernière note soit la note *ut*, on aura, pour la tonique de ce nouvel accord, le nombre de vibrations 1 divisé par  $\frac{3}{2}$ , c'est-à-dire  $\frac{2}{3}$ ; il suffit d'en prendre le double, c'est-à-dire l'octave aiguë, pour obtenir le nombre  $\frac{4}{3}$  qui correspond au *fa* de la gamme. Enfin on aura, pour la seconde note de ce même accord, le nombre  $\frac{2}{3} \times \frac{5}{4} = \frac{5}{6}$ , dont il suffit encore de prendre l'octave aiguë pour obtenir le nombre  $\frac{5}{3}$ , qui correspond au *la* de la gamme. — On retrouve donc ainsi toutes les notes de la gamme d'*ut*.

(\*) L'expression  $\frac{10}{9}$ , qui représente le ton mineur, est très peu différente de l'expres-

Après avoir formé une première gamme d'*ut*, commençant par *ut*<sub>1</sub> et finissant par *ut*<sub>2</sub>, on peut en former une seconde, commençant par *ut*<sub>2</sub> et finissant par *ut*<sub>3</sub>; chacune des notes de cette seconde gamme sera l'octave aiguë de la note correspondante de la première. On en formera de même une troisième et ainsi de suite, ce qui donnera une échelle musicale, formée par une série de gammes d'*ut*, où les notes deviendront de plus en plus aiguës (\*).

Mais on peut aussi se proposer de former d'autres gammes, ayant pour toniques des notes autres que *ut*. — Nous allons voir que pour conserver, dans ces nouvelles gammes, les mêmes intervalles que dans la gamme d'*ut*, il est nécessaire de substituer, à certaines notes de l'échelle précédente, des notes un peu différentes, qui prendront le nom de *dièses* ou de *bémols*.

690. **Dièses.** — En partant des notes fournies par les gammes d'*ut*, proposons-nous de former une gamme de *sol*, c'est-à-dire une gamme ayant pour tonique la note *sol*, qui était la quinte dans la gamme d'*ut*. — Si l'on conservait, dans cette nouvelle gamme, les notes précédemment obtenues, *sol*, *la*, *si*, *ut*, *ré*, *mi*, *fa*, *sol*<sub>2</sub>, le sixième intervalle (*mi* à *fa*), qui doit être d'un ton ( $\frac{9}{8}$ ), ne serait que d'un demi-ton ( $\frac{16}{15}$ ); il est donc nécessaire de substituer, à la note *fa*, une note plus élevée. On emploie alors une note dont le nombre de vibrations s'obtient en multipliant celui de *fa* par  $\frac{27}{16}$ ; cette nouvelle note prend le nom de *fa dièse*, et s'indique par *fa* ♯. — En même temps, cette substitution rend le septième intervalle (*fa* ♯ à *sol*<sub>2</sub>) égal à un demi-ton, comme il doit être.

En partant maintenant des notes fournies par les gammes de *sol*, cherchons à former une gamme de *ré*, c'est-à-dire une gamme ayant

pour tonique la note *ré*, qui représente le ton majeur, car le rapport de ces deux expressions est  $\frac{80}{81}$ .

Il ne diffère donc de l'unité que de  $\frac{1}{81}$ ; c'est un intervalle qui est difficilement appréciable à l'oreille, et qui a reçu le nom de *comma*.

(\*) La sensation produite sur l'oreille par la succession de plusieurs notes dépend des rapports que présentent entre eux leurs nombres de vibrations, et non pas des valeurs absolues de chacun de ces nombres. — C'est ce que l'on constate, d'une manière très simple, pour l'accord parfait en particulier, au moyen de roues dentées (fig. 526). Prenons trois roues dentées, montées sur le même axe, et choisissons de manière que les nombres de dents de ces trois roues soient dans les rapports de 1 à  $\frac{5}{4}$  et à  $\frac{3}{2}$  (la première roue ayant, par exemple, 100 dents; la seconde, 125 dents; la troisième, 150 dents). Si on leur donne une vitesse de rotation uniforme, et qu'on présente successivement une carte à chacune d'elles, on constate que les trois notes obtenues forment un accord parfait. — Si l'on change la vitesse de rotation, et qu'on recommence l'expérience, on obtient trois nouvelles notes, ayant des hauteurs différentes des précédentes, mais formant encore un accord parfait. Or, dans ces expériences successives, les valeurs absolues des nombres de vibrations ont été modifiées, mais les rapports de ces nombres entre eux sont restés les mêmes.

pour tonique la note *ré*, qui était la quinte dans la gamme de *sol*. — Si l'on conservait les notes telles qu'on vient de les obtenir, *ré*, *mi*, *fa* ♯, *sol*, *la*, *si*, *ut*, *ré*₂, le sixième intervalle ne serait encore que d'un demi-ton. En substituant à la note *ut* la note *ut* ♯, on rend au sixième et au septième intervalle les valeurs qu'ils doivent avoir. — La gamme de *ré*, ainsi obtenue, comprend alors deux notes diésées; et ainsi de suite.

En général, pour passer d'une gamme quelconque à celle qui aura sa tonique à une quinte au-dessus de la première, il suffit de reproduire les notes fournies par celle-ci, en diésant l'avant-dernière note, ou note sensible, de la nouvelle gamme.

691. **Bémols.** — Des considérations analogues conduisent à l'introduction des bémols. — Partons encore des notes fournies par les gammes d'*ut*, et proposons-nous de former une gamme ayant sa tonique à une quinte au-dessous d'*ut*, c'est-à-dire une gamme de *fa*. Avec les notes *fa*, *sol*, *la*, *si*, *ut*, *ré*, *mi*, *fa*₂, le troisième intervalle (*la* à *si*), qui devrait être d'un demi-ton, est d'un ton; le quatrième intervalle, qui est d'un ton, n'est que d'un demi-ton. On rendra à ces deux intervalles les valeurs qu'ils doivent avoir, en substituant à la note *si* une note plus basse, dont on obtiendra le nombre de vibrations en multipliant celui de *si* par  $\frac{24}{25}$ : cette nouvelle note prend le nom de *si bémol*, et s'indique par *si* ♭.

En partant de même de cette gamme de *fa*, pour former une gamme ayant sa tonique à une quinte au-dessous de *fa*, c'est-à-dire une gamme de *si* ♭, on sera conduit à substituer, à la note *mi*, une note plus basse, c'est-à-dire *mi bémol*. Cette nouvelle gamme contiendra alors deux notes bémolisées; et ainsi de suite.

En général, pour passer d'une gamme à celle qui aura sa tonique à une quinte au-dessous de celle de la première, il suffit de reproduire les notes fournies par celle-ci, en bémolisant la quatrième note de la nouvelle gamme (celle qui est à une quinte au-dessous de l'octave).

692. **Gamme tempérée.** — Par ce qui précède, on voit que, dans l'intervalle d'une seule octave, devraient se placer 21 sons différents, savoir: les sept notes de la gamme d'*ut*, leurs dièses et leurs bémols. Si l'on voulait réaliser, dans plusieurs octaves successives, toutes ces notes sur des instruments à sons fixes, tels que l'orgue, le piano, on compliquerait à la fois la construction et le jeu de l'instrument. Cette considération a conduit les musiciens à l'idée du *tempérament*.

On divise l'intervalle d'octave en 12 demi-tons moyens, égaux entre eux, et constituant la succession des notes naturelles, avec leurs dièses et leurs bémols (\*). — Une note diésée se confond alors avec la note

(\*) La valeur du demi-ton moyen est déterminée par cette condition que, dans une octave, le produit de ces douze intervalles égaux doit être égal à 2. La valeur du

suivante bémolisée (ainsi l'*ut dièse* se confond avec le *ré bémol*; le *ré dièse* se confond avec le *mi bémol*, etc.). Les tons entiers, majeurs et mineurs, sont remplacés eux-mêmes par un intervalle décomposable en deux demi-tons moyens.

693. **Nombres absolus de vibrations des notes employées en musique.** — **Diapason normal.** — Jusqu'ici nous n'avons considéré que les rapports des nombres de vibrations des diverses notes de l'échelle musicale; dans la pratique, il est nécessaire, pour accorder entre eux les divers instruments, de fixer le nombre absolu des vibrations de l'une de ces notes, ce qui fixera en même temps les nombres de vibrations de toutes les autres.

D'après les conventions adoptées en France, l'*ut* le plus grave du violoncelle correspond à un nombre de vibrations, par seconde, représenté par 65,25. On le désigne par *ut*₁, et l'on affecte de l'indice 1 toutes les notes comprises entre *ut*₁ et son octave aiguë: dans l'octave suivante, les notes se distinguent par l'indice 2; dans la troisième octave, par l'indice 3, etc. Au-dessous de *ut*₁, on emploie, d'octave en octave, les indices — 1 et — 2.

Pour accorder les instruments, on se sert d'un diapason (fig. 512), qui rend un son déterminé de l'échelle musicale. — Le diapason normal donne la note *la*₃, qui correspond à 435 vibrations par seconde (\*).

demi-ton moyen est donc représentée par  $\sqrt[12]{2}$  ou 1,060. — En comparant les notes ainsi obtenues avec celles que fournissaient les nombres précédents, il est facile de voir que les notes de la gamme tempérée n'en diffèrent que de quantités très petites.

(\*) Ces vibrations sont des vibrations doubles, formées chacune d'une allée et d'une venue du corps sonore (662). Les auteurs qui entendent, par le mot de vibrations, des vibrations simples, formées chacune d'une allée ou d'une venue, donnent alors à la note *la*₃, un nombre de vibrations égal à 870 par seconde.

### CHAPITRE III

#### VIBRATIONS DES GAZ. — TUYAUX SONORES.

694. Les sons produits par les tuyaux sonores sont dus aux vibrations du gaz intérieur. — On donne le nom général de *tuyaux sonores* à des tuyaux dont on fait usage dans les orgues, et que l'on met en vibration en y amenant un courant d'air au moyen d'une soufflerie. — Ils se distinguent en *tuyaux à bouche* et *tuyaux à anche*.

Dans les *tuyaux à bouche*, le vent arrive par le pied *p* (fig. 528 et 529), traverse la fente *l* qu'on nomme la *lumière*, et vient frapper contre le biseau *b* qui constitue la *lèvre supérieure*. Les vibrations de la lèvre *b* se communiquent à l'air du tuyau, et déterminent, dans la colonne d'air intérieure, des vibrations très intenses, en raison de la combinaison des mouvements dus à plusieurs systèmes d'ondes sonores, comme nous le ferons concevoir un peu plus loin (\*).

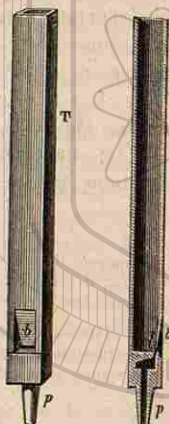


Fig. 528. Fig. 529.  
Tuyau à bouche.

Pour constater le mouvement vibratoire de l'air intérieur, on place, sur une soufflerie (fig. 550), un tuyau *T* (fig. 551), ouvert à sa partie supérieure et dont l'une des faces est en verre. — La soufflerie se com-

(\*) L'expérience montre que la nature des parois du tuyau ne modifie pas la hauteur du son, au moins lorsque ces parois sont suffisamment épaisses; elle n'a guère d'autre influence que de donner au son un *timbre* ou un autre, selon qu'elles sont en métal ou en bois.

Cependant lorsque les parois d'un tuyau ont une très faible épaisseur, elles peuvent, en entrant elles-mêmes en vibration, arriver à modifier la *hauteur* du son. Pour le démontrer, on monte sur la soufflerie deux tuyaux de mêmes dimensions, mais dont l'un a une paroi épaisse, de bois ou de métal, et l'autre une paroi de papier. Le son du second tuyau est plus grave que celui du premier; il peut même s'abaisser de près d'une octave, lorsqu'on vient à mouiller le papier.

Dans tout ce qui va suivre, nous supposons les expériences faites avec des tuyaux à parois suffisamment résistantes, pour qu'on n'ait à considérer que les vibrations de l'air intérieur.

pose d'un soufflet *S*, que l'on met en mouvement au moyen de la pédale *P*, et qui comprime l'air dans la caisse ou *sommier* *AB*. La face supérieure de cette caisse est percée d'un certain nombre de trous, qu'on peut ouvrir à volonté en pressant sur les touches *t, t, t...*, de manière à amener le vent dans tel ou tel tuyau. — Le tuyau *T* étant

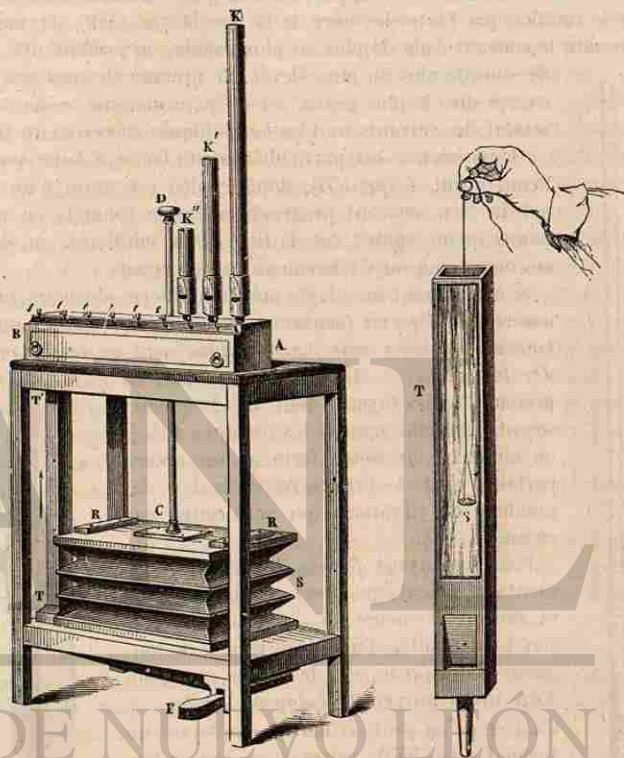


Fig. 550. — Soufflerie.

Fig. 551.

assujéti dans l'une de ces ouvertures, si on le fait parler et qu'on y introduise, à l'aide d'un fil de soie, une membrane de baudruche, tendue sur un anneau rigide *S* et couverte de sable fin, on voit le sable s'agiter, et cela pour chacune des positions successives que l'on donne à la membrane dans la colonne d'air, sauf en certains points que nous indiquerons plus loin. Cette colonne est donc le siège d'un mouvement vibratoire.

On distingue les tuyaux à bouche en *tuyaux ouverts* et *tuyaux fermés*,

selon que l'extrémité opposée à la bouche est ouverte, ou fermée par une paroi solide. — Cette distinction est essentielle à faire pour l'étude des lois que nous allons indiquer.

**695. Loi des longueurs.** — En plaçant un tuyau sur une soufflerie, et en amenant d'abord faiblement le vent, on lui fait rendre un son de hauteur déterminée; si l'on appuie ensuite graduellement avec la main sur le soufflet, par l'intermédiaire de la tige DC (fig. 550), de manière à rendre le courant d'air de plus en plus rapide, on produit une série de sons de plus en plus élevés. Le premier de tous ces sons, c'est-à-dire le plus grave, est ce qu'on nomme le *son fondamental*; les suivants sont les *harmoniques successifs* du tuyau. — L'expérience est particulièrement facile à faire avec un tuyau étroit T (fig. 552), dont le pied est muni d'un robinet R : en ouvrant progressivement le robinet, en même temps qu'on appuie sur la tige de la soufflerie, on obtient aisément cinq ou six harmoniques successifs.

Si maintenant on adapte sur la soufflerie plusieurs tuyaux ouverts, de diverses longueurs (fig. 550), on constate que les hauteurs de leurs sons fondamentaux sont en raison inverse des longueurs. — Ainsi, par exemple, en prenant trois tuyaux dont les longueurs soient entre elles comme les nombres 1,  $\frac{4}{5}$ ,  $\frac{2}{3}$ , on obtient trois notes formant un accord parfait, c'est-à-dire correspondant à des nombres de vibrations qui sont entre eux comme 1,  $\frac{5}{4}$ ,  $\frac{3}{2}$ .

Pour les tuyaux fermés, les sons fondamentaux varient également avec la longueur, et suivant la même loi. — Seulement, le son fondamental d'un tuyau fermé, de longueur déterminée, est le même que celui d'un tuyau ouvert de longueur double. — C'est ce qu'on peut vérifier en employant un tuyau T (fig. 553), traversé en son milieu par une coulisse AS, dont l'une des moitiés est pleine et dont l'autre moitié est percée d'une large ouverture. Selon que l'on pousse cette coulisse dans un sens ou dans l'autre,

on obtient un tuyau fermé ou un tuyau ouvert de longueur double. Dans les deux cas, le son fondamental est le même.

Enfin, si l'on adapte sur la soufflerie plusieurs tuyaux de même longueur et de diamètres différents, on constate que la hauteur du son est indépendante du diamètre, pourvu que le diamètre du tuyau soit inférieur au dixième de sa longueur.



Fig. 552.



Fig. 553.

**696. Production des nœuds fixes et des ventres fixes, dans les tuyaux sonores.** — Si l'on assimile le mouvement vibratoire produit par l'air dans un tuyau au mouvement que produisent les vibrations d'une lame mobile, il résulte de ce que nous avons vu (675) que ce mouvement doit donner naissance à une série d'ondes, formées chacune d'une demi-onde condensée et d'une demi-onde dilatée, et se propageant de la bouche vers l'extrémité opposée. — Or, si l'on considère d'abord un tuyau fermé, chacun des éléments de ces ondes, à mesure qu'il arrive sur le fond du tuyau, éprouve une réflexion : de là, la production d'ondes réfléchies, marchant en sens inverse, c'est-à-dire du fond vers la bouche du tuyau. Ces deux mouvements se propagent indépendamment l'un de l'autre, comme deux systèmes d'ondulations se propagent à la surface d'une eau tranquille et se traversent sans se troubler. Chaque tranche d'air du tuyau est donc animée, à chaque instant, d'un mouvement dont la vitesse vibratoire est la résultante de deux autres, savoir : celle qui lui serait communiquée par l'onde directe seule, et celle qui lui serait communiquée par l'onde réfléchie : cette vitesse résultante est égale à la somme des vitesses composantes, quand celles-ci sont de même sens, et à leur différence, quand elles sont de sens contraires. — De même, la compression ou la dilatation d'une tranche quelconque, à chaque instant, est la résultante des compressions ou des dilatations que chacun des deux mouvements vibratoires y produirait, s'il existait seul.

En tenant compte de la superposition de ces effets, la théorie montre qu'il se forme dans le tuyau :

1° Des *nœuds fixes*, c'est-à-dire des tranches où la vitesse vibratoire résultante est constamment nulle, mais où la compression ou la dilatation est plus grande que dans toute autre tranche voisine, au même instant;

2° Des *ventres fixes*, c'est-à-dire des tranches où la vitesse vibratoire résultante est plus grande que celle de toutes les tranches voisines, au même instant, mais où il n'existe, à aucun instant, ni compression, ni dilatation.

Semblablement, dans un tuyau ouvert, chacune des ondes directes, en arrivant à l'extrémité du tuyau, éprouve une réflexion sur l'atmosphère extérieure, et donne naissance à une onde réfléchie, se propageant en sens inverse. — Mais les positions des nœuds et des ventres, par rapport à l'extrémité du tuyau, ne sont pas les mêmes que dans les tuyaux fermés. Cette différence tient à ce que dans un tuyau fermé, une demi-onde directe condensée, en se réfléchissant sur le fond, donne naissance à une demi-onde réfléchie condensée; tandis que, à l'extrémité d'un tuyau ouvert, une demi-onde directe condensée donne naissance à une demi-onde réfléchie dilatée, et réciproquement.

Nous nous contenterons de constater, par l'expérience, la production

des nœuds fixes et des ventres fixes, et d'en déterminer approximativement la position.

697. **Vérifications expérimentales.** — L'expérience qui a été indiquée plus haut, et qui consiste à introduire successivement en divers points d'un tuyau une membrane couverte de sable (fig. 551), suffit pour constater la production de nœuds et de ventres fixes. Dans les nœuds, la membrane n'accuse aucun mouvement vibratoire; dans les ventres, elle accuse un mouvement vibratoire dont l'amplitude est plus grande que dans tous les points voisins. — On trouve ainsi, par exemple, que, dans un tuyau ouvert rendant le son fondamental, il se produit un seul nœud au milieu du tuyau, et un ventre à chacune des extrémités. — Si l'on passe ensuite du son fondamental à des harmoniques de plus en plus élevés, le nombre des nœuds et des ventres augmente suivant une loi qui sera indiquée plus loin.

Voici maintenant des expériences qui permettent de caractériser les nœuds et les ventres par les différences que présentent les *variations de pression* de l'air intérieur.

Pour vérifier que, dans les *ventres*, il ne se produit ni compression ni dilatation de l'air intérieur, on emploie un tuyau prismatique de bois (fig. 554), présentant dans l'une de ses faces une série de petites ouvertures transversales, *v', v, n', .....*, que l'on peut ouvrir ou fermer à volonté au moyen de petites plaques de bois mobiles à coulisse. — En faisant rendre au tuyau l'un de ses harmoniques, on constate que l'on peut démasquer certaines de ces ouvertures sans que le son soit modifié. Les tranches d'air correspondantes sont précisément celles où se forment des *ventres*, pour l'harmonique dont il s'agit : en effet, il ne s'y produit, pendant la vibration, ni compression, ni dilatation, puisqu'on peut mettre ces points en communication avec l'air extérieur sans altérer le son.

Fig. 554.  
Nœuds  
et ventres  
de vibration.

tout différent.

Pour vérifier que, dans les *nœuds*, il se produit une succession de compressions et de dilatations plus grandes que dans les autres points, on peut employer la disposition suivante, qui est due à M. Kœnig. — Dans la paroi d'un tuyau de bois (fig. 555), on a assujéti de petites capsules qui ont la forme de petites boîtes plates, limitées du côté de l'extérieur par une plaque de bois, et du côté de l'intérieur par une

membrane de caoutchouc. On y fait arriver du gaz d'éclairage par un tuyau latéral T, et on allume le gaz à l'extrémité des petits becs *n, v, n'*, qui correspondent à chacune des capsules. — Tant que le tuyau ne

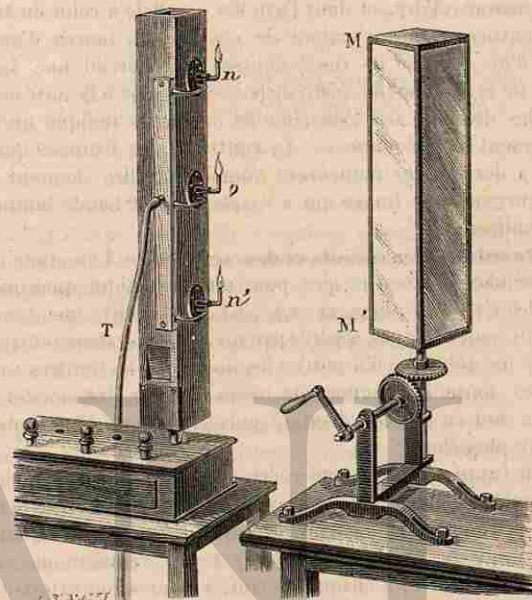


Fig. 555. — Expérience de Kœnig

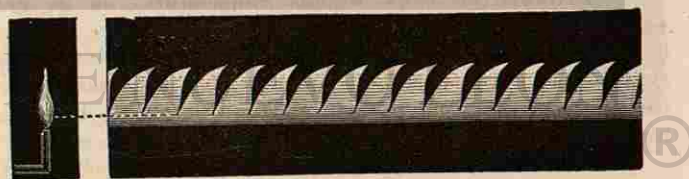


Fig. 556.

parle pas, toutes les flammes restent immobiles. Dès qu'on met le tuyau en vibration, certaines de ces flammes s'allongent et se raccourcissent périodiquement; ce sont celles qui correspondent à des *nœuds* : en ces points, les compressions et les dilatations périodiques de l'air intérieur se transmettent au gaz de la capsule par la membrane de



caoutchouc, et font ainsi varier la longueur de la flamme (\*). — Ces oscillations de la flamme sont d'ailleurs trop rapides pour être facilement perceptibles, quand on regarde les flammes directement. On dispose alors, en regard du tuyau, un miroir MM', qui a la forme d'un prisme quadrangulaire, et dont l'axe est parallèle à celui du tuyau. En faisant tourner ce miroir autour de son axe, au moyen d'une manivelle et d'un système de roues dentées, on aperçoit une succession d'images de la flamme (fig. 556), disposées les unes à la suite des autres comme des dents de scie : chacune de ces dents indique une période d'allongement de la flamme. — Au contraire, les flammes qui correspondent à des ventres demeurent immobiles ; elles donnent dans le miroir tournant une image qui a l'aspect d'une bande lumineuse de largeur uniforme (\*\*).

698. **Positions des nœuds et des ventres.** — Une étude attentive de ces phénomènes montre que, pour un harmonique quelconque, les nœuds et les ventres *alternent entre eux*, c'est-à-dire que deux nœuds consécutifs sont toujours séparés par un ventre, et deux ventres consécutifs par un nœud. — En outre, les nœuds et les ventres successifs sont, dans toute la longueur du tuyau, à égale distance les uns des autres. Ils sont en nombre d'autant plus grand que l'harmonique est d'un ordre plus élevé.

Dans un tuyau *fermé*, le fond correspond toujours à un nœud, puis que la tranche d'air qui est en contact avec le fond ne peut subir aucun déplacement. La bouche du tuyau correspond toujours à un ventre, puisque la tranche d'air qui s'y trouve communique avec l'atmosphère et doit être, à chaque instant, à la pression extérieure.

Dans un tuyau *ouvert*, les deux extrémités correspondent à des ventres, puisqu'elles sont l'une et l'autre en communication avec l'atmosphère.

699. **Distance de deux nœuds consécutifs, ou de deux ventres consécutifs.** — Prenons un tuyau quelconque, ouvert ou fermé, et faisons-lui rendre l'un de ses harmoniques. Déterminons, avec la sirène par exemple, le nombre  $n$  de vibrations, dans l'unité de temps, pour le son dont il s'agit. Si l'on désigne par  $\lambda$  la longueur particulière de l'onde sonore qui correspond à ce son, et par  $v$  la

(\*) Lorsque le courant de gaz est réglé de manière que les flammes soient très petites, la vibration a pour effet d'éteindre brusquement celles qui correspondent à des nœuds.

(\*\*) Le tuyau représenté par la figure 555, qui est un tuyau *ouvert*, porte trois capsules, situées au *premier quart*, au *second quart*, et au *troisième quart* de sa longueur. Lorsqu'on fait rendre à ce tuyau son premier harmonique, c'est-à-dire celui qui est immédiatement au-dessus du son fondamental, l'observation des flammes montre que la tranche du milieu  $v$  correspond à un ventre, et que les tranches  $n$  et  $n'$  correspondent à des nœuds. — Ce résultat particulier rentre, comme on va le voir, dans la loi générale qui sera indiquée plus loin.

vite se de propagation du son dans l'air, nous avons vu (676) que l'on a, en général,  $v = n\lambda$ , et par suite :

$$\lambda = \frac{v}{n}.$$

Or, si l'on compare la longueur  $\lambda$ , ainsi trouvée, à la distance  $D$  qui sépare deux nœuds consécutifs, ou deux ventres consécutifs, distance déterminée par l'expérience, on trouve toujours que l'on a

$$D = \frac{\lambda}{2}.$$

Ce résultat d'expérience, qui s'applique à un harmonique quelconque, va nous permettre de déterminer *a priori* les lois des harmoniques, pour chaque espèce de tuyaux.

700. **Lois des harmoniques des tuyaux.** — 1° *Tuyaux fermés.*

— Soient  $n$  (fig. 557) le fond du tuyau, qui correspond à un nœud ;  $v''$  la bouche, qui correspond à un ventre. D'après ce qu'on vient de voir, les nœuds et les ventres intermédiaires, pour un harmonique déterminé, diviseront toujours la longueur  $nv''$  en un nombre *impair* de parties, égales au quart de la longueur d'onde de cet harmonique. Si donc on désigne par  $L$  la longueur du tuyau, par  $2p + 1$  le nombre de ses subdivisions, et par  $\lambda$  la longueur de l'onde correspondante, on aura

$$(1) \quad L = (2p + 1) \frac{\lambda}{4}.$$

Si  $p = 0$ , c'est-à-dire s'il n'y a ni nœud ni ventre entre la bouche et le fond du tuyau, le tuyau rend le son *fondamental*, et l'on a  $\lambda = 4L$ , c'est-à-dire que la longueur d'onde qui correspond au son fondamental d'un tuyau fermé est égale à 4 fois la longueur de ce tuyau.

Si, dans la relation (1), on remplace la longueur d'onde  $\lambda$  par sa valeur  $\frac{v}{n}$ , il vient  $L = (2p + 1) \frac{v}{4n}$  ; d'où

$$n = (2p + 1) \frac{v}{4L}.$$

Pour avoir les nombres de vibrations du son fondamental et des harmoniques successifs du tuyau, on devra, dans cette formule, donner successivement à  $p$  toutes les valeurs entières, 0, 1, 2, 3, ... La quantité  $2p + 1$  devient alors successivement égale aux nombres impairs



Fig. 557.

1, 3, 5, 7, ...; et comme  $\frac{v}{4L}$  est constant, on est conduit à la loi suivante : Les nombres des vibrations qui correspondent au son fondamental et aux harmoniques successifs d'un tuyau fermé varient comme les nombres impairs consécutifs. — C'est ce que vérifie l'expérience, par la détermination des intervalles musicaux entre le son fondamental et les harmoniques successifs du tuyau.

2° *Tuyaux ouverts.* — Soit  $v$  (fig. 538) l'extrémité ouverte du tuyau, qui correspond à un ventre; soit  $v''$  la bouche, qui correspond également à un ventre. Pour un harmonique quelconque, les nœuds et les ventres intermédiaires diviseront toujours la longueur  $v''v$  en un nombre pair de parties, égales au quart de la longueur d'onde de cet harmonique; on aura donc

$$(2) \quad L' = 2p' \frac{\lambda}{4} = p' \frac{\lambda}{2},$$

$L'$  étant la longueur du tuyau et  $2p'$  le nombre de ses subdivisions. Si, dans cette relation (2), on remplace  $\lambda$  par  $\frac{v}{n}$ ,

il vient  $L' = p' \frac{v}{2n}$ ; d'où :

$$n = p' \frac{v}{2L'}$$

Pour avoir les nombres de vibrations du son fondamental et des harmoniques successifs du tuyau, on devra donner à  $p'$  les valeurs 1, 2, 3, 4...; ce qui conduit aux deux résultats suivants : Dans un tuyau ouvert, la longueur d'onde du son fondamental est double de la longueur du tuyau. — Les nombres de vibrations du son fondamental et des divers harmoniques varient comme les nombres entiers successifs. C'est ce que l'expérience vérifie, par la détermination des intervalles musicaux entre le son fondamental et les harmoniques successifs (\*).

(\*) Ces formules comprennent également les lois auxquelles sont soumis les sons fondamentaux, pour des tuyaux de longueurs différentes (695).

En effet, pour un tuyau fermé, on a, en faisant  $p = 0$  dans la formule qui donne la valeur générale de  $n$ , et désignant par  $n_1$  le nombre de vibrations du son fondamental :

$$n_1 = \frac{v}{4L};$$

ce qui montre que le nombre de vibrations de ce son est inversement proportionnel à la longueur du tuyau.

De même, pour un tuyau ouvert, en faisant  $p' = 1$ , on a, pour le son fondamental,

$$n_1 = \frac{v}{2L},$$

701. **Détermination de la vitesse du son dans les gaz, au moyen des tuyaux sonores.** — Supposons qu'on fasse rendre à un tuyau sonore, ouvert ou fermé, un harmonique d'un certain ordre, et qu'on détermine, par l'expérience, la distance  $D$  qui sépare deux nœuds consécutifs. La longueur de l'onde correspondante étant égale à  $2D$ , si l'on désigne par  $n$  le nombre de vibrations par seconde, et par  $v$  la vitesse de propagation du son dans l'air, on aura

$$(1) \quad v = 2Dn.$$

Faisons parler le même tuyau avec un gaz autre que l'air, et amenons-le à donner l'harmonique de même ordre, caractérisé par la même distance  $D$  de deux nœuds consécutifs; si  $n'$  est le nombre de vibrations, et  $v'$  la vitesse du son dans ce gaz, on aura

$$(2) \quad v' = 2Dn'.$$

De ces égalités (1) et (2), on tire :  $\frac{v'}{v} = \frac{n'}{n}$ , ou  $v' = v \times \frac{n'}{n}$ ; la vitesse  $v$  dans l'air étant supposée connue par des expériences directes (671), on en déduira la vitesse  $v'$ . — Dulong a mesuré par cette méthode les vitesses du son dans un certain nombre de gaz.

702. **Vitesse du son dans les liquides.** — On peut déterminer d'une manière semblable la vitesse du son dans un liquide, dans l'eau par exemple. Un tuyau étant plongé complètement dans l'eau, on le fait parler en y amenant un courant d'eau, et on détermine le nombre de vibrations  $n'$  qui correspond à un harmonique déterminé; puis, le nombre de vibrations  $n$  qui correspond au même harmonique lorsque le tuyau vibre dans l'air. On a encore :  $v' = v \times \frac{n'}{n}$ , ce qui donne la valeur de la vitesse de propagation  $v'$  dans l'eau, connaissant la vitesse  $v$  dans l'air. — Wertheim a appliqué cette méthode à un certain nombre de liquides : cette méthode est évidemment plus générale que la méthode de détermination directe qui avait été appliquée à l'eau par Sturm et Colladon (672).

703. **Tuyaux à anche.** — Outre les tuyaux à bouche, on emploie encore, dans les orgues, des tuyaux à anche, dans lesquels le mode d'ébranlement de l'air est différent.

Une anche est une petite lame élastique, fixée par une de ses extrémités et mise en vibration par un courant d'air. — Dans les tuyaux employés pour la construction des orgues, l'anche se place ordinairement à la partie supérieure. — On distingue les anches en anches battantes et anches libres.

Dans l'anche battante (fig. 539), la lame élastique  $l$  vient s'appliquer

ce qui donne encore la même loi. — Enfin, pour que  $n_1$  soit égal à  $n_1$ , il suffit que  $L'$  soit égal à  $2L$ , ce qui conduit à ce résultat déjà énoncé (695) : le son fondamental d'un tuyau fermé est le même que celui d'un tuyau ouvert de longueur double.

sur les bords d'une petite rigole *r*, fermée à sa partie inférieure par une petite cloison horizontale. L'air amené dans le tuyau *T* ne peut s'échapper qu'en soulevant la lame *l*; celle-ci revient, en vertu de son élasticité, pour se soulever de nouveau, et ainsi de suite. Elle accomplit donc une série de vibrations, en frappant à chaque fois les bords de la rigole; il en résulte un son, dont la hauteur dépend de la longueur de la partie vibrante ou *lanquette*. On règle cette longueur au moyen de la *rasette*, formée par un fil de fer replié *f*, qui appuie en *z* sur la lanquette. — Le son que rend l'anche battante est généralement éclatant et nasillard; on le rend plus agréable en fixant, au-dessus de l'extrémité du tuyau, un *cornet d'harmonie* *C*, dont l'air entre en vibration en même temps que l'anche.

L'anche libre (fig. 540) présente une disposition analogue; mais la lanquette *l* ne touche pas les bords de l'ouverture par laquelle s'échappe l'air: elle oscille librement des deux côtés du plan de cette ouverture et produit ainsi des sons moins stridents. On l'emploie peu dans les grandes orgues, mais elle figure exclusivement dans l'harmonium et dans l'orgue expressif.

Les grandes orgues présentent plusieurs *jeux de tuyaux*, soit à bouche, soit à anche, destinés à produire des effets variés. L'exécutant amène à volonté le vent de la soufflerie dans tel ou tel jeu, en faisant mouvoir des *registres*, c'est-à-dire des plaques à coulisses percées de trous qui dégagent ou interceptent les ouvertures des tuyaux.

704. **Instruments à vent.** — Les divers instruments à vent se rattachent à l'un ou à l'autre type de tuyaux sonores que nous venons d'indiquer.

Le *stageolet* (fig. 541) présente une embouchure *E* que l'exécutant place entre ses lèvres, et qui est semblable à celle des *tuyaux à bouche*. Le courant d'air vient se briser sur un biseau *B*, placé sur le côté de l'instrument. Le tuyau est percé d'un



Fig. 539. — Tuyau à anche battante.



Fig. 540.  
Anche libre.



Fig. 541.  
Flageolet.

certain nombre de trous, *m*, *n*, *p*, *q*, *r*, sur lesquels l'exécutant place les extrémités des doigts. — Lorsque tous les trous sont bouchés, le son produit est le son fondamental du tuyau, ou l'un de ses harmoniques, selon que le courant d'air est plus ou moins fort. En débouchant tel ou tel trou, l'exécutant transforme l'instrument en un tuyau de longueur moindre, et modifie ainsi la hauteur des sons obtenus.

Dans la *flûte*, l'ébranlement de l'air se produit encore d'une manière semblable; l'embouchure est un trou ovale, pratiqué sur le côté du tuyau et ayant ses bords taillés en biseau. L'exécutant place ses lèvres au-dessus de cette ouverture et à une petite distance.

Dans la *clarinette* (fig. 542), l'embouchure est absolument différente: c'est une *embouchure à anche*. L'anche est formée par une petite lame de roseau *C*, adaptée à un bec de buis *B*, de manière à ne laisser qu'un passage étroit entre elle et le bec lui-même. — Cette embouchure étant placée entre les lèvres de l'exécutant, le courant d'air met l'anche en vibration: ce sont les lèvres qui jouent le rôle de la *rasette*, c'est-à-dire qui déterminent la longueur de la partie vibrante de l'anche, en appuyant plus ou moins fortement sur sa surface. Dans la longueur du tuyau, sont distribués des trous que l'on peut ouvrir ou fermer à volonté, soit directement avec l'extrémité des doigts, soit au moyen de clefs pour les trous plus éloignés. — Le *hautbois* et le *basson* présentent une disposition semblable, avec cette différence que l'embouchure est formée de deux lames de roseau appliquées l'une contre l'autre par leurs bords.

Enfin, le *cor*, la *trompette*, l'*ophicléide* et les instruments de cuivre en général diffèrent encore des précédents par leur embouchure, qui a reçu le nom d'*embouchure de cor*. Elle est formée par une sorte d'entonnoir, ou par une cavité hémisphérique (fig. 545), qu'on applique contre les lèvres légèrement écartées l'une de l'autre. Les lèvres elles-mêmes jouent alors le rôle de véritables anches: le passage de l'air leur communique un mouvement vibratoire, dont la rapidité dépend à la fois de la force du vent et de l'énergie avec laquelle l'exécutant serre la bouche contre l'ouverture. C'est la combinaison de ces deux efforts qui rend si difficile, au moins dans les commencements, l'étude de ces instruments.



Fig. 542.  
Clarinette.



Fig. 545.  
Embouchures de cor.

Le cor (fig. 544) est formé par un tuyau contourné en spirale TT, et terminé par une partie évasée P, qu'on appelle le *pavillon*. Il ne peut donner que le son fondamental et ses divers harmoniques. On

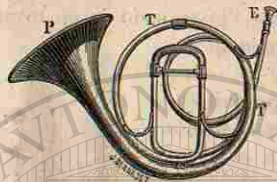


Fig. 544. — Cor d'harmonie.

peut cependant lui faire rendre quelques-unes des notes intermédiaires, en bouchant d'une manière plus ou moins complète, avec la main fermée, l'ouverture du pavillon. Mais les sons ainsi obtenus sont toujours plus ou moins sourds, et il est même difficile de leur donner toujours une justesse satisfaisante.

L'*ophicléide* présente, dans sa longueur, un certain nombre de trous qu'on peut ouvrir à volonté au moyen de *clefs*, de manière à multiplier beaucoup les sons que peut rendre l'instrument. — On trouve une disposition semblable dans les *saxophones*, dont on fait usage dans la musique militaire (\*).

Dans le *trombone*, une partie mobile à coulisse permet d'allonger ou de raccourcir brusquement le tuyau sonore, et de produire ainsi des sons plus ou moins élevés. — Dans le *cornet à pistons*, l'exécutant modifie la longueur du tuyau au moyen de pistons qui interceptent ou font entrer dans la partie vibrante diverses portions supplémentaires.

(\*) Cette dénomination est empruntée au nom du fabricant, M. Sax, qui en a, le premier, montré toutes les ressources.

## CHAPITRE IV

### VIBRATIONS DES CORPS SOLIDES

#### I. — VIBRATIONS DES CORDES.

705. **Lois des vibrations transversales.** — Lorsqu'une corde est tendue entre deux points fixes, on peut lui faire produire des sons en la faisant vibrer soit transversalement, soit longitudinalement. — Nous étudierons d'abord les vibrations *transversales*, qui sont les plus importantes au point de vue des applications.

On produit les vibrations transversales en pincant la corde, c'est-à-dire en l'écartant de sa position d'équilibre, pour l'abandonner ensuite à elle-même, ou bien en la frottant avec un archet perpendiculairement à sa longueur. — Dans l'un ou l'autre cas, chacun de ses points exécute une série de vibrations perpendiculairement à la direction primitive de la corde.

Les nombres des vibrations, pour des cordes différentes, varient :

- 1° En raison inverse des longueurs ;
- 2° En raison inverse des diamètres ;
- 3° Proportionnellement aux racines carrées des poids tenseurs ;
- 4° En raison inverse des racines carrées des densités.

Ces quatre lois sont comprises dans la formule suivante, qui est due à Lagrange : Si l'on désigne par  $n$  le nombre des vibrations en une seconde, on a, pour une corde quelconque,

$$n = \frac{1}{2rl} \sqrt{\frac{gP}{\pi d}}$$

$r$  est le rayon et  $l$  la longueur de la corde ;  $d$  est sa densité et  $P$  est le poids tenseur ou, plus exactement, la masse dont le poids tend la corde ;  $g$  est l'accélération due à la pesanteur, exprimée au moyen de la même unité que les autres quantités linéaires  $r$  et  $l$  ; enfin  $\pi$  est le rapport de la circonférence au diamètre, égal à 3,1416 (\*).

(\*) Cette formule permet de trouver, non seulement le rapport entre les nombres

Le cor (fig. 544) est formé par un tuyau contourné en spirale TT, et terminé par une partie évasée P, qu'on appelle le pavillon. Il ne peut donner que le son fondamental et ses divers harmoniques. On

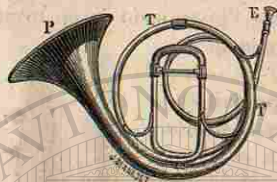


Fig. 544. — Cor d'harmonie.

peut cependant lui faire rendre quelques-unes des notes intermédiaires, en bouchant d'une manière plus ou moins complète, avec la main fermée, l'ouverture du pavillon. Mais les sons ainsi obtenus sont toujours plus ou moins sourds, et il est même difficile de leur donner toujours une justesse satisfaisante.

L'*ophicléide* présente, dans sa longueur, un certain nombre de trous qu'on peut ouvrir à volonté au moyen de *clefs*, de manière à multiplier beaucoup les sons que peut rendre l'instrument. — On trouve une disposition semblable dans les *saxophones*, dont on fait usage dans la musique militaire (\*).

(\*) Cette dénomination est empruntée au nom du fabricant, M. Sax, qui en a, le premier, montré toutes les ressources.

## CHAPITRE IV

### VIBRATIONS DES CORPS SOLIDES

#### I. — VIBRATIONS DES CORDES.

705. **Lois des vibrations transversales.** — Lorsqu'une corde est tendue entre deux points fixes, on peut lui faire produire des sons en la faisant vibrer soit transversalement, soit longitudinalement. — Nous étudierons d'abord les vibrations *transversales*, qui sont les plus importantes au point de vue des applications.

On produit les vibrations transversales en pincant la corde, c'est-à-dire en l'écartant de sa position d'équilibre, pour l'abandonner ensuite à elle-même, ou bien en la frottant avec un archet perpendiculairement à sa longueur. — Dans l'un ou l'autre cas, chacun de ses points exécute une série de vibrations perpendiculairement à la direction primitive de la corde.

Les nombres des vibrations, pour des cordes différentes, varient :

- 1° En raison inverse des longueurs ;
- 2° En raison inverse des diamètres ;
- 3° Proportionnellement aux racines carrées des poids tenseurs ;
- 4° En raison inverse des racines carrées des densités.

Ces quatre lois sont comprises dans la formule suivante, qui est due à Lagrange : Si l'on désigne par  $n$  le nombre des vibrations en une seconde, on a, pour une corde quelconque,

$$n = \frac{1}{2rl} \sqrt{\frac{gP}{\pi d}}$$

$r$  est le rayon et  $l$  la longueur de la corde ;  $d$  est sa densité et  $P$  est le poids tenseur ou, plus exactement, la masse dont le poids tend la corde ;  $g$  est l'accélération due à la pesanteur, exprimée au moyen de la même unité que les autres quantités linéaires  $r$  et  $l$  ; enfin  $\pi$  est le rapport de la circonférence au diamètre, égal à 3,1416 (\*).

(\*) Cette formule permet de trouver, non seulement le rapport entre les nombres

706. **Vérifications expérimentales des lois précédentes, à l'aide du sonomètre.** — Le sonomètre (fig. 545) se compose d'une caisse en bois de sapin, qui porte deux chevalets fixes, *ac*, *bd*, séparés l'un de l'autre par une distance d'un mètre. Sur ces chevalets s'appuie une première corde métallique *dc*, tendue entre les chevilles *q* et *r* : la clef A permet de régler à volonté la tension de cette corde et, par suite, le son qu'elle rend. A la cheville *p* est assujettie une



Fig. 545. — Sonomètre.

seconde corde métallique *ba*, qui, s'appuyant sur les chevalets, vient passer sur une poulie et soutient en P un poids. — Un petit chevalet mobile *m*, qu'on placera au-dessous de cette dernière corde, permettra de limiter à volonté la longueur de la partie vibrante : on mesurera cette longueur au moyen d'une règle fixée sur la caisse et divisée en millimètres.

1° Pour vérifier la loi des longueurs, commençons par tendre la corde antérieure *ba* au moyen d'un poids déterminé P, et réglons ensuite la tension de la corde postérieure *dc*, à l'aide de la clef A, de manière que

de vibrations que deux cordes exécutent dans le même temps, mais encore le nombre absolu des vibrations d'une corde quelconque, dans l'unité de temps. Pour l'appliquer à cette détermination, il est commode de faire usage du système d'unités C. G. S. ; alors *r*, *l* et *g* sont évalués en centimètres ; P est évalué en grammes. — On peut aussi exprimer les longueurs *r*, *l* et *g* au moyen d'une même unité linéaire, arbitrairement choisie, à la condition de prendre pour unité de masse, dans l'évaluation de P, la masse du cube d'eau dont le côté est égal à l'unité de longueur. — Si, par exemple, on se propose de trouver le nombre de vibrations d'une corde de fer, ayant 1 mètre de longueur, deux dixièmes de millimètre de rayon, et tendue par un poids de 10 kilogrammes, on exprimera *l*, *r* et *g* en décimètres, P en kilogrammes, et l'on aura

$$n = \frac{1}{2 \times 0.002 \times 10} \sqrt{\frac{98,096 \times 10}{5,1416 \times 7,8}} = 158,15.$$

Ce nombre de vibrations correspond à un son compris entre *ut*<sub>2</sub> et *ut*<sub>3</sub> ; et si l'on divise 158,15 par le nombre de vibrations de *ut*<sub>2</sub>, savoir 150,3, on trouve 1,212, résultat très peu différent de  $1 \frac{200}{4} = \frac{5}{4} : \frac{25}{24}$ , qui mesure l'intervalle de *ut* à *mi*<sub>♭</sub>. La note donnée par la corde se confond donc à peu près avec le *mi*<sub>♭</sub>.

les sons produits par les deux cordes soient à l'unisson. — Plaçons alors le chevalet mobile *m* au milieu de la corde antérieure et comparons le son qu'elle produit à celui qu'elle rendait précédemment, c'est-à-dire à celui que rend toujours la corde postérieure. On constate que ce son est l'octave aiguë du premier. En d'autres termes, en réduisant la longueur de la corde à moitié, on obtient un nombre de vibrations double (687). — En limitant de même sur la corde antérieure, au moyen du chevalet mobile, une longueur égale aux  $\frac{2}{3}$  de sa longueur totale, et comparant le nouveau son qu'elle produit à celui que continue à rendre la corde postérieure, on trouve que le nouveau son est à la quinte du premier ; dès lors, d'après ce que nous avons vu (687), le nombre des vibrations, pour cette nouvelle longueur, est égal aux  $\frac{3}{2}$  du nombre de vibrations primitif. — En général, quand on fait varier la longueur d'une corde, le nombre des vibrations varie en raison inverse de la longueur de la partie vibrante.

2° Pour vérifier la loi des diamètres, on choisit, par exemple, quatre cordes de même matière, dont les diamètres soient entre eux comme les nombres 4, 3, 2, 1. On place la première en *ba*, avec un certain poids tenseur P, et on met la corde fixe *dc* à l'unisson avec elle, au moyen de la clef A. On remplace alors successivement la première corde par les trois autres, en employant toujours le même poids tenseur P, et l'on compare les sons qu'elles rendent avec celui de la corde fixe. — On trouve que les quatre sons peuvent être représentés par les notes

*ut*<sub>1</sub>, *fa*, *ut*<sub>2</sub>, *ut*<sub>3</sub>,

dont les nombres de vibrations sont entre eux comme  $1, \frac{1}{2}, 2, 4$ , ou comme

$\frac{1}{4}, \frac{1}{3}, \frac{1}{2}, 1$ .

Ces nombres de vibrations sont donc en raison inverse des diamètres.

3° La loi des tensions se vérifie d'une manière analogue. La corde *ba* étant chargée d'un certain poids, on met *dc* à l'unisson avec elle. Puis on charge la corde *ba* de poids égaux à 4, 9, 16 fois le poids primitif. Si le premier son obtenu est *ut*<sub>1</sub>, on trouve, pour les suivants :

|                                    |                        |                        |                         |                        |
|------------------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|
| Poids tenseurs . . . . .           | 1                      | 4                      | 9                       | 16                     |
| Sons rendus par la corde . . . . . | <i>ut</i> <sub>1</sub> | <i>ut</i> <sub>2</sub> | <i>sol</i> <sub>2</sub> | <i>ut</i> <sub>3</sub> |
| Nombres de vibrations . . . . .    | 1                      | 2                      | 3                       | 4                      |

ce qui démontre que les nombres de vibrations sont proportionnels aux racines carrées des poids tenseurs.

4° Enfin, pour la loi des densités, on peut faire usage de deux cordes de même diamètre, l'une de platine et l'autre de fer, et constater que, sous l'action de poids égaux, des longueurs égales de ces deux cordes produisent des sons dont l'intervalle est en raison inverse des

racines carrées des densités, c'est-à-dire sensiblement égal à  $\sqrt{\frac{7,8}{25}}$ .

**707. Harmoniques des cordes.** — On peut, en opérant comme nous allons l'indiquer, faire produire à une même corde, sans en changer la tension ni la longueur, une série de sons différents, qu'on nomme ses *harmoniques*. Le plus grave, celui que nous avons seul considéré jusqu'ici, est le *son fondamental*.

1° Soit AB (fig. 546) l'une des cordes du sonomètre; pour obtenir le

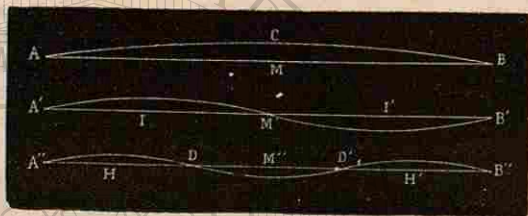


Fig. 546.

son fondamental, on attaque cette corde en un point situé à peu de distance de son milieu M. Le gonflement apparent de la corde montre que tous ses points vibrent perpendiculairement à sa longueur et que l'amplitude des vibrations est plus grande au milieu que partout ailleurs. Le point M prend le nom de *ventre de vibration*, et l'on appelle *nœuds* les extrémités A et B qui, seules, ne vibrent pas.

2° Plaçons maintenant le chevalet mobile *m* du sonomètre sous le milieu de la corde, et appuyons la corde très légèrement avec le doigt sur l'arête du chevalet; représentons la corde au repos par la droite A'B', et soit M' son milieu. Si l'on attaque avec l'archet l'une des moitiés, A'M' par exemple, on obtient un son qui est l'*octave aiguë* du son fondamental, et qui, par conséquent, correspond à un nombre *double* de vibrations dans le même temps. — Pour expliquer la production de ce deuxième son, il faut observer que le milieu M' de la corde, maintenu par la pression du doigt, ne peut prendre aucun mouvement vibratoire, et devient, par conséquent, un *nœud*; mais la seconde moitié MB' entre en vibration, en même temps que A'M', car, si l'on place de petits chevrons de papier sur différents points de MB', ces chevrons sont renversés, dès qu'on attaque, avec l'archet, un point de A'M'. La corde s'est donc divisée en deux parties, qui vibrent séparément comme le feraient deux cordes de longueur moitié moindre : le son produit doit donc bien être l'*octave aiguë* du son fondamental (\*).

(\*) L'expérience suivante, due à Duhamel, montre d'ailleurs que les deux moitiés de la corde vibrent en sens contraire, c'est-à-dire que, tandis que A'M' s'infléchit d'un

5° On peut également faire produire à une corde un son correspondant à un nombre de vibrations *triple* de celui du son fondamental. Soient A''B'' la position d'équilibre de la corde, D et D' les points qui la divisent en trois parties égales : plaçons le chevalet sous le point D, appuyons légèrement la corde sur l'arête de ce chevalet, et attaquons avec l'archet l'un des points de A''D. Si le son fondamental était *ut*<sub>1</sub>, le son produit sera maintenant *sol*<sub>2</sub>, qui correspond à un nombre triple de vibrations. — En plaçant des chevrons de papier sur différents points de DB'', on constate encore que tous ces chevrons se renversent, à l'exception de celui qui est placé en D'. Le point D' est donc un *nœud*, aussi bien que le point D, et la corde s'est subdivisée en trois parties égales, vibrant chacune séparément.

On arrive aux mêmes conclusions en employant une longue corde blanche, tendue au-dessus d'une planche noire; lorsqu'on l'ébranle de manière à lui faire produire un de ses harmoniques, l'œil voit la corde se partager en espèces de fuseaux, renflés chacun en leur milieu, et séparés par des étranglements qui correspondent aux nœuds.

En généralisant ces résultats, on est conduit à cette loi : *Les nombres de vibrations du son fondamental et des harmoniques d'une même corde, vibrant transversalement, varient comme les nombres entiers successifs.*

**708. Notions générales sur les instruments à cordes.** — Les instruments à cordes qu'on emploie en musique sont tous fondés sur les lois des vibrations transversales. — Les uns, comme le piano et la harpe, sont des instruments à *sons fixes*, et exigent au moins autant de cordes qu'ils doivent produire de notes différentes. — Les autres, comme le violon, le violoncelle, sont des instruments à *sons variables*, et comprennent un nombre de cordes bien moins considérable.

Dans le *piano*, les vibrations sont produites par le choc de petits marteaux garnis de peau, dont chacun correspond à une des touches du clavier. A mesure que l'on abandonne les touches, elles laissent retomber, sur les cordes correspondantes, de petits *étouffoirs* qui éteignent les vibrations. — Au moyen de la *pédale*, on peut éloigner à volonté tous les étouffoirs : les vibrations des cordes ébranlées se prolongent alors beaucoup plus longtemps.

La *harpe* établit le passage entre les instruments à sons fixes et les instruments à sons variables. Les cordes qu'on fait vibrer en les pinçant avec les doigts, correspondent aux notes naturelles de la gamme :

côté de la position d'équilibre, M'B' s'infléchit de l'autre côté, comme le représente la figure. La corde étant légèrement appuyée par son milieu sur un chevalet, si on l'attaque en même temps des deux côtés de ce point, avec deux archets mis en mouvement dans le même sens, on n'obtient aucun son; tandis qu'on obtient l'octave du son fondamental quand on fait mouvoir les deux archets en sens contraire.

à l'aide des pédales, on peut modifier légèrement les longueurs des parties vibrantes, de manière à obtenir les dièses et les bémols.

Dans le *violon*, le *violoncelle*, la *contrebasse*, chaque corde peut produire un grand nombre de sons, suivant la longueur que l'exécutant laisse à la partie vibrante, en appuyant avec les doigts de la main gauche sur tel ou tel point de la corde; la main droite fait mouvoir l'archet. — Dans ces trois instruments, les vibrations se communiquent à la face supérieure de la caisse; de celle-ci, à la face inférieure, soit par les côtés, soit à l'aide d'une pièce intermédiaire qu'on appelle l'*âme*; enfin, des deux faces, à l'air intérieur. Toutes ces vibrations simultanées produisent un renforcement du son : le mérite de l'instrument dépend surtout de l'égalité avec laquelle le renforcement s'opère pour les sons de diverses hauteurs; il est subordonné à la qualité des bois et à la disposition relative des parties.

**709. Vibrations longitudinales des cordes.** — Pour faire vibrer longitudinalement une corde, on la frotte, dans le sens de sa longueur, avec un morceau de drap imprégné de colophane.

La formule suivante, qui est due à Lagrange, donne le nombre de vibrations  $n'$  du son fondamental; on a :

$$n' = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{e}{d}}$$

$l$ ,  $d$  et  $e$  étant la longueur, la densité et le coefficient d'élasticité (note de la page 584) de la corde. Si on remarque que  $\sqrt{\frac{e}{d}}$  représente la vitesse de propagation du mouvement vibratoire dans la corde (677), la formule devient :

$$n' = \frac{v'}{2l}$$

Cette formule, identique à celle qui donne le nombre de vibrations dans un tuyau ouvert, rempli d'air (note de la page 608), s'établirait au moyen des mêmes raisonnements que pour les tuyaux ouverts (700). Remarquons seulement que, tandis qu'un tuyau ouvert présente deux *ventres* à ses extrémités, une corde vibrant longitudinalement présente deux *nœuds* à ses extrémités.

Si la corde est faite d'un métal élastique, comme l'acier, en raison de la grandeur de l'élasticité  $e$ , le son produit par les vibrations longitudinales de la corde doit être très aigu. — C'est ce que l'expérience confirme.

Le nombre des vibrations est indépendant de la tension de la corde; il est cependant indispensable de tendre la corde, pour lui donner une forme rectiligne.

Enfin, les nombres de vibrations qui correspondent au son fondamental et aux harmoniques successifs sont, comme pour les tuyaux ouverts, représentés par la série des nombres entiers successifs.

## II. — VIBRATIONS DES VERGES, DES PLAQUES, ETC.

**710. Vibrations transversales des verges.** — **Diapason.** — Les verges ou tiges rigides se distinguent des cordes, en ce qu'elles peuvent être mises en vibration sans qu'il soit nécessaire de les tendre.

Pour des verges prismatiques *semblablement assujetties* (\*), l'expérience montre que les nombres de vibrations *transversales* qui correspondent au son fondamental sont :

1° *Inversement proportionnels aux carrés des longueurs;*

2° *Directement proportionnels aux épaisseurs;*

3° *Indépendants de la largeur*, pourvu que celle-ci soit très petite par rapport à la longueur.

On entend ici, par *épaisseur*, celle des deux dimensions transversales qui est parallèle au plan dans lequel s'effectuent les vibrations; et par *largeur*, la dimension perpendiculaire à ce plan.

Pour vérifier ces lois, dans le cas où la verge est encastrée à l'une de ses extrémités et libre à l'autre, on prend une verge AB (fig. 515), dont on fixe un point C dans un étau : on la fait vibrer en la frottant avec un archet perpendiculairement à sa longueur. — On constate ainsi que, en réduisant la longueur à moitié, on élève le son de deux octaves, etc. — En remplaçant la verge AB par une autre, d'épaisseur double, pour la même longueur de la partie vibrante, le son s'élève d'une octave. — Enfin deux verges de même épaisseur, et de largeurs différentes, produisent le même son, quand on fait vibrer une même longueur de chacune d'elles.

Le *diapason* est une verge d'acier, courbée en forme de fourche, que l'on fait vibrer transversalement, soit à l'aide d'un archet, soit en frappant l'une des branches contre un corps dur, soit enfin en introduisant de force un petit cylindre de bois ou de métal entre les deux branches (fig. 512), et le faisant sortir vivement par l'extrémité libre de la fourche. — On emploie le diapason pour accorder les instruments : le diapason *normal* donne, comme on l'a vu (695), la note  $la_5$  qui correspond à 435 vibrations par seconde.

**711. Vibrations longitudinales des verges.** — On produit des



Fig. 547.

vibrations *longitudinales*, en frottant une verge, ou tige rigide, dans le

(\*) Les divers modes d'*assujettissement* consistent, soit à encastrer la verge à l'une de ses extrémités, en la laissant libre à l'autre; soit à l'encastrer à ses deux extrémités; soit à l'appuyer par une de ses extrémités contre un plan fixe, etc. — Lorsqu'on assujettit successivement une même verge de diverses manières, le son fondamental varie avec le mode d'assujettissement.



sens de la longueur, avec les doigts imprégnés de colophane (fig. 547), ou avec un morceau de drap mouillé (fig. 548). — Si la verge est fixée en son milieu K et que l'extrémité A s'appuie contre une bille d'ivoire C suspendue à un fil FC, on constate que la bille est vivement projetée dans le sens de l'axe. — Les sons obtenus sont remarquables par leur douceur et leur pureté.

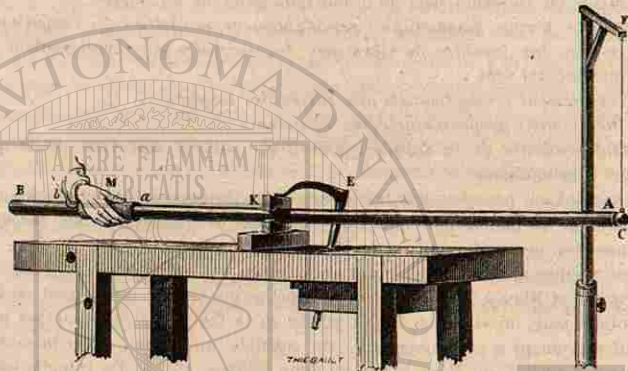


Fig. 548. — Vibrations longitudinales des verges élastiques.

Nous examinerons successivement les trois cas suivants :

1° Une extrémité de la verge est fixée, et l'autre est libre. — Les lois sont les mêmes que celles des tuyaux fermés (700, 1°). Pour une même verge, les nombres de vibrations du son fondamental et des harmoniques successifs varient comme les nombres impairs consécutifs. Pour des verges de même nature et de longueurs différentes, le nombre de vibrations du son fondamental est inversement proportionnel à la longueur.

2° Les deux extrémités sont libres. — Pour maintenir la verge, on la fixera par son milieu (fig. 547 ou 548); le point fixe devient un nœud de vibration, tandis que les extrémités sont des ventres. — Les lois sont les mêmes que pour les tuyaux ouverts (700, 2°). Les nombres de vibrations du son fondamental et des divers harmoniques varient comme les nombres entiers successifs. — Pour des verges de même nature et de longueurs différentes, le nombre de vibrations du son fondamental est inversement proportionnel à la longueur.

3° Les deux extrémités de la verge sont fixées. — Les lois sont les mêmes que celles des cordes vibrant longitudinalement; les nombres de vibrations du son fondamental et des divers harmoniques varient comme les nombres entiers successifs, 1, 2, 3, 4, 5, ... — Pour des verges de même nature et de longueurs différentes, le nombre de vibrations du son fondamental est inversement proportionnel à la longueur.

712. Détermination de la vitesse du son dans les solides, au moyen des vibrations longitudinales des verges. — Nous venons de voir (711, 2°) qu'une verge fixée par son milieu, et vibrant longitudinalement, est assimilable à un tuyau ouvert à ses deux extrémités. Supposons qu'on fasse rendre à cette verge le son fondamental, et déterminons

le nombre de vibrations  $n$  du son produit : si nous désignons par  $L$  la longueur de la verge, et par  $\lambda$  la longueur de l'onde qui s'y propage, on aura  $\lambda = 2L$ , ou, en remplaçant  $\lambda$  par  $\frac{v}{n}$ ,

$$v = 2L \times n,$$

ce qui permettra de déterminer la vitesse du son  $v$ , dans le corps solide qui constitue la verge.

On pourrait encore effectuer la même détermination, en faisant rendre à la verge un harmonique d'ordre quelconque : la longueur de l'onde  $\lambda'$  sera alors égale au double de la distance  $D$ , de deux nœuds consécutifs, distance qui sera déterminée par le numéro d'ordre de l'harmonique lui-même, comme dans un tuyau ouvert (700).

Connaissant la vitesse  $v$  évaluée en centimètres, et la densité absolue  $d$  de la substance, on en déduit l'élasticité, évaluée en dynes, en appliquant la formule de Newton :  $v = \sqrt{\frac{e}{d}}$ , d'où  $e = v^2 d$ . — Ce résultat doit concorder avec celui de la mesure directe de l'élasticité (note de la page 584).

713. Vibrations des plaques. — Lignes nodales. — Une plaque métallique circulaire telle que B (fig. 549) étant fixée sur un pied,

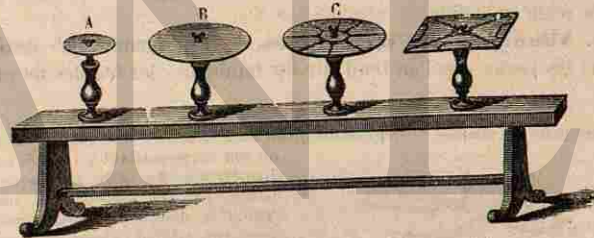


Fig. 549. — Vibrations des plaques. Lignes nodales.

par son centre de figure, faisons-la vibrer en frottant avec l'archet l'un des points de son contour, et en appuyant fortement le doigt sur un autre point : selon que ces deux points occuperont telle ou telle position, nous obtiendrons des sons différents. — Si, dans chaque cas, on couvre de sable fin la surface de la plaque, on voit le sable prendre des mouvements rapides, qui le portent vers certaines lignes où il s'accumule. Ces lignes nodales partagent la plaque en un certain nombre de parties, qui vibrent séparément comme le font les diverses parties d'une corde donnant un de ses harmoniques (\*).

(\*) Cette comparaison peut se poursuivre plus loin encore. Lorsqu'une corde se divise en deux ou plusieurs parties vibrantes, séparées par des nœuds, les vibrations sont de sens contraire dans deux segments consécutifs (Note de la page 616) : il en est

Mais, tandis qu'une corde peut vibrer transversalement sans qu'il se produise de nœuds entre ses extrémités, une plaque présente toujours des lignes nodales, même quand elle donne le son le plus grave qu'on puisse lui faire rendre.

L'expérience montre que, pour une même plaque, la production d'une même figure nodale est toujours accompagnée du même son. — Mais la réciproque n'est pas vraie : un même son peut correspondre à des dispositions différentes des lignes nodales.

Savart a fait une étude particulière des figures nodales qui correspondent aux divers harmoniques d'une même plaque. — Il a également établi les lois suivant lesquelles varient les sons produits par des plaques géométriquement semblables, mais de dimensions différentes. — Ces divers résultats sont surtout intéressants au point de vue de l'étude des lois de l'élasticité.

**714. Timbres et cloches.** — Les timbres, les cloches, les tam-tams, etc., se subdivisent, comme les plaques, en parties vibrantes, séparées par des lignes nodales. — On peut le démontrer, en mettant de l'eau dans un verre à pied et en attaquant avec un archet l'un des points du bord du verre : on voit la surface de l'eau se partager en un certain nombre de parties, dans lesquelles le liquide éprouve une vive agitation ; entre ces parties, se trouvent des lignes de repos, où le liquide reste immobile.

**715. Vibrations des membranes.** — Les membranes flexibles, comme les peaux que l'on tend sur les tambours, les feuilles de papier

de même pour les plaques. — Supposons qu'on fasse rendre à une plaque circulaire un son correspondant à 4 lignes nodales



Fig. 550. — Expérience de Lissajous.

déterminées dans l'air par les secteurs A, et ne laisse arriver à l'oreille que les mouvements concordants déterminés par les secteurs B : on constate que l'on entend alors un son *beaucoup plus intense*.

collées sur des cadres de bois, rendent des sons quand on les frappe ou qu'on les ébranle d'une manière quelconque. Elles peuvent aussi entrer en mouvement sous l'influence des vibrations qui leur sont transmises, au voisinage d'un timbre vibrant ou d'un tuyau sonore. Le sable répandu à leur surface accuse la formation de lignes nodales, généralement très compliquées. — L'expérience montre qu'une même membrane peut, avec une tension déterminée, rendre une série de sons, assez nombreux et assez voisins les uns des autres pour qu'on puisse, dans la pratique, considérer la membrane comme capable de vibrer à l'unisson de tous les sons qui ne s'écartent pas trop du son fondamental. — Lorsqu'on fait varier la tension, on modifie à la fois le son fondamental et toute la série de sons que la membrane peut rendre.

Nous verrons que ces propriétés trouvent leur application dans la transmission des sons à la membrane du tympan.

## CHAPITRE V

### TIMBRES DES SONS.

**716. Sons composés. — Causes générales du timbre.** — Lorsqu'on écoute avec attention le son rendu par une corde de piano ou par une corde de violon, vibrant dans toute sa longueur, on entend généralement, en même temps que le son fondamental, un ou plusieurs de ses harmoniques : en d'autres termes, la sensation perçue par l'oreille est celle d'un son composé.

Pour se rendre compte de ce phénomène, il suffit de répéter l'expérience sur la corde d'un sonomètre : il n'est pas difficile de constater que la corde, tout en exécutant ses mouvements de totalité, se subdivise en un certain nombre de parties, dont les mouvements propres se superposent au mouvement d'ensemble. — Lorsque, par exemple, la

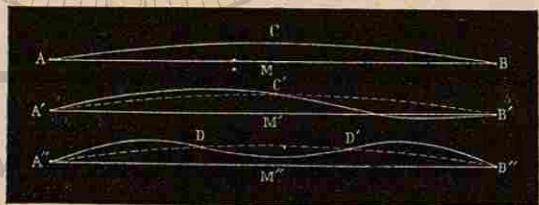


Fig. 551.

corde donne *simultanément* les sons 1 et 2, elle vibre tout d'une pièce comme la corde AB (fig 551) et produit ainsi le son fondamental; mais, en même temps, elle se partage en deux parties A'C, C'B', dont chacune vibre en même temps comme une corde de longueur moitié moindre : ces deux mouvements simultanés sont représentés sur la corde A'B'. — De même, quand on entend à la fois les sons 1 et 3, la corde se subdivise, comme A''B'', en trois parties égales, qui exécutent trois

vibrations pendant que la corde tout entière en fait une seule (\*).

Dans ces divers cas, l'impression dominante est celle du son fondamental; mais l'oreille attribue, à chacun de ces sons de même hauteur, un caractère spécial, une sorte de *timbre* particulier, résultant de la superposition de tel ou tel harmonique avec le son fondamental.

C'est l'extension de ces remarques qui a conduit M. Helmholtz à considérer les caractères de timbre, qui distinguent entre eux les sons de divers instruments, comme dus à des causes de cette nature. — La méthode qu'il a employée pour manifester, dans un son complexe, l'existence des harmoniques, est fondée sur le phénomène du *renforcement des sons*.

**717. Renforcement des sons.** — Voici une expérience qu'il est facile de répéter. On se place auprès d'un piano, on éloigne les étouffoirs en appuyant sur la pédale, et on fait entendre, avec un violon ou avec la voix, une note déterminée : on constate que, parmi les cordes du piano, celles qui peuvent rendre, soit cette note, soit l'un de ses harmoniques, entrent en vibration; le son acquiert ainsi pour l'oreille une *renforcement* remarquable. — Or, dans cette expérience, la transmission du mouvement s'est effectuée par l'air, mais elle n'a pas mis en vibration toutes les cordes du piano. Donc, pour qu'un son se transmette à des corps voisins et leur fasse jouer le rôle de renforçants, il faut qu'il y ait, entre ce son et ceux que ces corps peuvent rendre, certains rapports déterminés, les rapports d'un son à ses harmoniques.

Quand un corps sonore est en contact avec les parois d'une cavité contenant de l'air, cet air peut entrer en vibration et résonner comme un tuyau sonore, à la condition que les dimensions de la cavité soient convenables. — C'est le principe des *caisses sonores*, qui entrent dans la construction des instruments à cordes. — C'est ce qui conduit aussi à placer les diapasons sur des caisses rectangulaires de bois (fig. 552),

(\*) Les mouvements vibratoires sont toujours de sens contraire dans deux segments consécutifs de la corde; on le démontrerait en répétant, sur une corde entièrement libre entre ses extrémités, l'expérience de Duhamel (Note de la page 616). — Par là s'explique l'observation suivante, faite par Delezenne : Quand on attaque une corde exactement en son milieu, on n'obtient aucun son; c'est que l'archet imprime aux points situés de part et d'autre du milieu, et très près de ce point, des vitesses de même sens : ces vitesses ne peuvent se concilier avec la production de l'harmonique 2, et dès lors le son fondamental ne peut pas se produire. — Marloye a généralisé la remarque de Delezenne, en montrant qu'on ne peut pas non plus faire vibrer transversalement une corde en l'attaquant exactement au tiers, au quart, au cinquième de sa longueur. — On conçoit, d'après ces remarques, que le rang des harmoniques qui se produisent en même temps que le son fondamental dépend de la position particulière du point où la corde est attaquée. C'est pour cette raison que dans le piano les marteaux sont disposés de manière à frapper chacune des cordes exactement au septième de sa longueur. L'harmonique qui correspondrait à la division de la corde en sept parties égales produirait, avec le son fondamental, une *dissonance* : grâce à cette disposition, cet harmonique ne peut se produire.

dont les dimensions dépendent du son rendu par le diapason lui-

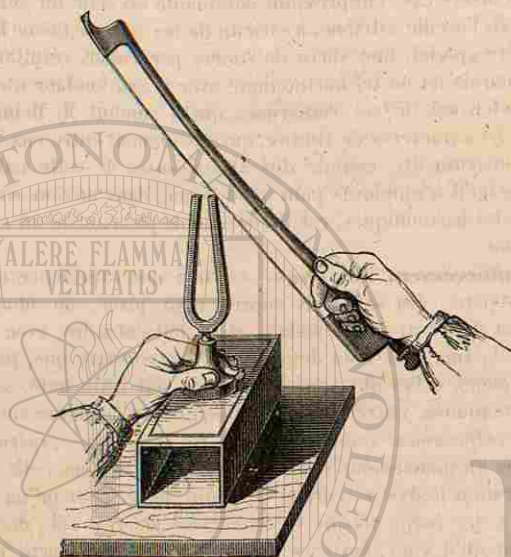


Fig. 552. — Diapason avec caisse sonore.

même. Le diapason étant mis en vibration, on constate, en le plaçant



Fig. 553. — Timbre avec tuyau renforçant

sur la caisse, que le son acquiert une intensité beaucoup plus grande. Au moment où les vibrations du diapason commencent à s'éteindre, la

caisse peut encore rendre le son perceptible, alors qu'il serait impossible de l'entendre sans ce renforcement.

Voici encore une expérience destinée à montrer que les colonnes d'air doivent offrir des dimensions déterminées, pour renforcer tel ou tel son. — On fait vibrer un timbre de bronze T (fig. 553) au moyen d'un archet. On en approche l'ouverture d'un tuyau A, fermé à son autre extrémité par un piston que l'on fait mouvoir avec la main, de manière à donner des longueurs variables à la partie du tuyau qui regarde le timbre. On constate que, pour certaines positions du piston, le son rendu par le timbre est considérablement renforcé; pour d'autres positions du piston, le renforcement est à peu près nul (\*).

**718. Emploi des résonateurs pour l'analyse des sons composés.** — Voici maintenant la méthode qui a été employée par M. Helmholtz pour analyser les sons composés.

On prend une série de tuyaux, dits *résonateurs*, de dimensions diverses. L'expérience a montré que la forme la plus favorable, pour le but qu'on se propose, est celle de cavités *sphériques* S (fig. 554), présentant une ouverture AB, et, à l'opposé de cette ouverture, un conduit MN que l'on introduit dans l'oreille. Dans cette forme de tuyaux sonores, le son *fondamental* est le seul qui prenne nettement naissance : c'est ce que nous appellerons le *son propre* du résonateur.

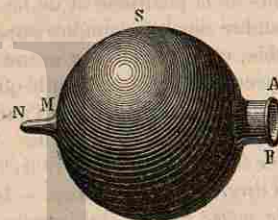


Fig. 554. — Résonateur.

Pour faire l'analyse d'un son produit à l'extérieur, l'observateur bouche l'une de ses oreilles; dans son autre oreille, il introduit, l'un après l'autre, les conduits de divers résonateurs, de dimensions telles que leurs sons propres correspondent aux diverses notes de l'échelle musicale. A chaque expérience, les sons qui diffèrent du son propre du résonateur ne sont perçus par l'oreille que d'une manière confuse. Au contraire, si le son composé, qui est soumis à l'analyse, contient un son simple ayant même hauteur que le son propre du résonateur, l'oreille entend éclater ce son, avec une intensité presque assourdissante. — C'est ainsi que l'on a pu constater

(\*) Dans les tuyaux à bouche, l'air du tuyau ne fait que renforcer le son produit par les vibrations de la lèvres *b* (fig. 528). Si, en effet, on enlève les parois du tuyau, de façon à ne laisser que l'embouchure et la lèvres *b*, on peut, en soufflant avec plus ou moins de force, obtenir une série de sons, d'intensité très faible. Parmi ces sons, quelques-uns seulement sont renforcés par l'air du tuyau; leurs nombres de vibrations satisfont à l'une ou à l'autre des formules  $n = (2p + 1) \frac{v}{4L}$ ,  $n' = p \frac{v}{2L}$  (note de la page 608), selon que le tuyau est fermé ou ouvert. Les autres sons produits par le mouvement vibratoire de la lèvres ne sont pas renforcés par le tuyau. — La même remarque est applicable aux tuyaux à anche.

l'existence de telle ou telle note, dans les sons complexes qui sembleraient d'abord les plus difficiles à analyser, comme le bruit d'une voiture, le sifflement du vent, le murmure de l'eau, etc.

719. **Résultats relatifs aux timbres des divers instruments ou de la voix humaine.** — La méthode des résonateurs a été appliquée à l'analyse comparative des sons produits par les divers instruments, ou par la voix humaine. — Voici quelques-uns des résultats obtenus.

1<sup>o</sup> Lorsque des instruments de diverses espèces donnent une même note musicale, ils donnent un même son fondamental; mais chacun d'eux superpose à ce son tel ou tel *groupe d'harmoniques*, avec telle ou telle *intensité relative*: c'est là ce qui produit, entre les divers instruments, les *différences de timbres*. — Ainsi, le son d'un diapason, ou ceux que rendent les gros tuyaux fermés de l'orgue, sous l'action d'un courant d'air faible, sont des sons simples, ou presque dénués d'harmoniques: le timbre de ces sons est sourd et sans éclat. — La présence des six premiers harmoniques, que l'on constate dans les notes graves du piano ou dans celles des tuyaux ouverts de l'orgue, donne aux sons de la plénitude et de l'éclat. — Dans le violon ou le violoncelle, le nombre des harmoniques superposés est généralement assez considérable, et d'autant plus grand que la corde est plus fine. De là, cette espèce de caractère d'acuité que présente le timbre de ces instruments, et qui arrive à en rendre l'audition désagréable lorsqu'ils sont maniés par des exécutants inhabiles (\*).

Ce sont encore des différences du même genre qui distinguent entre elles les *diverses voix* humaines. — Diverses voix, émettant *une même note sur une même voyelle*, lui impriment chacune un timbre particulier, que l'oreille reconnaît immédiatement, et qui dépend de la coexistence de tel ou tel groupe d'harmoniques, se superposant au son fondamental.

2<sup>o</sup> Quant aux différences qui distinguent, pour une même voix, les *diverses voyelles*, elles sont dues à une autre particularité. — D'après M. Helmholtz, chaque voyelle correspond à *un son de hauteur constante*, déterminé par la forme que prend la bouche en laissant passer l'air qui la traverse. — On peut donc dire que les voyelles se distinguent les unes des autres par un caractère qui offre quelque analogie avec celui du *timbre*. Mais ce caractère, au lieu d'être dû à l'addition de certains harmoniques du son fondamental, c'est-à-dire à un groupe de sons dont la hauteur dépendrait du son fondamental lui-même, est dû à un son qui dépend de la voyelle émise (\*\*).

(\*) Avec des cordes *métalliques* très fines, l'emploi des résonateurs a permis de compter jusqu'à seize harmoniques superposés. C'est à la présence des harmoniques élevés qu'est dû le timbre siffant des sons que rendent ces cordes.

(\*\*) Dans la voix articulée, les *consonnes*, qui viennent s'ajouter aux voyelles, transforment en sons plus complexes les sons additionnels qui caractérisent chacune des voyelles, sans modifier la hauteur de l'impression dominante.

La pratique du chant a d'ailleurs montré depuis longtemps que l'émission des notes de diverses hauteurs ne se produit pas avec la même facilité sur les diverses voyelles: que, par exemple, les notes graves sont plus faciles à donner sur la voyelle O ou sur le son OU; les notes moyennes, sur la voyelle A; les notes élevées, sur la voyelle É ou Ê. — Ces résultats sont aujourd'hui faciles à expliquer. La cavité de la bouche se comporte, en effet, comme une caisse de résonance, renforçant plus ou moins les sons produits par le larynx, suivant les rapports qu'ils présentent avec le *son propre* de cette cavité. Or, suivant que la bouche prend la forme appropriée à l'émission de la voyelle allemande OU, ou à celle de nos voyelles O, A, E, I, on a pu constater que le son propre de sa cavité va successivement en s'élevant: par suite, la forme de la bouche devient apte à renforcer des sons de plus en plus élevés.

3<sup>o</sup> Enfin, l'emploi des résonateurs a montré que les *bruits* se distinguent des sons musicaux, en ce qu'ils sont formés par la superposition de sons élémentaires qui ne sont point entre eux dans des rapports simples. — L'oreille n'éprouve alors qu'une sensation vague, à laquelle elle peut difficilement attribuer un caractère de hauteur, quand elle compare ces bruits à des sons musicaux. Les rapports de hauteurs ne deviennent appréciables que lorsqu'on compare entre eux plusieurs bruits analogues (664).

720. **Méthode de synthèse des sons composés.** — Les résultats qu'avait fournis l'analyse par les résonateurs ont été confirmés par M. Helmholtz à l'aide d'une véritable méthode de synthèse, consistant à recomposer des sons complexes au moyen des divers sons élémentaires qu'on y a reconnus.

L'appareil comprend une série de diapasons donnant les harmoniques successifs du son rendu par le plus grave d'entre eux, et disposés de façon que l'on puisse entretenir le mouvement vibratoire de chacun d'eux, à l'aide d'électro-aimants qui agissent périodiquement par attraction sur leurs branches. En présence de chaque diapason est placé un tuyau renforçant, que l'on peut ouvrir plus ou moins au moyen des touches d'un clavier sur lesquelles on appuie plus ou moins fortement. En faisant vibrer tous les diapasons à la fois et en ouvrant de quantités variables tels ou tels tuyaux renforçants, l'expérimentateur peut ainsi ajouter au son fondamental tels ou tels harmoniques, avec telle ou telle intensité.

L'expérience ainsi faite montre que l'on peut par ce procédé modifier le timbre du son fondamental perçu par l'oreille. « L'appareil permet, dit M. Helmholtz, de reproduire à volonté soit les *voyelles* de la voix humaine, soit les différents registres de l'orgue, pourvu qu'ils ne présentent pas d'harmoniques trop aigus: il manque cependant aux sons de l'orgue ainsi imités le bruit siffant que donne le courant d'air en se brisant contre les lèvres du tuyau. On peut encore reproduire le nasillement de la *clarinette* au moyen d'une série d'harmoniques impairs, et le son doux du *cor* au moyen du chœur complet des diapasons. »

721. **Phonographe.** — Nous dirons maintenant quelques mots d'un instrument qui a été imaginé en Amérique, par M. Edison, et qui permet de reproduire, au bout d'un temps quelconque, les sons musicaux ou les paroles qu'on a prononcées dans son voisinage.

Le *phonographe* (fig. 555) se compose d'un cylindre métallique C, mobile autour d'un axe AA'. L'une des parties A' de cet axe présente un pas de vis, qui passe dans un écrou creusé dans le support S' : lorsqu'on tourne la manivelle M, le cylindre éprouve un déplacement progressif dans le sens de son axe, en même temps qu'il tourne autour de cet axe lui-même. Sur la surface du cylindre est creusée une rainure en forme d'hélice, dont le pas est le même que celui de la vis taillée

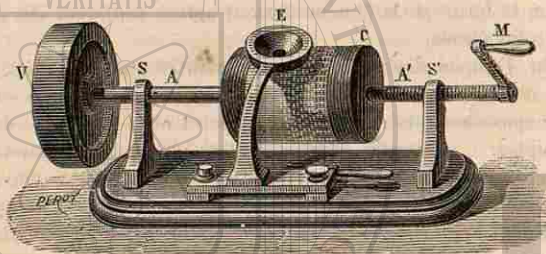


Fig. 555. — Phonographe de M. Edison.

sur l'axe : le cylindre est enveloppé par une feuille de papier d'étain, qui s'applique sur les bords saillants de la rainure, sans pénétrer dans les parties creuses. — A côté du cylindre est disposée, sur un support, une embouchure E, au fond de laquelle est une membrane métallique très mince m (fig. 556). Sous la membrane, est un petit style métallique

très court, fixé à l'extrémité d'un ressort a : la membrane presse légèrement sur ce ressort, par l'intermédiaire de deux petites pièces de caoutchouc.



Fig. 556.

Avant de commencer l'expérience, on place le support de la membrane de manière que la pointe du style corresponde à l'un des points où la feuille d'étain passe au-dessus de la cavité de la rainure. — Puis on fait tourner le cylindre, d'un mouvement aussi uniforme que possible, et l'on émet, à haute voix, les paroles ou le chant que l'on veut faire reproduire par l'appareil. Chacune des impulsions communiquées par l'air à la membrane refoule le style, qui imprime à la feuille d'étain une sorte de gaufrage, plus ou moins profond, selon l'amplitude de

l'impulsion elle-même. Il en résulte, sur cette feuille, un sillon hélicoïdal discontinu, formé par de petites dépressions dont les distances relatives dépendent de la hauteur du son, et dont la profondeur dépend de l'intensité du son. — Pour faire répéter à l'appareil la phrase ou le chant qui lui a été confié, on écarte d'abord le support qui porte la membrane et le style, et l'on ramène le cylindre en arrière, jusqu'à sa position primitive; enfin, on rapproche le support, de manière que toutes les pièces se retrouvent dans leur position initiale. Le cylindre étant alors remis en mouvement avec la même vitesse que précédemment, le style, commandé maintenant par les dépressions ou les saillies de la feuille d'étain, communique successivement à la membrane toutes les impulsions qu'il en avait reçues, avec toutes les particularités de rythme et d'intensité relative. — Le son produit peut être entendu dans toute une salle, par plusieurs centaines de personnes à la fois, surtout si l'on a soin de munir la membrane d'un cornet, rassemblant les sons comme une espèce de porte-voix (\*).

Indépendamment de ce que cette reproduction des sons offre de saisissant, il est permis de se demander si l'étude des sinuosités tracées sur la feuille métallique ne pourrait pas servir à compléter les résultats que possède déjà la science, sur les particularités qui distinguent les sons des divers instruments ou de la voix humaine.

(\*) L'intensité absolue des sons rendus par l'appareil est beaucoup moindre que celle des sons qui ont servi à l'impressionner. C'est ce qu'on s'explique sans peine, si l'on tient compte de la faiblesse des amplitudes des vibrations de la membrane.

Quant à la conservation du rapport des hauteurs des sons, elle exige expressément que la vitesse de rotation du cylindre reste absolument constante. C'est pour assurer, autant que possible, ce résultat, qu'on place sur l'axe un lourd volant V. On a construit, d'ailleurs, des appareils à mouvement d'horlogerie, assurant mieux encore l'uniformité du mouvement. — Pour la reproduction de phrases parlées, les inégalités de vitesse ont seulement pour conséquence de faire monter ou baisser légèrement la voix. Pour la reproduction des sons musicaux, on conçoit que l'inconvénient est beaucoup plus grave, les variations de hauteur des sons successifs arrivant à produire des dissonances extrêmement désagréables.

## CHAPITRE VI

### MÉCANISME DE L'AUDITION

722. **Description de l'oreille.** — L'oreille peut être partagée, chez l'homme, en *oreille externe*, *oreille moyenne* et *oreille interne*.

L'*oreille externe* est une sorte d'entonnoir, destiné à recueillir les ondes sonores, à peu près comme un cornet acoustique. — Ses diverses parties sont faciles à distinguer : le *pavillon de l'oreille* (fig. 557, 1) est une lame fibro-cartilagineuse, de forme irrégulière, qui se continue avec une large excavation ou *conque* (*ibid.*, de 2 à 4), et avec le *conduit auditif externe* (3, 5) qui s'enfonce dans la portion temporale du crâne. — L'oreille externe est séparée de l'oreille moyenne par une cloison membraneuse, qu'on appelle la *membrane du tympan* (*ibid.*, 6).

L'*oreille moyenne* est une cavité pleine d'air, dont la partie la plus importante est la *caisse du tympan* (11), creusée dans la portion dure et profonde de l'os temporal, qu'on appelle le *rocher*; la caisse communique d'ailleurs avec plusieurs cellules, pratiquées dans l'épaisseur de l'os. De la partie inférieure de cette cavité part un conduit long et étroit, la *trompe d'Eustache* (12), dont l'autre extrémité vient s'ouvrir à la partie postérieure des fosses nasales, au-dessus du voile du palais.

— Dans la paroi osseuse de la caisse, en regard de la membrane du tympan, sont pratiquées deux ouvertures, masquées dans la figure 557, la *fenêtre ovale* et la *fenêtre ronde*; ces ouvertures correspondent aux diverses cavités de l'oreille profonde, et chacune d'elles est fermée par une membrane. — Enfin, la caisse est traversée par une chaîne continue de quatre osselets, qui sont représentés à part dans la figure 558, le *marteau m*, l'*enclume e*, l'*os lenticulaire l* et l'*étrier g*; le premier os de cette chaîne, le marteau, adhère à la membrane du tympan (fig. 557, 8); le dernier, l'étrier, s'applique par sa base sur la membrane de la fenêtre ovale. Ces quatre os sont unis par des ligaments qui leur permettent de se mouvoir les uns sur les autres; de petits muscles peuvent tendre plus ou moins l'espèce de ressort formé par la série des osselets, et par suite aussi les membranes qu'elle réunit.

L'*oreille interne* est formée de plusieurs cavités, de formes assez compliquées, qui sont remplies de liquides : on les désigne sous les noms de *vestibule*, de *canaux semi-circulaires*, et de *limaçon*. — Le *vestibule* est une cavité de forme ovoïde, séparée seulement de la caisse

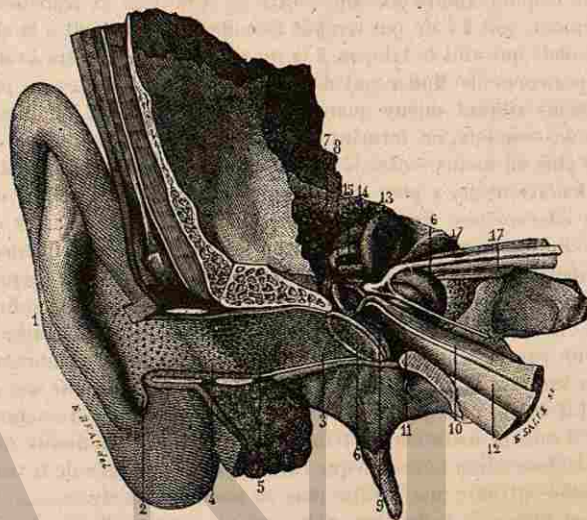


Fig. 557. — Coupe de l'oreille.

du tympan par la membrane de la fenêtre ovale : c'est une sorte de carrefour, servant d'entrée dans les deux autres parties de l'oreille interne, les canaux semi-circulaires au-dessus (fig. 557, 13, 14, 15) et le limaçon au-dessous (16). — Les *canaux semi-circulaires*, dont le nom même indique la forme, sont au nombre de trois, et situés à peu près, comme le montre la figure, dans trois plans perpendiculaires entre eux. Leurs extrémités, renflées en ampoules, communiquent avec l'intérieur du vestibule. — Le *limaçon* est une sorte de cône creux, enroulé en spirale, et subdivisé encore en deux cavités secondaires par une cloison longitudinale : sa base communique, comme les canaux semi-circulaires, avec l'intérieur du vestibule, et c'est en un point de sa paroi qu'est pratiquée la fenêtre ronde, dont la membrane forme un cloison entre la cavité du limaçon et celle de l'oreille moyenne. — Toutes ces cavités sont tapissées par des membranes molles, flottantes dans le liquide qui remplit cette partie de l'organe. C'est sur ces membranes



Fig. 558.  
Osselets de l'oreille.

que viennent s'épanouir, en subdivisions d'une finesse extrême, les nerfs auditifs qui pénètrent dans le rocher (17).

723. **Fonctions des diverses parties de l'oreille.** — La membrane du tympan, recevant les ondes sonores qui se sont propagées dans le conduit auditif externe, entre en vibration et transmet son mouvement, soit à l'air qui remplit l'oreille moyenne, soit à la chaîne des osselets qui unit le tympan à la membrane de la fenêtre ovale. — Les expériences de Müller ont montré que les membranes de petites dimensions vibrent mieux quand elles sont faiblement tendues : la chaîne des osselets, en formant un ressort qui peut se tendre ou se fléchir plus ou moins, entre la membrane du tympan et la membrane de la fenêtre ovale, a pour effet de graduer la tension de ces membranes elles-mêmes. En exerçant sur elles une pression assez énergique, elle les empêche de vibrer trop fortement sous l'influence des sons intenses ; en exerçant une pression modérée, elle leur permet de vibrer sous l'influence des sons faibles. — Il faut remarquer enfin que l'air contenu dans l'oreille moyenne est en communication avec l'air extérieur par la trompe d'Eustache, en sorte que la membrane du tympan éprouve la même pression, de la part de l'air, sur ses deux faces. En outre, l'air qui arrive dans la caisse est toujours saturé de vapeur d'eau, et maintient le tympan dans un état d'humidité convenable. L'observation a montré que l'obstruction prolongée de la trompe d'Eustache entraîne une surdité plus ou moins complète.

La membrane de la fenêtre ovale, qui sépare l'oreille moyenne du vestibule, reçoit les vibrations qui lui sont transmises par la chaîne des osselets ; la membrane de la fenêtre ronde, qui est placée dans la paroi du limaçon, au voisinage du vestibule, est mise en vibration par l'air contenu dans la caisse du tympan : le mouvement vibratoire est ainsi communiqué au liquide qui remplit les cavités de l'oreille interne. C'est ainsi que le mouvement se transmet aux membranes molles qui flottent au sein de ce liquide, et que les ramifications des nerfs auditifs sont elles-mêmes ébranlées : elles transmettent à l'encéphale l'impression qui constitue la sensation du son.

Quant à la recherche du rôle de chacune des cavités de l'oreille interne, dans la perception des diverses *qualités* que notre oreille attribue aux sons, elle a été l'objet d'un grand nombre de travaux de la part des physiologistes et des physiciens. Nous ne pouvons donner ici le détail des résultats obtenus ; ils rentrent d'ailleurs plutôt dans le domaine de la Physiologie que dans celui de la Physique.

## LIVRE CINQUIÈME

### OPTIQUE

#### CHAPITRE PREMIER

##### PROPAGATION DE LA LUMIÈRE. — PHOTOMÉTRIE.

###### I. — PROPAGATION DE LA LUMIÈRE.

724. **Sources de lumière. — Corps lumineux.** — Certains corps ont, par eux-mêmes, un éclat qui nous les rend visibles sans l'intervention d'aucune lumière étrangère. Tels sont le soleil, les étoiles, les flammes de nos lampes, le charbon incandescent, etc. — Ce sont des *sources lumineuses*.

Au contraire, la plupart des objets qui nous entourent, et que nous distinguons à la lumière du jour, cessent d'être visibles quand ils sont placés de façon qu'aucune lumière étrangère ne puisse leur arriver. — Ces corps ne sont donc pas lumineux *par eux-mêmes* : ils ne deviennent visibles qu'à la condition de recevoir d'une source la lumière qu'ils renvoient à notre œil.

Pour ce qui concerne les phénomènes que nous avons à étudier, il n'existe aucune différence entre la lumière émise directement par les sources lumineuses, et celle qui est renvoyée par les corps éclairés. Nous désignerons donc sous le nom de *corps lumineux* tous les corps qui sont visibles à notre œil, soit par eux-mêmes, soit sous l'influence d'une lumière étrangère.

725. **Corps transparents et corps opaques.** — On appelle *corps transparents* les corps que la lumière peut traverser. — L'air, le verre sont des corps transparents : ils laissent arriver jusqu'à nous la lumière du soleil ou celle des corps lumineux en général.



que viennent s'épanouir, en subdivisions d'une finesse extrême, les nerfs auditifs qui pénètrent dans le rocher (17).

723. **Fonctions des diverses parties de l'oreille.** — La membrane du tympan, recevant les ondes sonores qui se sont propagées dans le conduit auditif externe, entre en vibration et transmet son mouvement, soit à l'air qui remplit l'oreille moyenne, soit à la chaîne des osselets qui unit le tympan à la membrane de la fenêtre ovale. — Les expériences de Müller ont montré que les membranes de petites dimensions vibrent mieux quand elles sont faiblement tendues : la chaîne des osselets, en formant un ressort qui peut se tendre ou se fléchir plus ou moins, entre la membrane du tympan et la membrane de la fenêtre ovale, a pour effet de graduer la tension de ces membranes elles-mêmes. En exerçant sur elles une pression assez énergique, elle les empêche de vibrer trop fortement sous l'influence des sons intenses ; en exerçant une pression modérée, elle leur permet de vibrer sous l'influence des sons faibles. — Il faut remarquer enfin que l'air contenu dans l'oreille moyenne est en communication avec l'air extérieur par la trompe d'Eustache, en sorte que la membrane du tympan éprouve la même pression, de la part de l'air, sur ses deux faces. En outre, l'air qui arrive dans la caisse est toujours saturé de vapeur d'eau, et maintient le tympan dans un état d'humidité convenable. L'observation a montré que l'obstruction prolongée de la trompe d'Eustache entraîne une surdité plus ou moins complète.

La membrane de la fenêtre ovale, qui sépare l'oreille moyenne du vestibule, reçoit les vibrations qui lui sont transmises par la chaîne des osselets ; la membrane de la fenêtre ronde, qui est placée dans la paroi du limaçon, au voisinage du vestibule, est mise en vibration par l'air contenu dans la caisse du tympan : le mouvement vibratoire est ainsi communiqué au liquide qui remplit les cavités de l'oreille interne. C'est ainsi que le mouvement se transmet aux membranes molles qui flottent au sein de ce liquide, et que les ramifications des nerfs auditifs sont elles-mêmes ébranlées : elles transmettent à l'encéphale l'impression qui constitue la sensation du son.

Quant à la recherche du rôle de chacune des cavités de l'oreille interne, dans la perception des diverses *qualités* que notre oreille attribue aux sons, elle a été l'objet d'un grand nombre de travaux de la part des physiologistes et des physiciens. Nous ne pouvons donner ici le détail des résultats obtenus ; ils rentrent d'ailleurs plutôt dans le domaine de la Physiologie que dans celui de la Physique.

## LIVRE CINQUIÈME

### OPTIQUE

#### CHAPITRE PREMIER

##### PROPAGATION DE LA LUMIÈRE. — PHOTOMÉTRIE.

###### I. — PROPAGATION DE LA LUMIÈRE.

724. **Sources de lumière. — Corps lumineux.** — Certains corps ont, par eux-mêmes, un éclat qui nous les rend visibles sans l'intervention d'aucune lumière étrangère. Tels sont le soleil, les étoiles, les flammes de nos lampes, le charbon incandescent, etc. — Ce sont des *sources lumineuses*.

Au contraire, la plupart des objets qui nous entourent, et que nous distinguons à la lumière du jour, cessent d'être visibles quand ils sont placés de façon qu'aucune lumière étrangère ne puisse leur arriver. — Ces corps ne sont donc pas lumineux *par eux-mêmes* : ils ne deviennent visibles qu'à la condition de recevoir d'une source la lumière qu'ils renvoient à notre œil.

Pour ce qui concerne les phénomènes que nous avons à étudier, il n'existe aucune différence entre la lumière émise directement par les sources lumineuses, et celle qui est renvoyée par les corps éclairés. Nous désignerons donc sous le nom de *corps lumineux* tous les corps qui sont visibles à notre œil, soit par eux-mêmes, soit sous l'influence d'une lumière étrangère.

725. **Corps transparents et corps opaques.** — On appelle *corps transparents* les corps que la lumière peut traverser. — L'air, le verre sont des corps transparents : ils laissent arriver jusqu'à nous la lumière du soleil ou celle des corps lumineux en général.

On appelle *corps opaques*, ceux que la lumière ne peut pas traverser : tels sont le bois, la pierre, les métaux sous une épaisseur suffisante, etc.

726. **Hypothèse de l'émission et hypothèse des ondulations.** — Pour expliquer l'action que les corps lumineux exercent sur notre œil, deux hypothèses différentes ont été faites.

L'*hypothèse de l'émission*, due à Newton, suppose que les corps lumineux envoient, dans toutes les directions, des particules d'une substance ténue, impondérable, capable de traverser les corps transparents. Dans cette hypothèse, ce seraient les chocs de ces particules sur la membrane nerveuse qui tapisse le fond de l'œil qui produiraient la sensation de la lumière.

L'*hypothèse des ondulations*, qui est due à Descartes, et qui a été précisée et développée par Huyghens, par Thomas Young, et surtout par Fresnel, assimile la propagation de la lumière à celle du son. Dans cette hypothèse, un corps lumineux, de même qu'un corps sonore, est le siège d'un mouvement vibratoire rapide, qui se transmet jusqu'à notre œil par l'intermédiaire d'un milieu élastique. Ce milieu ne peut être l'air atmosphérique, car nous apercevons les astres à travers les espaces vides de l'univers ; on admet que c'est un fluide impondérable, répandu aussi bien dans le vide que dans l'air et dans les corps pondérables : ce fluide a reçu le nom d'*éther*.

En partant de l'hypothèse des ondulations, les physiciens modernes ont pu, non seulement expliquer les résultats fournis par l'expérience, mais encore en indiquer *a priori* un grand nombre d'autres, que l'observation a ensuite confirmés. — Certains résultats d'expérience sont, au contraire, en opposition avec la théorie de Newton. — Aussi est-ce l'hypothèse des ondulations qui est aujourd'hui exclusivement adoptée.

La partie de l'Optique que nous devons étudier peut d'ailleurs être exposée indépendamment de toute hypothèse sur la nature de la lumière. Nous ne nous étendrons donc pas davantage sur ce sujet, qui se rattache aux parties les plus délicates de la Physique.

727. **Propagation de la lumière en ligne droite. Rayons lumineux.** — Dans un milieu transparent et homogène, la lumière se transmet d'un point à un autre en suivant la *ligne droite* qui joint ces deux points.

Plaçons-nous, par exemple, à une certaine distance d'une bougie, et regardons la flamme avec un seul œil. Si nous interposons l'extrémité de notre doigt entre notre œil et la bougie, nous cessons de voir la flamme, dès que le doigt se trouve placé sur la ligne droite menée de la flamme à l'œil. Cette droite représente donc la route suivie par la lumière, pour arriver de la flamme à notre œil.

D'autre part, la bougie est visible pour tous les observateurs placés

autour d'elle. — On doit en conclure que chaque point de la flamme envoie des *rayons lumineux* dans toutes les directions : chacun de ces rayons se propage, en ligne droite, depuis son point de départ jusqu'à son point d'arrivée.

On peut remarquer encore que, si les rayons du soleil pénètrent dans une pièce obscure par une ouverture pratiquée dans un volet, ils produisent une bande rectiligne. Cette bande est ici rendue visible par les poussières qui flottent dans l'air et que les rayons lumineux éclairent dans leur trajet.

728. **Ombre.** — Un corps opaque arrête tous les rayons lumineux qui le rencontrent : il y a donc, derrière un corps opaque, un espace où ne pénètre pas la lumière, et qu'on appelle *ombre portée*. — Les limites de l'ombre portée peuvent être déterminées géométriquement comme on va le voir, en s'appuyant sur le principe de la propagation rectiligne de la lumière.

Considérons d'abord le cas purement idéal où le corps lumineux est réduit à un seul point S (fig. 559), et soit C le corps opaque, auquel nous donnerons une forme quelconque.

Menons, par le point lumineux S, une droite SA tangente au corps opaque, et supposons que cette droite se meuve de manière à occuper toutes les positions possibles, en passant toujours par S et restant tangente au corps C. Elle décrira une surface conique ASB, ayant pour sommet le point S et comprenant le corps C dans son intérieur.

Si l'on prend un point quelconque *m* à l'intérieur de cette surface et au delà de C, le rayon émis par S dans la direction Sm sera intercepté par le corps opaque. Au contraire, un point *m'*, situé en dehors de cette surface, recevra un rayon lumineux Sm'. — La surface du cône forme donc la limite entre les points qui sont dans l'ombre portée et ceux qui reçoivent la lumière de la source S.

729. **Pénombre.** — Considérons maintenant le cas où la source lumineuse a des dimensions sensibles : c'est le cas de la plupart des sources avec lesquelles nous pouvons opérer. — Pour simplifier l'explication, nous prendrons le cas tout particulier où la source lumineuse et le corps opaque ont, l'un et l'autre, la forme *sphérique*.

Soient S (fig. 560) la sphère lumineuse, o la sphère opaque. Construisons le cône ARB tangent *extérieurement* aux deux sphères : un point quelconque *m*, situé dans ce cône et derrière la sphère opaque, ne peut recevoir aucun rayon lumineux, car toute droite joignant ce point à un point quelconque de la sphère S rencontrerait la sphère o. Donc, tous les points qui sont situés dans ce cône, au delà de la sphère

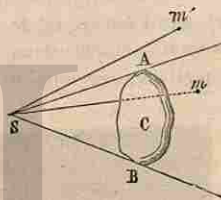


Fig. 559.

opaque, sont *complètement dans l'ombre*. — Construisons maintenant le cône  $A'TB'$  tangent *intérieurement* aux deux sphères, et considérons deux points  $m'$ ,  $m''$ , également distants de  $S$ , mais situés, l'un dans l'intervalle des deux cônes, l'autre en dehors du cône  $A'TB'$ . Si, du point  $m''$  comme sommet,

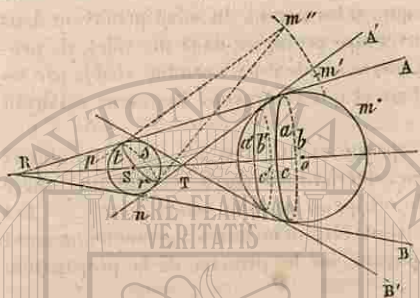


Fig. 560.

on décrit un cône  $pm'n$  qui touche la sphère  $S$  suivant une circonférence  $rst$ , on voit que le point  $m'$  reçoit de la lumière de tous les points de la surface de la sphère lumineuse qui sont en avant de cette circonférence. Si, du point  $m'$  comme sommet, on décrit un cône tangent à la sphère lumineuse, la portion de la sphère lumineuse située en avant de la circonférence de contact serait encore égale à la précédente; mais une portion des rayons lumineux compris dans ce cône est interceptée par le corps opaque et ne peut pas parvenir au point  $m'$ . La quantité de lumière interceptée

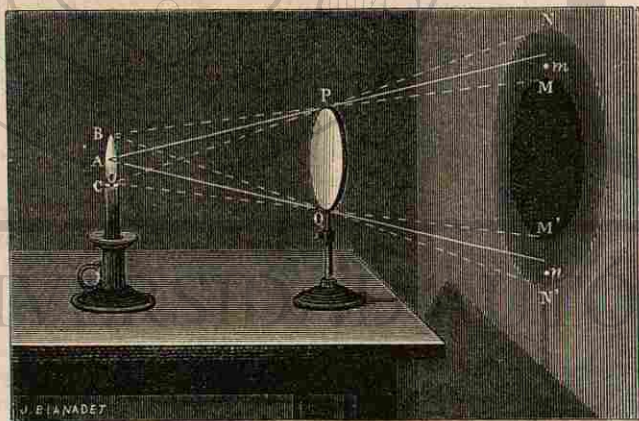


Fig. 561. — Ombre et pénombre.

est d'autant plus grande que le point  $m'$  est plus voisin de la surface du cône d'ombre  $ARB$ . — Donc, au delà de la sphère opaque, l'espace compris entre les deux cônes  $ARB$  et  $A'TB'$  est moins éclairé que l'espace extérieur, et la lumière qu'il reçoit va en *diminuant progressive-*

ment, à mesure qu'on s'approche de la région de l'ombre absolue. Cet espace est ce qu'on appelle la *pénombre* (\*).

Il est facile, par exemple, de constater la production de l'ombre et de la pénombre, en prenant comme corps lumineux la flamme d'une bougie (fig. 561) et comme corps opaque un écran circulaire  $PQ$ , placé parallèlement à l'un des murs de la pièce où l'on opère, et à une certaine distance. — On obtient, sur le mur, une *ombre absolue*  $MM'$  de même forme que l'écran; puis, tout autour de cette ombre, une *pénombre*, où l'intensité lumineuse va en augmentant d'une manière progressive, depuis la région  $MM'$  en dedans de laquelle n'arrive aucune lumière, jusqu'à la région  $NN'$  en dehors de laquelle le mur est éclairé par la flamme tout entière.

Il en est de même toutes les fois que la source lumineuse a une étendue appréciable. — Si nous observons, par exemple, les ombres produites par des objets éclairés par le soleil, nous pouvons remarquer qu'elles ne sont jamais limitées par une ligne nettement tranchée; leurs contours présentent toujours une *pénombre*, qui s'explique de la même manière.

§ 730. **Formation des images dans la chambre obscure.** — Lorsqu'on est placé dans une pièce fermée par des volets, et que l'un des volets présente une petite ouverture, on aperçoit sur un écran placé

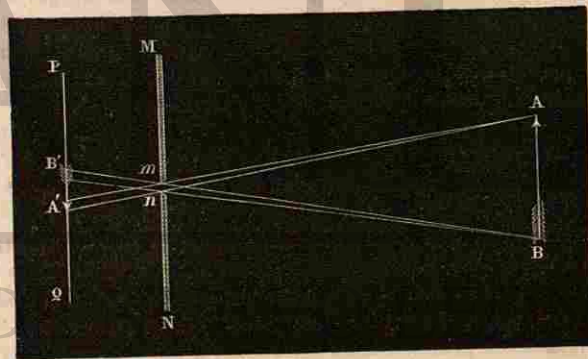


Fig. 562. — Formation des images dans la chambre obscure. (R)

à l'intérieur, à une certaine distance de l'ouverture, une image plus ou moins nette des objets lumineux placés à l'extérieur. — Ce phénomène s'explique encore par la propagation rectiligne de la lumière.

(\*) Nous laisserons au lecteur le soin de discuter le problème des ombres, dans le cas où la sphère opaque serait plus petite que la sphère lumineuse, et dans le cas où elle lui serait égale.

Soit un objet lumineux AB (fig. 562), et soit MN le volet de la chambre obscure, dans lequel est pratiquée une petite ouverture mn; soit PQ un écran disposé dans la chambre, parallèlement à l'ouverture et à une certaine distance. — Considérons l'un des points A de l'objet lumineux: ce point éclaire, à l'intérieur, tous les points de l'écran situés dans un cône dont le sommet est A, et dont les arêtes s'appuient sur le contour de l'ouverture. Ce cône détermine donc, sur l'écran, une petite surface éclairée, ayant une forme semblable à celle de l'ouverture. Il en est de même pour chacun des points de l'objet lumineux AB. — Mais, si l'ouverture est suffisamment petite, et si l'objet lumineux est suffisamment éloigné pour que les cônes dont il s'agit soient très aigus, chacune des petites surfaces éclairées pourra être assimilée à un point, et leur ensemble donnera une sorte d'image A'B' de l'objet, dans une position renversée (\*). — Si l'on éloigne progressivement l'écran PQ de l'ouverture, on voit les dimensions de l'image A'B' augmenter proportionnellement à la distance de l'ouverture à l'écran (\*\*).

C'est par un phénomène tout à fait semblable que, dans l'ombre d'un arbre, les petites ouvertures, de formes très diverses, que laissent entre elles les feuilles, produisent sur le sol des images dont la forme rappelle celle du soleil. Les rayons solaires ayant généralement une direction oblique par rapport au sol, les images formées sur le sol ne sont pas circulaires, mais elliptiques. On obtient des images circulaires sur une feuille de papier que l'on place perpendiculairement aux rayons solaires. — Enfin, pendant les éclipses partielles, quand le soleil éclipsé prend la forme d'un croissant lumineux, les images acquièrent elles-mêmes la forme de petits croissants

## II. — PHOTOMÉTRIE.

**751. Intensités des éclaircissements produits par une même source à diverses distances.** — Les quantités de lumière reçues normalement par une même surface, à différentes distances d'une même source lumineuse, sont en raison inverse des carrés des distances.

C'est ce dont on peut se rendre compte par le raisonnement suivant. — Soit S (fig. 565) la source lumineuse: décrivons, de ce point comme centre, avec un rayon SB égal à 1 mètre, une surface sphérique. Cette surface reçoit toute la lumière émise par la source; chaque centimètre

(\*) On verra plus loin que ce n'est pas là une véritable image, dans le sens qui sera défini à propos des miroirs ou des lentilles.

(\*\*) Si l'ouverture avait un diamètre un peu considérable, chaque point de l'objet éclairerait, sur l'écran, une surface de dimensions sensibles; toutes ces surfaces empiétant alors beaucoup les unes sur les autres, on n'aurait plus qu'un éclaircissement à peu près uniforme.

carré reçoit une quantité de lumière qui peut être considérée comme servant de mesure à l'éclaircissement que produit la source à cette distance. — Supprimons maintenant cette surface, et décrivons autour du point S une autre surface sphérique, avec un rayon SB' égal à 2 mètres: elle recevra encore toute la lumière émise par la source; mais, comme la surface de cette sphère est égale à 4 fois celle de la première, chaque centimètre carré recevra 4 fois moins de lumière. — De même, sur une surface sphérique ayant un rayon de 3 mètres, chaque centimètre carré recevrait 9 fois moins de lumière, et ainsi de suite.

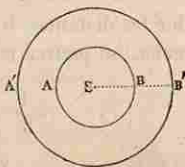


Fig. 565.

On voit que les quantités de lumière reçues, par une même surface de petite étendue, sont en raison inverse des carrés des distances à la source.

**752. Définition des intensités propres des sources lumineuses.** — Nous considérerons l'intensité propre d'une source lumineuse comme définie par l'éclaircissement que produit cette source, sur une petite surface placée à une distance égale à l'unité.

On dit que les intensités propres de deux sources sont égales, lorsqu'elles éclairent également une même surface, placée à l'unité de distance. — L'intensité propre d'une source lumineuse B est dite double, triple de celle d'une source A, quand la source B produit, sur une surface donnée, à l'unité de distance, le même éclaircissement que deux, trois sources égales à A, agissant simultanément et dans des conditions identiques.

Dans la pratique, on exprime assez ordinairement les intensités propres des sources lumineuses au moyen d'une unité qui a reçu le nom de *carcel*; c'est l'intensité propre d'une lampe carcel, brûlant à l'heure 42 grammes d'huile de colza épurée.

**753. Méthode générale de comparaison des intensités propres des sources lumineuses, ou photométrie.** — Les méthodes expérimentales que nous allons décrire, pour comparer les intensités propres de diverses sources lumineuses, reposent sur le théorème suivant:

Si deux sources lumineuses, placées, à des distances D et D' d'une même surface, produisent un même éclaircissement, les intensités propres I et I' de ces deux sources sont proportionnelles aux carrés de leurs distances à cette surface. En effet, l'intensité propre I de la première source étant définie par l'éclaircissement qu'elle produit sur une surface donnée, placée à l'unité de distance, il résulte de ce que nous avons vu (751), que la quantité de lumière reçue par cette même surface, à la distance D, sera  $\frac{I}{D^2}$ . De même, si l'on représente par I' l'intensité propre de la

seconde source, la quantité de lumière reçue de cette source par la même surface, à la distance  $D'$ , sera  $\frac{I'}{D'^2}$ . Dès lors, si l'on arrive à régler les distances  $D$  et  $D'$  de façon que ces deux éclairagements soient égaux, on pourra poser :

$$\frac{I}{D^2} = \frac{I'}{D'^2}, \text{ d'où l'on tirera : } \frac{I}{I'} = \frac{D^2}{D'^2};$$

c'est-à-dire que les intensités propres des deux sources sont proportionnelles aux carrés des distances auxquelles il faudra placer un écran, pour qu'il soit également éclairé par ces deux sources.

754. **Photomètre de Foucault.** — Le photomètre de Foucault, qui n'est qu'un perfectionnement d'un appareil imaginé par Bouguer, présente la disposition suivante.

Les deux sources lumineuses  $A$ ,  $B$  (fig. 564) sont placées d'un même côté d'une lame de porcelaine translucide  $PQ$ , mais de part et d'autre

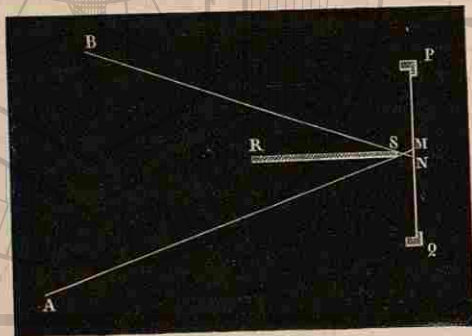


Fig. 564. — Photomètre de Foucault.

d'un écran opaque  $RS$ , perpendiculaire à  $PQ$ . On règle la position de cet écran de manière que la partie  $PN$ , qui est éclairée par la source  $B$ , empiète à peine sur la partie  $QM$  qui est éclairée par la source  $A$ . Laisant alors immobile l'une des deux sources, on approche ou l'on éloigne l'autre, jusqu'à ce que les éclairagements des deux moitiés de la plaque  $PQ$  paraissent rigoureusement égaux : on obtient le rapport des intensités propres des deux sources, en prenant le rapport des carrés de leurs distances à la plaque (755).

755. **Photomètre de Rumford.** — Dans le photomètre de Rumford, les deux sources  $L$  et  $B$  (fig. 565) sont placées devant un même écran blanc : entre elles et l'écran, on dispose une tige de bois verticale  $A$ . On obtient ainsi deux ombres : la première  $f$ , portée par la

source  $B$ , ne reçoit de lumière que de la source  $L$ ; la seconde  $f'$ , portée par la source  $L$ , ne reçoit de lumière que de  $B$ . Si donc on fait varier la distance de l'une des deux sources à l'écran, jusqu'à ce que les

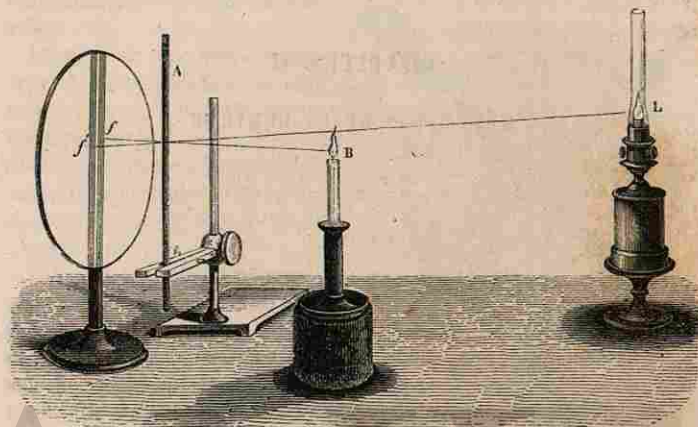


Fig. 565. — Photomètre de Rumford.

deux ombres paraissent identiques, et si l'on mesure alors les distances de chaque source à l'ombre qu'elle éclaire, les intensités de ces sources seront entre elles comme les carrés de ces distances (\*).

(\*) Pour comparer facilement les deux ombres qui se produisent sur l'écran, il est bon de faire en sorte qu'elles viennent se former près l'une de l'autre, comme l'indique la figure, ou même qu'elles empiètent un peu l'une sur l'autre.

(Voir à la fin du chapitre V la détermination de la vitesse de la lumière, qui exige la connaissance des principes des instruments d'optique).

## CHAPITRE II

### RÉFLEXION DE LA LUMIÈRE

#### I. — RÉFLEXION PAR LES SURFACES PLANES.

756. **Réflexion régulière.** — Lorsqu'un rayon lumineux tombe sur la surface d'un corps solide opaque, parfaitement poli, ou sur la surface d'un liquide opaque comme le mercure, il n'y a de lumière renvoyée que dans une direction unique. C'est le phénomène de la *réflexion régulière*.

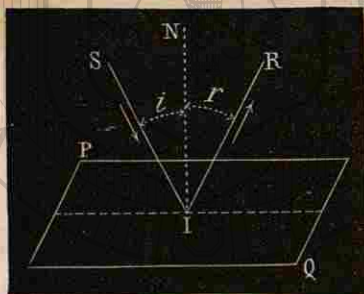


Fig. 566.

On appelle *plan d'incidence*, le plan déterminé par le rayon incident SI (fig. 566) et la normale IN menée à la surface réfléchissante PQ par le point d'incidence; *angle d'incidence*, l'angle SIN formé par le rayon incident et la normale; *angle de réflexion*, l'angle RIN formé par le rayon réfléchi et la normale. — Les lois de la réflexion sont les suivantes :

1° *Le rayon réfléchi reste dans le plan d'incidence.*

2° *L'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence.*

757. **Vérifications expérimentales. — Appareil de Silbermann.** — On obtient une vérification de ces lois, au moyen de l'appareil de Silbermann (fig. 567). Un limbe divisé MN présente deux alidades, R, S, mobiles autour de son centre : chacune d'elles porte un diaphragme  $i, i'$ , percé en son milieu d'une petite ouverture; un miroir plan métallique A est fixé au centre du limbe, perpendiculairement au diamètre vertical BB' du cercle. On dirige un faisceau de rayons solaires  $ab$ , au moyen du miroir auxiliaire  $m$ , de manière que la lumière passe par l'ouverture du diaphragme  $i$  et vienne rencontrer

### RÉFLEXION DE LA LUMIÈRE.

645

le miroir A au centre  $c$  du limbe. On constate alors que, pour recevoir la lumière réfléchiée dans l'ouverture du diaphragme  $i'$ , il faut placer l'alidade R dans une position *symétrique de S* par rapport à BB'.

La normale au point d'incidence A étant parallèle au diamètre BB', on voit : 1° que le faisceau incident et le faisceau réfléchi déterminent un plan qui contient la normale; 2° que l'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence.

758. **Vérification par les observations astronomiques faites au moyen du bain de mercure.** — La vérification suivante est beaucoup plus précise.

— On dispose une lunette IL (fig. 568), mobile sur un cercle divisé vertical, de manière à viser une étoile déterminée. En avant de cette lunette, on place un bain de mercure, dont la surface MN constitue un miroir horizontal, et l'on vise avec la lunette l'image de

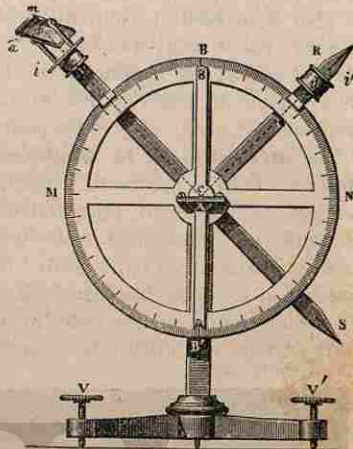


Fig. 567. — Appareil de Silbermann.

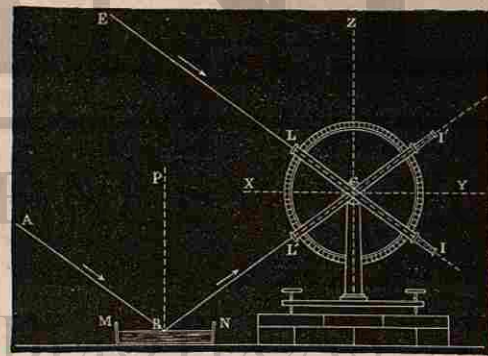


Fig. 568.

la même étoile, formée par réflexion sur le mercure : on constate qu'il faut amener la lunette dans une position  $IL'$ , *symétrique de IL* par rapport au diamètre horizontal XY. — Or : 1° en raison de la grande distance de l'étoile, tous les rayons qu'elle nous envoie doi-

vent être considérés comme parallèles à une même direction EL; par suite, le rayon incident AB est parallèle à EL; donc ce rayon et le rayon réfléchi déterminent un plan parallèle à celui du cercle divisé; ce plan étant vertical, contient la normale BP menée à la surface du mercure par le point d'incidence; 2° l'angle d'incidence ABP et l'angle LCZ sont égaux comme ayant leurs côtés parallèles et de même sens; l'angle de réflexion PBC et l'angle ZC' sont égaux comme correspondants; mais, d'après l'expérience,  $LCZ = ZC'$ ; donc  $ABP = PBC$ .

**739. Réflexion de la lumière, dans la théorie des ondulations.** — Dans la théorie de l'émission, les lois de la réflexion de la lumière s'expliquaient immédiatement. Les particules lumineuses, tant que leur mouvement s'effectuait dans un milieu homogène, devaient se mouvoir en ligne droite: c'est cette trajectoire rectiligne qui constituait le *rayon lumineux*. Lorsque l'une de ces particules venait à rencontrer une surface réfléchissante, elle devait être renvoyée par cette surface, suivant les lois générales du choc des corps élastiques, c'est-à-dire que sa nouvelle trajectoire, ou le rayon réfléchi, devait rester dans le plan d'incidence, et faire avec la normale un angle de réflexion égal à l'angle d'incidence.

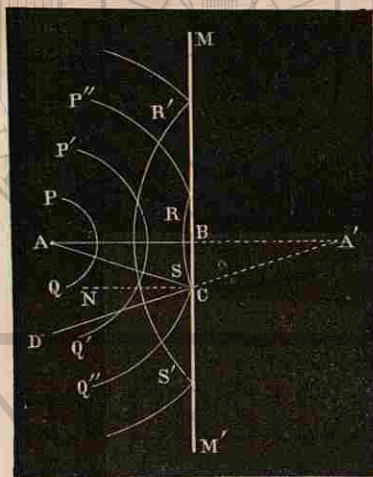


Fig. 569. — Réflexion de la lumière, dans la théorie des ondulations.

réfléchissant  $MM'$ , nous avons admis, en étudiant la réflexion des ondes sonores (679), que les *ondes réfléchies* sont limitées par des surfaces sphériques  $RS, RS', \dots$ , ayant pour centre le point  $A'$ , symétrique du point  $A$  par rapport au plan  $MM'$ . — Considérons, sur le plan  $MM'$ , le point  $C$  qui appartient à la fois à la surface d'onde incidente  $P''Q''$  et à la surface d'onde réfléchie  $RS$ . Au point  $C$ , le rayon lumineux incident est dirigé suivant la normale à la surface sphérique  $P''Q''$ , c'est-à-dire

Dans la théorie des ondulations, le *rayon lumineux* est la droite menée normalement à la surface de l'onde. Tant que la lumière émanée d'un point  $A$  (fig. 569) se propage dans un milieu homogène, les ondes sont limitées par des surfaces sphériques  $PQ, P'Q', P''Q''$ , ayant pour centre le point  $A$ ; les rayons lumineux sont dirigés suivant les rayons mêmes de ces

sphères. Lorsque les ondes viennent rencontrer un plan réfléchissant  $MM'$ , nous avons admis, en étudiant la réflexion des ondes sonores (679), que les *ondes réfléchies* sont limitées par des surfaces sphériques  $RS, RS', \dots$ , ayant pour centre le point  $A'$ , symétrique du point  $A$  par rapport au plan  $MM'$ . — Considérons, sur le plan  $MM'$ , le point  $C$  qui appartient à la fois à la surface d'onde incidente  $P''Q''$  et à la surface d'onde réfléchie  $RS$ . Au point  $C$ , le rayon lumineux incident est dirigé suivant la normale à la surface sphérique  $P''Q''$ , c'est-à-dire

suisant  $AC$ ; le rayon lumineux réfléchi est dirigé suivant la normale à la surface sphérique  $RS$ , c'est-à-dire suivant le prolongement  $CD$  de la droite  $A'C$ . Or si l'on mène en  $C$  la normale  $CN$  au plan  $MM'$ , il est aisé de voir, en s'appuyant sur l'égalité des triangles  $ABC$  et  $A'BC$ , que l'angle de réflexion  $NCD$  est égal à l'angle d'incidence  $NCA$ . — Les lois de la réflexion de la lumière s'expliquent donc, dans cette théorie, aussi bien que dans la théorie de l'émission.

**740. Miroirs plans.** — Les *miroirs plans* sont des surfaces planes, présentant un poli aussi parfait que possible. — Les miroirs des anciens étaient fabriqués avec un bronze très dur, capable d'acquies un très beau poli. On fabrique encore, au Japon, des miroirs *métalliques* de ce genre; ils ont l'inconvénient de se ternir, à la longue, et de perdre ainsi leurs qualités réfléchissantes.

Les miroirs *étamés*, comme ceux qui forment les glaces de nos appartements, sont formés par une lame de verre, à la surface *postérieure* de laquelle est appliquée une couche mince d'étain: cette couche est ce qu'on appelle le *tain* des glaces. C'est à la surface de l'étain que se produit la réflexion, mais le passage de la lumière au travers du verre rend ici le phénomène un peu plus compliqué, comme nous le montrerons plus loin (746).

**741. Image d'un point, par réflexion sur un miroir plan.** — Quand nous regardons dans un miroir plan, nous croyons voir, *derrière le miroir*, les objets lumineux qui sont placés en avant. — Les lois de la réflexion permettent de se rendre compte de cette illusion.

Considérons d'abord un *point lumineux unique*  $A$  (fig. 570) placé devant un miroir plan. — Concevons un plan mené par  $A$  perpendiculairement au miroir, et prenons ce plan pour plan de la figure: soit  $MN$  la section du miroir par ce plan, et  $AB$  un rayon lumineux qui y soit contenu. Le rayon réfléchi  $BC$  sera également dans le plan de la figure, et il fera avec  $BP$  un angle  $PBC$  égal à  $PBA$ . Or, abaissons du point  $A$  sur le miroir une perpendiculaire  $AI$ , et prolongeons-la jusqu'à sa rencontre en  $A'$  avec le prolongement du rayon réfléchi; les triangles  $AIB$  et  $A'IB$  sont égaux comme ayant le côté  $BI$  commun, et les angles  $IBA$  et  $IBA'$  égaux comme complémentaires, l'un de l'angle d'incidence, l'autre de l'angle de réflexion: donc

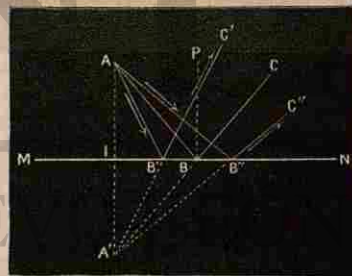


Fig. 570. — Image d'un point, produite par un miroir plan.

$AI = A'I$ . — Le même raisonnement s'applique à un rayon quelconque émané du point A; donc *les prolongements de tous les rayons réfléchis passent au point A', symétrique de A par rapport au plan réfléchissant.*

— Or, quand un rayon lumineux arrive à l'œil après avoir subi un ou plusieurs changements de direction, l'impression reçue est toujours celle que produirait un point lumineux, situé quelque part sur le prolongement de la dernière direction de ce rayon. Dès lors, dans le cas actuel, si l'œil est placé de manière à recevoir un certain nombre de rayons réfléchis, tous ces rayons lui paraîtront émaner du point A', qui appartient à la fois à tous leurs prolongements, et qu'on appelle *l'image* du point A.

742. **Image d'un objet.** — Soit maintenant un objet rectiligne AD (fig. 571), placé devant un miroir plan. Chacun des points de cet objet

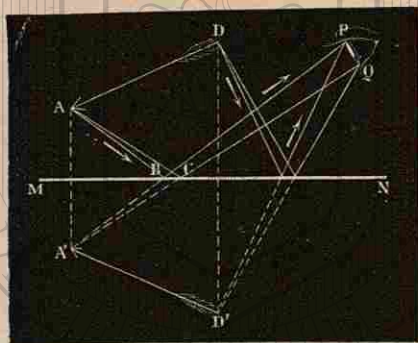


Fig. 571. — Image d'un objet.

ayant son image placée symétriquement par rapport au miroir MN, l'image de la droite AD est une droite A'D', symétrique de AD par rapport à MN. Si enfin on assigne à l'œil de l'observateur une position particulière PQ, et qu'on veuille se rendre compte de la marche des rayons lumineux qui lui donnent la sensation des divers points de cette image, on procédera de la manière suivante. — Pour le point A', par exemple, on joindra d'abord ce point aux bords de la pupille; on déterminera l'intersection BC de la surface réfléchissante avec les arêtes du cône ainsi obtenu; enfin, on joindra les points de cette intersection au point A. Parmi les rayons émis par A, ceux qui concourent, pour l'œil, à la production de l'image A', sont les rayons qui sont contenus dans le cône ABC et qui sont réfléchis par la surface BC vers la pupille PQ. — On procédera de même, soit pour le point D', soit pour tout autre point de l'image.

L'image d'un objet, de figure quelconque, est la figure *symétrique* par rapport au plan réfléchissant; il en résulte qu'elle n'est point généralement superposable à l'objet. C'est ainsi, par exemple, que l'image d'une personne placée devant un miroir ne peut pas être considérée comme la reproduction exacte de la personne elle-même : le côté droit de l'image est l'image du côté gauche de la personne, et réciproquement.

Ces images n'ont d'ailleurs aucune réalité, en ce sens que les points de l'espace où l'œil croit les voir ne reçoivent pas la lumière réfléchie : on les nomme *images virtuelles*.

743. **Champ d'un miroir plan, pour une position déterminée de l'œil.** — L'œil dans une position déterminée, ne peut voir dans un miroir qu'une région déterminée de l'espace : cette région est ce

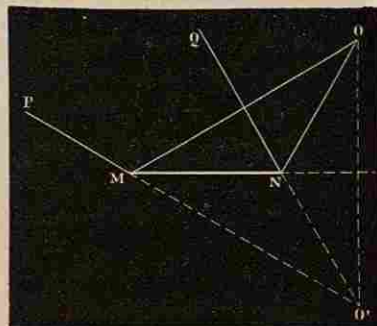


Fig. 572. — Champ d'un miroir plan.

qu'on nomme le *champ* du miroir. — Considérons la pupille comme réduite à un point O (fig. 572) : soit O' le point symétrique par rapport au miroir MN. D'après les lois de la réflexion, les points qui sont visibles du point O, par réflexion, sont aussi ceux auxquels arriveraient, en sens inverse, les rayons émis par le point O' et réfléchis par le miroir : dans le plan de la figure, ces points sont ceux qui sont compris, *au-dessus* de MN, dans l'angle PO'Q obtenu en joignant les bords M et N au point O'. — Dans l'espace, le champ est limité par le miroir et par la surface du cône qui a pour sommet O' et dont les arêtes s'appuient sur le contour du miroir. — On voit que le champ varie, pour un même miroir, avec la position de l'œil.

744. **Réflexion à la surface des corps transparents.** — La réflexion peut aussi se produire à la surface des corps transparents, comme l'eau, le verre, etc. Mais ces corps ne réfléchissent, en général, qu'une partie de la lumière incidente. Si, par exemple, un rayon lumineux AB (fig. 573) rencontre une surface de verre MN, une portion de la lumière incidente est réfléchie, suivant BC; une autre portion pénètre dans le verre, et, au lieu de continuer sa route suivant BA', elle prend une direction telle que BD : c'est le phénomène de la *réfraction*, que nous étudierons plus loin.

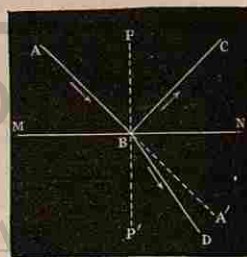


Fig. 573. — Réflexion à la surface d'un corps transparent.

Un caractère essentiel de la réflexion à la surface des corps transparents, c'est que *la proportion de lumière réfléchie augmente avec l'angle d'incidence.* — On peut le vérifier, en recevant, dans une chambre obscure, un faisceau lumineux sur une



lame de verre. Si la lame est presque perpendiculaire aux rayons incidents, le faisceau réfléchi est très peu intense, et le faisceau transmis est presque aussi intense que le faisceau incident. Au contraire, si l'angle d'incidence est voisin de 90 degrés, c'est le faisceau transmis qui a une intensité presque nulle, tandis que le faisceau réfléchi a une intensité presque égale à celle du faisceau incident (\*).

**745. Réflexion irrégulière, ou diffusion.** — Si, dans une chambre complètement obscure, on introduit un faisceau de rayons solaires et qu'on le fasse tomber sur un miroir plan, un observateur placé dans l'appartement ne reçoit de lumière que s'il se trouve dans la direction même des rayons réfléchis suivant les lois indiquées. Au contraire, si le faisceau solaire est reçu sur un mur blanc, la surface éclairée devient visible de tous les points de la chambre; cette surface renvoie donc des rayons lumineux dans toutes les directions. C'est ce qu'on nomme la *réflexion irrégulière* ou la *diffusion*. — On peut se rendre compte de ce phénomène, en remarquant que chacune des aspérités d'un corps non poli doit être considérée comme formée par une infinité de petites surfaces planes, diversement orientées, et, par suite, réfléchissant la lumière dans toutes les directions.

C'est grâce à la réflexion diffuse que nous distinguons, pendant le jour, les objets qui nous environnent, et même ceux qui ne reçoivent pas directement la lumière solaire. — Quand le ciel est pur, les objets qui sont éclairés par le Soleil renvoient de la lumière aux autres objets : les objets placés à l'ombre reçoivent alors une lumière adoucie, mais généralement encore assez considérable. — Quand le ciel est couvert, les nuages diffusent la lumière qui leur arrive; dans ce cas, c'est encore la lumière du Soleil qui éclaire les objets situés à la surface de la Terre, mais elle leur parvient dans toutes les directions, en sorte qu'ils ne peuvent plus produire d'ombres.

**746. Images multiples produites par un miroir étamé.** — Un miroir de verre étamé présente, en réalité, deux surfaces capables de réfléchir la lumière, savoir : la *face antérieure* du verre, et le *tain* qui est appliqué sur sa face postérieure; aussi, ces miroirs donnent-ils des images multiples.

Considérons ce qui se passe dans un plan mené par un point lumineux A et par l'œil O, perpendiculairement aux deux faces BB' et CC' d'un miroir de verre étamé (fig. 574). — Une première image se forme

(\*) Une observation semblable peut être faite sur une vitre placée dans un lieu éclairé. — Si l'observateur regarde la vitre presque normalement, il ne reçoit que la lumière émise par les objets placés de l'autre côté. — Au contraire, s'il la regarde dans une direction très oblique, il ne reçoit que la lumière émise sur la vitre par les objets placés du même côté que lui. — Dans les directions intermédiaires, il distingue à la fois les objets placés des deux côtés, mais avec des intensités variables, selon la position de l'œil par rapport à la normale menée au point de la vitre vers lequel il est dirigé.

au point a, symétrique de A par rapport à BB' : elle est due à des rayons, tels que Am, réfléchis sur la face libre du verre. — Une deuxième

image a', est produite par des rayons tels que An, qui se réfractent en n et pénètrent dans le verre, puis se réfléchissent en p, et se réfractent une seconde fois en r, pour arriver finalement à l'œil suivant rO. Une troisième image a'' est due à des rayons, tels que AstqxyO, réfléchis deux fois sur la face inférieure et une fois sur la face supérieure; et ainsi de suite. — Chacune des réflexions successives donnant toujours lieu à une perte d'intensité, l'éclat des images qui suivent l'image a' va en diminuant, à mesure qu'elles s'éloignent.

En plaçant, par exemple, une bougie assez près d'une glace d'appartement, et mettant l'œil également au voisinage de la glace, mais assez loin de la bougie, on aperçoit une succession d'images de la flamme, voisines les unes des autres, et d'intensités décroissantes.

**747. Images produites par deux miroirs parallèles.** — Un point lumineux S (fig. 575) étant placé de façon à émettre de la lumière sur

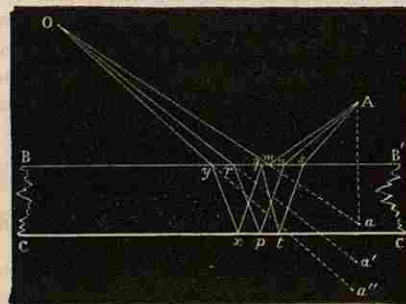


Fig. 574. — Images multiples, produites par un miroir étamé.

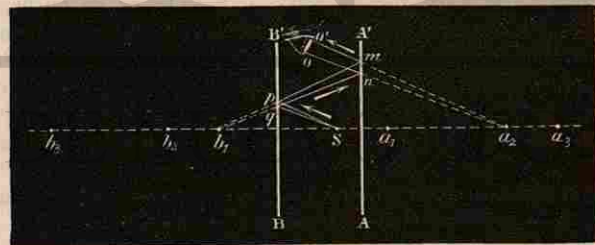


Fig. 575. — Images produites par deux miroirs parallèles.

deux miroirs parallèles, AA', BB', on aperçoit, derrière chacun d'eux, une série d'images dont il est facile de déterminer la disposition.

Et d'abord, les rayons qui arrivent à l'œil après avoir subi une *seule réflexion*, soit sur l'un des miroirs, soit sur l'autre, donnent les deux images a<sub>1</sub>, et b<sub>1</sub>, respectivement symétriques de S par rapport à AA' et par rapport à BB'. — Pour rendre compte des images que l'on observe

au delà de  $a_1$  et au delà de  $b_1$ , et qui sont produites par des rayons arrivant à l'œil après *plusieurs réflexions successives*, il suffit de remarquer que, après chaque réflexion sur l'un des miroirs, les rayons paraissent diverger d'un point qui est le symétrique, par rapport à ce miroir, du point de divergence immédiatement précédent. — Si  $\alpha$  et  $\beta$  sont les distances de S à AA' et à BB', on obtient ainsi, derrière le miroir AA', des images  $a_1, a_2, a_3, \dots$ , dont les distances au point S sont successivement

$$2\alpha, \quad 2\alpha + 2\beta, \quad 4\alpha + 2\beta, \quad 4\alpha + 4\beta, \quad 6\alpha + 4\beta, \dots;$$

et, derrière BB', des images  $b_1, b_2, b_3, \dots$ , dont les distances au même point S sont :

$$2\beta, \quad 2\beta + 2\alpha, \quad 4\beta + 2\alpha, \quad 4\beta + 4\alpha, \quad 6\beta + 4\alpha, \dots$$

On voit que la distance de deux images consécutives, dans chacune de ces deux séries, est alternativement  $2\alpha$  et  $2\beta$  (\*).

★ 748. **Images produites par deux miroirs faisant entre eux un certain angle.** — Lorsque deux miroirs font entre eux un certain angle, un point lumineux placé dans cet angle donne une succession d'images, disposées en cercle autour de la ligne d'intersection des deux miroirs.

Pour concevoir comment se produisent ces images, prenons d'abord le cas le plus simple, celui de deux miroirs OA et OB formant entre eux un angle droit (fig. 576). — Soit S un point lumineux, placé dans cet angle. Il se forme d'abord une image  $a_1$ , produite par des rayons qui ont subi une seule réflexion sur le miroir OA : ce point  $a_1$  est le symétrique de S par rapport à OA. — Il se forme, de même, une image  $b_1$ , produite par des rayons qui ont subi une seule réflexion sur le miroir OB; ce point  $b_1$  est le symétrique de S par rapport à OB. — Mais il se forme encore une autre image  $a_2$ , produite par des rayons qui ont été réfléchis d'abord par le miroir OB, puis par le miroir OA, et qui n'arrivent à l'œil de l'observateur qu'après ces deux réflexions. La figure montre que ces rayons, émis par le point S, se comportent, après leur réflexion sur le miroir OB, comme s'ils émanaient du point  $b_1$ ,

(\*) La figure 575 indique la construction à effectuer pour obtenir la marche des rayons qui donnent à l'œil, supposé placé en O', la sensation de l'une de ces images,  $a_2$  par exemple. On construit le cône ayant pour base le contour de la pupille et pour sommet le point  $a_2$ ; puis le cône ayant pour base l'intersection  $mn$  du précédent avec AA' et pour sommet  $b_1$ ; enfin, le cône ayant pour base l'intersection  $pq$  de celui-ci avec BB', et pour sommet S; la marche de la lumière, du point S à l'œil, est celle qui est indiquée par les flèches.

Les miroirs ayant toujours des dimensions finies, si l'œil est placé en dehors de l'espace qu'ils comprennent, il pourra se faire qu'on n'aperçoive, dans chacune des séries, qu'un nombre fini d'images, dépendant du *champ* de chacun des miroirs (745).

La construction n'offre, dans chaque cas particulier, aucune difficulté.

symétrique de S par rapport à OB; après leur réflexion sur le miroir OA, ils se comportent comme s'ils émanaient du point  $a_2$ , symétrique de  $b_1$  par rapport à la direction AA'. — Quant aux rayons qui éprouvent une première réflexion sur le miroir OA et une seconde réflexion sur le miroir OB, ils donnent une image au point symétrique de  $a_1$  par rapport à la direction BB' : mais, dans le cas particulier que nous considérons, où l'angle des miroirs est droit, ce point se confond avec le point  $a_2$ . — On verra d'ailleurs facilement que, dans ce cas particulier, aucun rayon ne peut subir plus de deux réflexions.

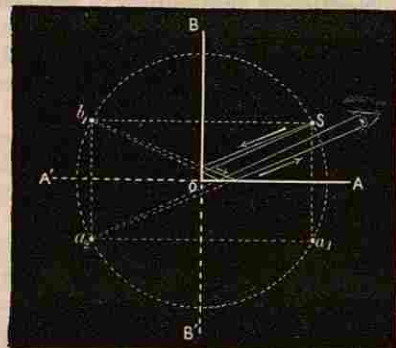


Fig. 576. — Images produites par deux miroirs faisant entre eux un angle droit.

Donc, quand deux miroirs font entre eux un angle droit, l'œil peut apercevoir *quatre fois* un même point lumineux placé dans l'angle des miroirs, savoir : *une fois directement, et trois fois par réflexion*. Les quatre points S,  $a_1, a_2, b_1$ , sont à égale distance du point O : c'est ce qu'il est facile de démontrer; en d'autres termes, ils sont distribués sur une circonférence ayant O pour centre et OS pour rayon (\*).

749. **Kaléidoscope.** — Cet appareil, imaginé par le physicien anglais Brewster, est formé par un tube de carton ou de métal, dans lequel sont fixés deux miroirs inclinés, placés de manière que leur intersection soit dirigée parallèlement à l'axe du tube. L'angle des deux miroirs est de 60 degrés. A l'une des deux extrémités du tube se trouvent de petits fragments de verre, de diverses couleurs, placés entre deux parois de verre ordinaire. L'œil, appliqué à l'autre extrémité du tube, aperçoit, en une sorte de rosace à six compartiments, la figure formée par les fragments de verre, alternant avec la figure symétrique. — En secouant le tube, ou en le faisant tourner sur lui-même, on modifie la disposition des fragments de verre les uns par rapport aux autres, et on peut ainsi faire subir une multitude de transformations à la figure régulière qu'ils forment avec leurs images.

(\*) On trouve que, si l'angle des miroirs est contenu un nombre pair  $2n$  de fois dans quatre angles droits, le nombre des images est égal à  $2n - 1$ ; l'œil aperçoit donc  $2n$  fois le point lumineux, savoir : une fois directement, et  $2n - 1$  fois par réflexion. Ces images sont toujours situées sur une circonférence décrite du point O comme centre avec OS pour rayon.

## II. — MIROIRS SPHÉRIQUES.

750. **Miroirs sphériques. — Définitions.** — Une surface courbe peut, en chacun de ses points, être considérée comme se confondant avec le plan tangent mené par ce point. Tout rayon lumineux qui rencontre une surface courbe se réfléchit donc comme il le ferait sur le plan tangent mené au point d'incidence.

Nous nous bornerons à l'étude des *miroirs sphériques*. — Ces miroirs sont dits *concaves* ou *convexes*, selon que leur face réfléchissante est la face interne ou la face externe de la portion de surface sphérique qui les constitue.

Soit C (fig. 577) le centre de la sphère dont le miroir fait partie, MN la *base* du miroir, c'est-à-dire le plan du petit cercle qui en forme le bord. — La perpendiculaire menée au plan MN, par le centre C de la sphère, prend le nom d'*axe principal du miroir*. Le point O, où l'axe rencontre la surface réfléchissante, est le *sommet* du miroir.

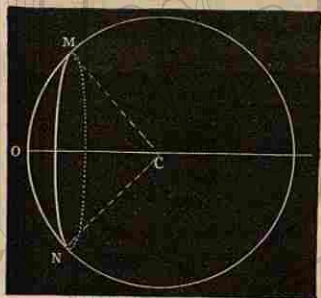


Fig. 577.

Un plan quelconque passant par l'axe, par exemple le plan de la figure, coupe le miroir suivant un arc de grand cercle MON : l'ouverture du miroir est l'angle MCN, formé par les droites menées du centre aux extrémités de l'arc MN. Nous supposerons, dans tout ce qui va suivre, que l'ouverture ne comprenne qu'un *petit nombre de degrés*,

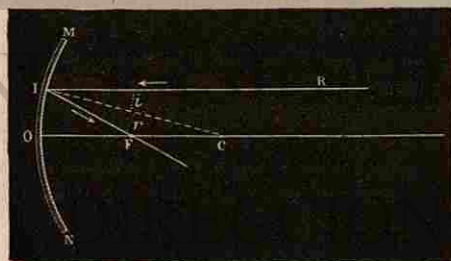


Fig. 578.

ou, en d'autres termes, que le miroir ne représente qu'une petite portion de la surface de la sphère.

751. **Miroirs sphériques concaves. — Foyer principal.** — Soit MON (fig. 578) la section d'un miroir sphérique *concave*, par un plan mené par

l'axe principal; prenons ce plan pour plan de la figure, et soit RI un rayon lumineux parallèle à l'axe. La normale menée au point d'incidence I n'est autre que le rayon IC de la sphère; par suite, le

rayon réfléchi IF est aussi contenu dans ce plan. — Soit F le point où ce rayon coupe l'axe principal; l'angle ICF, égal à l'angle d'incidence RIC, est aussi égal à l'angle de réflexion CIF; donc le triangle IFC est isocèle, et FC = FI. Mais, d'autre part, si OI est très petit par rapport à FO et à CO, l'angle en F du triangle IFC diffère très peu de deux angles droits : on a donc, avec d'autant plus d'approximation que le rayon lumineux RI est plus voisin de l'axe, IC = IF + FC; enfin, comme IC est égal à OC, on a :

$$FC = \frac{1}{2} OC$$

Donc le point F est sensiblement à égale distance du centre C et du sommet O du miroir.

Si le miroir n'a, comme nous l'avons supposé, qu'une très petite ouverture, tous les rayons incidents parallèles à l'axe principal seront dans les conditions du rayon RI; donc, après réflexion, ils viendront tous passer au point F, milieu de OC, comme l'indique la figure 579. — Ce point prend le nom de *foyer principal du miroir*.

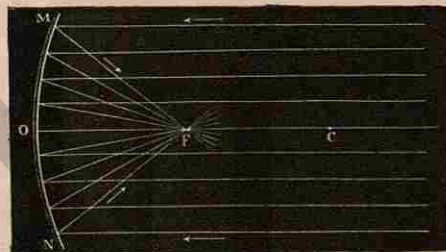


Fig. 579.

Foyer principal d'un miroir sphérique concave.

Réciproquement, si un point lumineux est placé au foyer principal d'un miroir, tous les rayons émis par ce point sur le miroir seront réfléchis dans une direction parallèle à l'axe principal.

752. **Aberrations de sphéricité. — Caustiques par réflexion.**

— Les approximations par lesquelles nous avons déterminé le point où le rayon réfléchi IF (fig. 578) vient couper l'axe cessent d'être applicables lorsque l'ouverture est assez considérable.

Dans ce cas, on reconnaît facilement que, pour des rayons incidents parallèles à l'axe principal, les rayons réfléchis viennent rencontrer l'axe en des

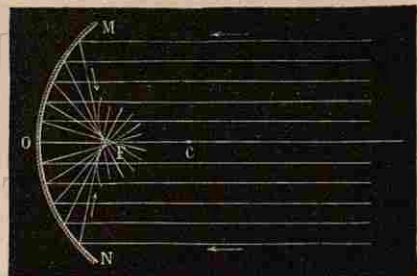


Fig. 580. — Aberration de sphéricité.

points d'autant plus voisins du sommet  $O$  que l'incidence a lieu plus près du bord. Si donc un semblable miroir reçoit un large faisceau de rayons parallèles à l'axe (fig. 580), les intersections successives des rayons réfléchis dessineront, dans un plan passant par l'axe, une courbe lumineuse, formée de deux branches symétriques partant du foyer principal  $F$  : cette courbe se nomme *caustique par réflexion*. — Si maintenant on imagine que le plan de la figure vienne à tourner autour de l'axe du miroir, cette courbe engendrera une surface de révolution dite *surface caustique*. On peut rendre manifeste la concentration de lumière qui se produit aux divers points de cette surface, soit en la coupant par un petit écran, soit en projetant une poussière fine dans l'espace situé en avant du miroir. — On donne, à ce défaut de convergence absolue, le nom d'*aberration de sphéricité*. Elle est d'autant moindre que l'ouverture du miroir est plus petite.

753. **Foyer d'un point situé sur l'axe principal.** — Soit  $MN$  (fig. 581) la section du miroir par un plan passant par l'axe principal

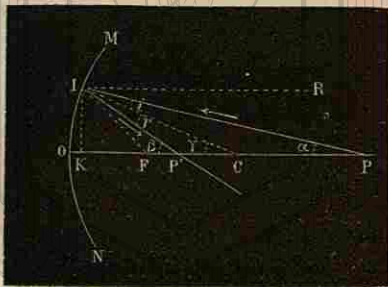


Fig. 581.

OC; soit  $P$  un point lumineux situé sur cet axe, et  $PI$  un rayon incident. La normale au point d'incidence est le rayon  $CI$  du miroir : le rayon réfléchi  $IP'$  sera dans le plan de la figure, et fera un angle de réflexion  $CIP'$  égal à l'angle d'incidence  $PIC$ . Soit  $P'$  le point où ce rayon coupe l'axe principal (\*). — Si nous désignons par  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$

$$(1) \quad \alpha + \beta = 2\gamma.$$

les angles  $IP'O$ ,  $IP'O$  et  $ICO$ , les angles d'incidence et de réflexion ont respectivement pour valeurs :  $i = \gamma - \alpha$  et  $r = \beta - \gamma$ . Écrivons que ces deux angles sont égaux; il vient :  $\gamma - \alpha = \beta - \gamma$ , ou

(\*) Si, comme le suppose la figure 581, le point lumineux  $P$  est au delà du centre  $C$ , on voit que le point  $P'$  sera placé entre le centre  $C$  et le foyer principal  $F$ ; car, si le miroir recevait au même point  $I$  un rayon  $RI$  parallèle à l'axe, ce rayon se réfléchirait suivant  $IF$ ; or, l'angle d'incidence  $PIC$  étant plus petit que l'angle d'incidence  $RIC$ , l'angle de réflexion  $CIP'$  doit être plus petit que l'angle de réflexion  $CIF$ ; c'est-à-dire que  $IP'$  doit être compris entre  $IC$  et  $IF$ .

Les angles  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$  ont alors respectivement pour mesures  $\frac{IK}{OP}$ ,  $\frac{IK}{OP'}$ ,  $\frac{IK}{OC}$ , et la relation (1) devient, en supprimant le facteur commun  $IK$ ,

$$(2) \quad \frac{1}{OP} + \frac{1}{OP'} = \frac{2}{OC}.$$

Cette relation montre que la distance  $OP'$  ne dépend que des distances  $OP$  et  $OC$ , c'est-à-dire de la position du point  $P$  sur l'axe du miroir. — Donc tous les rayons émanés d'un même point  $P$  doivent, après réflexion, passer sensiblement par un même point  $P'$ .

*Inversement*, si le point lumineux était en  $P'$ , les rayons réfléchis iraient tous passer sensiblement par  $P$ . — Les deux points  $P$  et  $P'$  sont donc *réiproques* l'un de l'autre; on les nomme *foyers conjugués*.

La même construction montre :

1° Que si le point lumineux  $P$  se rapproche du centre  $C$ , son foyer  $P'$  s'en rapproche également, en s'éloignant du foyer principal  $F$ ; car le rayon incident  $PI$  (fig. 581) se rapprochant alors de  $CI$ , le rayon réfléchi  $IP'$  doit s'en rapprocher également;

2° Que si le point lumineux est situé entre le centre  $C$  et le foyer principal  $F$ , son foyer, qui est situé au delà du centre, s'en éloigne d'autant plus que le point lumineux s'approche davantage de  $F$ . — Enfin, si le point lumineux arrivait exactement au point  $F$ , nous avons déjà vu (751) que les rayons réfléchis deviendraient parallèles à l'axe : il n'y aurait plus, à proprement parler, de foyer.

754. — Il reste enfin à examiner le cas où le point lumineux  $P$  est situé entre le foyer principal  $F$  et le miroir (fig. 582). — Soit  $PI$  un rayon incident quelconque, et  $CI$  la normale au point  $I$ ; si le miroir recevait en  $I$  un rayon émané du foyer principal  $F$ , ce rayon serait réfléchi parallèlement à l'axe; le rayon réfléchi actuel  $IS$ , qui doit s'écarter davantage de la normale  $CI$ , ne peut donc rencontrer l'axe en avant du miroir; mais le prolongement géométrique  $IP'$  de ce rayon vient couper l'axe en  $P'$ , derrière la surface réfléchissante. — Désignons comme précédemment par  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$  les angles  $IP'O$ ,  $IP'O$  et  $ICO$ ; par  $i$  et  $r$  les angles d'incidence et de réflexion; nous aurons les relations :  $i = \alpha - \gamma$ ;  $r = \beta + \gamma$ , d'où l'on déduit

$$(4) \quad \alpha - \beta = 2\gamma.$$

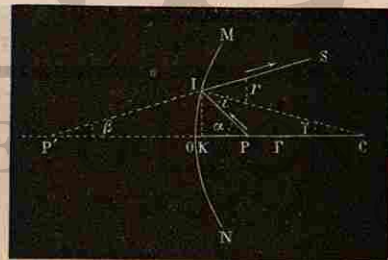


Fig. 582.

Supposons encore l'ouverture du miroir assez petite pour que l'on puisse considérer les angles  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$  comme mesurés respectivement par  $\frac{IK}{OP}$ ,  $\frac{IK}{OP'}$  et  $\frac{IK}{OC}$ ; la relation (1') devient alors, en supprimant le facteur commun  $IK$ :

$$(2') \quad \frac{1}{OP} - \frac{1}{OP'} = \frac{2}{OC},$$

c'est-à-dire que les prolongements géométriques de tous les rayons réfléchis viennent passer sensiblement par un même point  $P'$ , comme le représente la figure 585.

Le point  $P'$  reçoit encore le nom de *foyer* du point  $P$ . — Il faut remarquer que, les rayons lumineux ne parvenant pas réellement à ce point, il est impossible d'en vérifier la position comme on pouvait le faire dans les cas précédents, au moyen d'un écran. Mais, si l'œil est placé sur le trajet des rayons réfléchis, il perçoit ces divers rayons comme s'ils émanaient

du point  $P'$ , c'est-à-dire qu'il voit un point lumineux en  $P'$ . Ce point prend alors le nom de *foyer virtuel*. — Par opposition, on appelle *foyers réels*, les points par lesquels passent effectivement les rayons lumineux réfléchis, comme dans les cas précédents.

Réciproquement, si l'on recevait sur le miroir des rayons dont les directions prolongées allaient concourir au point  $P'$ , les rayons réfléchis viendraient converger au point  $P$ , en avant de la surface réfléchissante. Pour cette raison, on désigne encore le système des deux points  $P$  et  $P'$  sous le nom de *foyers conjugués*.

755. **Relation numérique entre les distances focales conjuguées.** — Remarquons que la relation (2') ne diffère de la relation (2) que par le signe de la grandeur  $OP'$ . Or, dans le premier cas (fig. 581), la grandeur  $OP'$  était portée à droite du miroir, dans le sens de la lumière réfléchie; dans le second cas (fig. 582), cette grandeur  $OP'$  est portée à gauche du miroir, en sens inverse de la lumière réfléchie; selon les conventions usitées en géométrie, on doit donc,

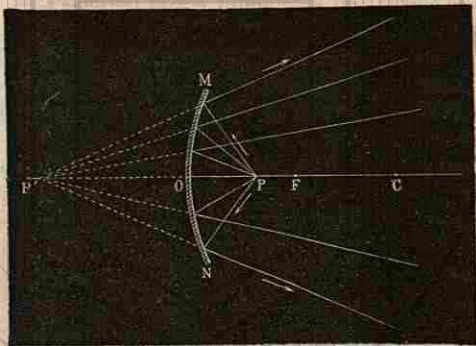


Fig. 585. — Foyer virtuel.

dans le second cas, considérer  $OP'$  comme une grandeur négative. — En adoptant ces conventions, et désignant par  $R$  le rayon de courbure, on voit que, quelle que soit la distance  $p = OP$  du miroir au point lumineux, la distance  $p' = OP'$  du miroir au foyer conjugué sera déterminée, en grandeur et en signe, par l'équation

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{2}{R}.$$

Plus généralement, étant données deux des trois quantités  $p$ ,  $p'$  et  $R$ , on pourra déterminer la troisième à l'aide de cette relation.

On voit que, si l'on fait  $p = \infty$ , c'est-à-dire si l'on considère des rayons incidents parallèles à l'axe principal, la formule précédente donne  $p' = \frac{R}{2}$ ; c'est la position déjà obtenue (751) pour le foyer principal. Si donc on désigne par  $f$  la distance focale principale, on a  $\frac{1}{f} = \frac{2}{R}$ , et la relation précédente peut alors s'écrire :

$$(1) \quad \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}.$$

En donnant à  $p$  diverses valeurs, et discutant les valeurs correspondantes de  $p'$ , on retrouvera analytiquement tous les résultats que nous avons obtenus par des considérations géométriques.

756. **Foyers des points situés en dehors de l'axe principal.** — **Axes secondaires.** — Soit un point lumineux  $A$  (fig. 584), situé

hors de l'axe principal du miroir, mais de telle sorte que la droite  $AC$ , menée de ce point au centre du miroir, ne fasse avec l'axe principal qu'un petit angle; cette droite  $AC$  rencontrera alors la surface du miroir en un point  $B$ . Le miroir présentant, dans les points voisins de  $B$ , la même symétrie que dans les points voisins du sommet  $O$ , on pourra appliquer à cette droite tout ce qui a été dit de l'axe  $OC$  dans les paragraphes précédents; il en résulte que tous les rayons partis d'un point quelconque  $A$  de la droite  $AB$  passeront, après réflexion, par un même point  $A'$  situé sur cette droite; et que, inversement, des rayons émanés du point  $A$

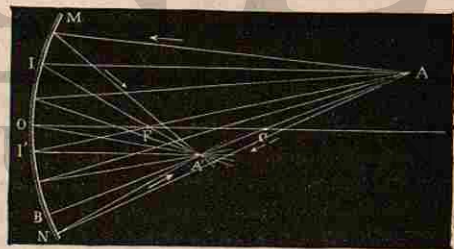


Fig. 584. — Foyers conjugués, sur un axe secondaire.

iraient concourir au point A. — La droite AB se nomme l'*axe secondaire* du point A, les points A et A' sont deux *foyers conjugués* sur cet axe.

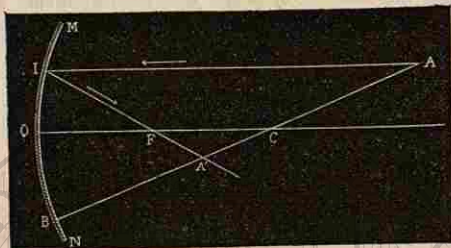


Fig. 585.

Cela posé, pour obtenir, par une construction géométrique, la position du foyer conjugué d'un point donné A, il suffira de construire un *seul* rayon lumineux réfléchi, et de déterminer le point où il coupe l'axe secondaire AB. On choisit, en général, ceux de ces rayons dont la construction est la plus simple.

— Considérons, par exemple, parmi les rayons incidents, le rayon AI (fig. 585) qui est parallèle à l'axe principal; il viendra passer, après réflexion, par le foyer principal F; on trouvera donc le point A' en déterminant le point d'intersection de IF avec AB.

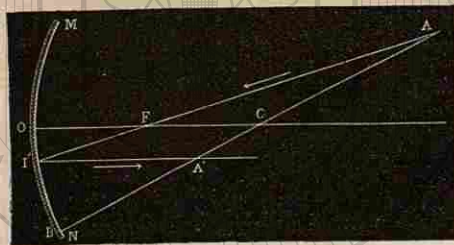


Fig. 586.

— On peut aussi, au lieu du rayon incident parallèle à l'axe principal, employer le rayon incident AI' (fig. 586), qui passe par le foyer principal F; ce rayon se réfléchit parallèlement à l'axe principal et coupe alors l'axe secondaire au point cherché A' (\*).

**757. Droites conjuguées. — Plans conjugués.** — Soit MN (fig. 587) la section d'un miroir concave par un plan qui passe par l'axe principal; et considérons, dans ce plan, un point Q dont le foyer conjugué, déterminé par l'une ou l'autre des constructions géométriques précédemment indiquées, est le point Q'. Le rayon QA doit se réfléchir suivant AQ', et la droite AC, normale au miroir au point A, est la bissectrice de l'angle QAQ'. Des points Q et Q', abaissons des perpendiculaires QP,

(\*) Dans certains cas, il se peut que l'une ou l'autre de ces deux constructions semble en défaut, tantôt parce que le rayon incident employé pour trouver le foyer conjugué n'existe pas, tantôt parce que ce rayon se trouve intercepté avant sa rencontre avec la surface du miroir: il ne faudrait pas pour cela renoncer à ces constructions, qui doivent être regardées comme *purement géométriques*. Les lignes tracées sur la figure, bien que ne représentant plus alors de véritables rayons lumineux, détermineront toujours le foyer que l'on cherche.

QP' sur l'axe principal. Les triangles P'QA et PQA sont semblables; il en est de même des triangles P'QC et PQC; on a donc :

$$\frac{QP'}{QP} = \frac{AP'}{AP} \quad \frac{QP'}{QP} = \frac{CP'}{CP},$$

d'où

$$\frac{AP'}{AP} = \frac{CP'}{CP}$$

La position du point P' est donc indépendante de la distance PQ; elle ne dépend que de la position du point P. Si nous supposons que le point lumineux se déplace sur la droite PQ, le point P' demeure fixe, et le foyer conjugué doit se déplacer sur la droite P'Q'. — Ces droites PQ et P'Q' sont dites des *droites conjuguées*. Tout point lumineux situé sur l'une d'elles a son foyer conjugué sur l'autre.

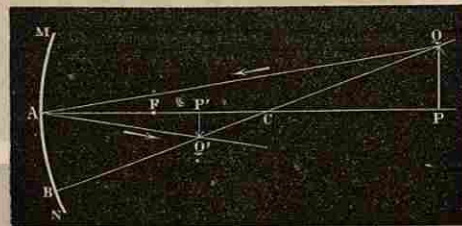


Fig. 587.

Si maintenant on fait tourner le plan de la figure autour de l'axe principal, les droites PQ et P'Q' engendrent deux plans perpendiculaires à l'axe principal, et tout point lumineux situé dans l'un de ces plans a son foyer conjugué dans l'autre plan. Ces plans sont appelés *plans conjugués*. — Puisque le point P' est le point conjugué du point P, les distances *p* et *p'* du miroir aux deux plans conjugués satisfont à la relation (1) :

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}$$

**758. Construction géométrique de l'image d'une droite perpendiculaire à l'axe principal.** — L'image d'un objet est l'ensemble des foyers conjugués de tous ses points. Il nous suffira de considérer l'image d'une droite PQ (fig. 587), perpendiculaire à l'axe principal: il est évident que la solution de ce cas particulier permettra de construire l'image d'un objet quelconque. — On vient de voir que l'image de la droite PQ est une droite P'Q' perpendiculaire à l'axe principal (757); il suffit donc de déterminer le foyer d'un point P de la droite donnée. — Enfin les deux triangles APQ, A'P'Q' (fig. 587) donnent la relation :

$$\frac{P'Q'}{PQ} = \frac{AP'}{AP}$$

c'est à dire que le rapport des grandeurs linéaires de l'image et de l'objet est égal au rapport des distances du miroir à l'image et à l'objet.

La construction suivante permet d'ailleurs de déterminer, dans les divers cas, la nature de l'image (réelle ou virtuelle), et les rapports de grandeur et de position de l'image et de l'objet.

1° Soit un objet rectiligne AB (fig. 588), perpendiculaire à l'axe principal du miroir MN, et situé au delà du centre. — Pour trouver

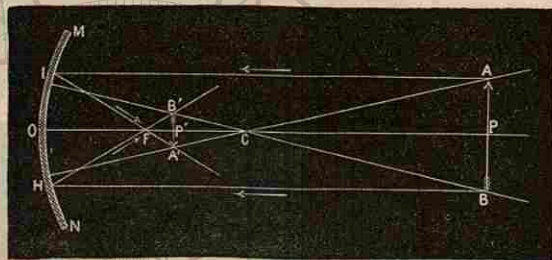


Fig. 588. — Image réelle d'un objet.

le foyer conjugué de l'extrémité A, traçons l'axe secondaire AC et un rayon AI parallèle à l'axe principal; après réflexion, ce rayon passe au foyer principal F et rencontre le prolongement de AC au point A', qui est l'image du point A. — On déterminera de même l'image B' du point B. — La droite A'B' est l'image de AB.

On voit, par la construction même, que cette image est réelle. — De plus, elle est renversée par rapport à l'objet, puisque les axes secondaires des extrémités A et B se croisent au centre C. — Enfin, dans le cas actuel, P'O étant plus petit que PO, l'image est plus petite que l'objet.

Si l'on suppose que l'objet AB se rapproche du centre, les axes secondaires des extrémités de l'objet s'écartent l'un de l'autre; or, les foyers conjugués de ces points sont toujours déterminés par les intersections de ces axes avec les rayons réfléchis qui passent par le foyer principal, rayons qui n'ont pas changé de direction; dès lors l'image grandit, tout en restant plus petite que l'objet, et se rapproche du centre (\*).

2° Supposons l'objet AB (fig. 589) sur la perpendiculaire menée par le centre à l'axe principal, et, pour plus de clarté dans la figure, plaçons-le tout entier d'un même côté de l'axe. — L'axe secondaire du point A ne rencontrant plus le miroir, déterminons le foyer conjugué de ce

(\*) L'objet et l'image sont toujours compris entre deux droites, AA' et BB', qui se coupent au centre: c'est ce qu'on exprime en disant que, dans chaque cas particulier, un objet et son image seraient vus du centre sous des angles égaux. — Il sera facile de voir que l'objet et l'image jouissent de la même propriété par rapport au sommet du miroir (fig. 587). — Mais le centre et le sommet sont les deux seuls points pour lesquels il en soit ainsi.

point par l'intersection de deux rayons réfléchis, savoir: d'une part, celui qui provient du rayon incident AM parallèle à l'axe principal, et qui passe, après réflexion, par le foyer principal F; d'autre part, celui qui provient du rayon incident AF mené par le foyer principal, et qui est réfléchi parallèlement à l'axe OC. Il est facile de voir que leur intersection A' est symétrique de A par rapport à l'axe principal (\*). — On déterminerait de même le foyer conjugué B' du point B. — Cette construction montre que l'image A'B' est réelle, renversée, égale à l'objet, et symétriquement placée par rapport à l'axe principal.

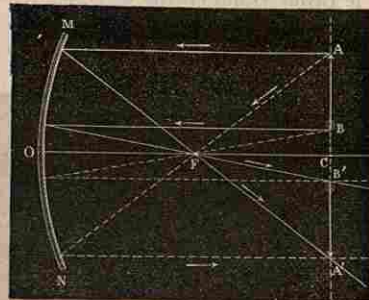


Fig. 589. — Image réelle égale à l'objet.

3° Si l'objet AB est placé entre le centre et le foyer principal, on trouvera, en répétant la construction du premier cas, que l'image est située au delà du centre; qu'elle est réelle, renversée et plus grande que l'objet. — On verra facilement que, plus l'objet s'approche du foyer, plus cette image grandit en s'éloignant du miroir.

4° Si l'objet AB coupe l'axe principal au foyer principal E (fig. 590), l'axe secondaire du point A et le rayon réfléchi IF doivent être considérés comme parallèles, pourvu que l'ouverture du miroir soit très petite; en effet AI devient alors égal à OF, et par suite à FC; la figure AIFC est donc un parallélogramme, les côtés opposés AI et FC étant égaux et parallèles. Il en résulte que IF, qui, par son intersection avec AC, devait déterminer le foyer conjugué du point A, ne rencontre AC ni en avant ni en arrière du miroir. Dans ce cas, il n'y a donc pas d'image (\*\*).

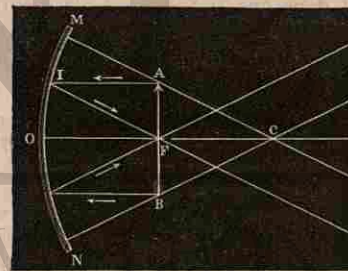


Fig. 590.

(\*) On devait s'attendre à trouver le point A' sur le prolongement de la perpendiculaire AC, car cette perpendiculaire est ici l'axe secondaire du point A.

(\*\*) En considérant la position que nous venons d'examiner comme la limite des positions que peut prendre l'objet AB lorsqu'il s'approche indéfiniment du foyer principal, on dit quelquefois que l'image est alors infiniment éloignée du miroir et infiniment grande.

5° Supposons enfin que l'objet AB soit situé *entre le foyer principal et le miroir* (fig. 591). En menant encore l'axe secondaire du point A, et le rayon AI qui émane de ce point parallèlement à l'axe principal et se réfléchit suivant IF, on forme un trapèze AIFC, dans lequel le côté AI est plus petit que FC, puisqu'il est moindre que OF : le rayon

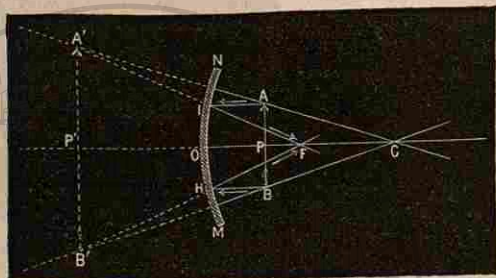


Fig. 591. — Image virtuelle.

réfléchi IF, prolongé en avant du miroir, ne rencontre donc pas l'axe secondaire du point A. Mais les prolongements de ces deux directions se rencontrent derrière le miroir, en un point A', qui est le foyer conjugué *virtuel* du point A. On déterminerait de même le point B'. — On voit donc que si l'objet est placé entre le foyer et le miroir, l'image est *virtuelle, droite et plus grande que l'objet*.

A mesure que l'objet se rapproche du miroir, l'image s'en rapproche également et diminue de grandeur.

**759. Image d'un objet situé dans un plan perpendiculaire à l'axe principal. — Rapports de position et de grandeur de l'image et de l'objet.** — Si on place, devant un miroir concave, un objet situé dans un plan perpendiculaire à l'axe principal, l'image est située dans le plan conjugué du plan de l'objet; sa position, caractérisée par la distance  $p'$  de ce plan au miroir, est déterminée par l'équation

$$(1) \quad \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}$$

Selon que la valeur de  $p'$ , tirée de cette équation, est *positive* ou *négative*, l'image est *réelle* ou *virtuelle*.

L'image d'un point du contour de l'objet est située sur l'axe secondaire qui passe par ce point; l'image du contour de l'objet, c'est-à-dire le contour de l'image, est donc située sur le cône dont le sommet est le centre du miroir, et dont la base est le contour de l'objet; et l'intersection de ce cône avec le plan conjugué détermine le contour de l'image. — Si les deux plans conjugués sont du même côté du centre, ils coupent la même nappe du cône, et alors l'image est *droite*: ce cas se présente lorsque, l'objet

étant placé entre le miroir et son foyer, l'image est derrière le miroir (fig. 591): dans ce cas,  $p'$  est négatif. — Si les deux plans conjugués sont de part et d'autre du centre, chacun d'eux rencontre, l'une des nappes du cône (fig. 588); l'image d'un point A, situé au-dessus de l'axe, se fait en A', au-dessous de l'axe, et l'image est *renversée*: ce cas se présente lorsque, l'objet étant situé au delà du foyer du miroir, l'image est en avant du miroir; alors  $p'$  et  $p$  sont tous deux positifs. — En résumé, selon que, en résolvant l'équation (1), on trouve que le rapport  $\frac{p'}{p}$  est *positif* ou *négatif*, on en doit conclure que l'image est *renversée* ou *droite*.

Enfin le rapport de deux dimensions linéaires correspondantes de l'image et de l'objet, est égal à la valeur absolue du rapport des distances du miroir à l'image et à l'objet (758): on aura donc, en désignant par  $i$  et  $o$  deux *dimensions homologues* de l'image et de l'objet,

$$(2) \quad \frac{i}{o} = \sqrt{\frac{p'}{p}}$$

L'image est donc *plus grande* ou *plus petite* que l'objet, selon que  $\frac{p'}{p}$  est *supérieur* ou *inférieur* à l'unité.

La résolution de l'équation (1), en faisant connaître  $p'$ ,  $\frac{p'}{p}$  et  $\frac{p'^2}{p^2}$ , détermine donc la position, la nature (réelle ou virtuelle) et la grandeur de l'image, sans qu'il soit nécessaire d'effectuer une construction géométrique.

#### 760. Vérification expérimentale des résultats qui précèdent.

— Devant un miroir sphérique concave on dispose une bougie, de manière que le milieu de la flamme P se trouve à peu près sur l'axe principal du miroir. A l'aide d'un petit écran de papier, on cherche le lieu où l'image se forme avec le plus de netteté. — On constate alors les résultats suivants :

1° La bougie A étant d'abord placée très loin du miroir (fig. 592), l'image P' se forme très près du foyer principal F; cette image est renversée, très petite et très brillante. — Si l'on rapproche graduellement la bougie du centre C du miroir, l'image s'en rapproche également, en marchant en sens inverse: en même temps elle grandit, mais en restant toujours plus petite que l'objet.

2° Lorsqu'on atteint le centre, en ayant soin d'abaisser suffisamment la flamme au-dessous de l'axe, on peut constater que l'image, toujours renversée, se trouve à la même distance du miroir, et qu'elle est égale en grandeur à l'objet (\*).

3° Quand la bougie P arrive entre le centre et le foyer principal F (fig. 593), on reconnaît que l'image P' a dépassé le centre C; qu'elle

(\*) On donne quelquefois une autre forme à cette expérience. Au-dessous du centre d'un grand miroir concave, et dans une salle bien éclairée, on suspend un bouquet de fleurs, dans une position *renversée*. Les personnes placées à quelque distance, en avant du miroir, aperçoivent alors, au-dessus du centre, une image aérienne et *droite* de ce bouquet.



est toujours renversée, mais qu'elle est alors plus grande que l'objet ;

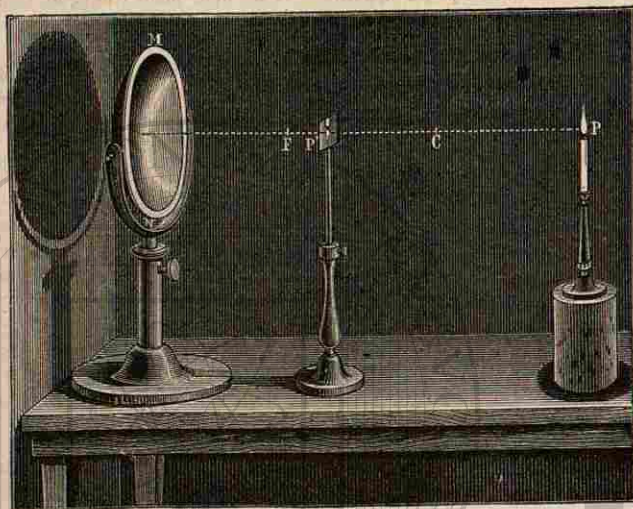


Fig. 592. — Image réelle, plus petite que l'objet.

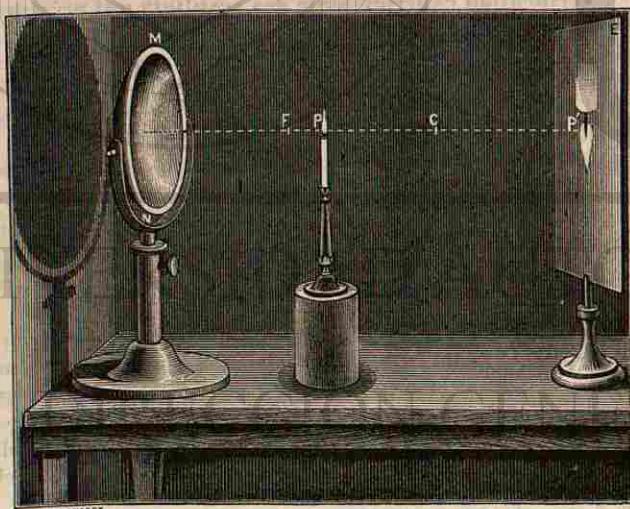


Fig. 595. — Image réelle, plus grande que l'objet.

enfin, elle est d'autant plus grande et plus éloignée du miroir, que la flamme se rapproche davantage du foyer principal.

4° Quand la bougie atteint le foyer principal, l'image disparaît; les rayons réfléchis par le miroir forment alors un faisceau qui est sensiblement parallèle à l'axe principal, et qui le serait rigoureusement si la flamme se réduisait à un point.

5° Enfin, quand la bougie arrive entre le foyer F et le miroir (fig. 594), un observateur placé en avant du miroir voit apparaître, derrière la surface réfléchissante, une image virtuelle et droite; cette image, d'abord très grande et très éloignée, se rapproche et diminue progressivement, à mesure qu'on approche la bougie de la surface du miroir. — Cette expérience explique l'usage qu'on fait quelquefois des miroirs concaves comme *miroirs grossissants*.



Fig. 594. — Image virtuelle.

**761. Observation des images réelles, sans l'emploi d'écrans. — Images aériennes.**

Dans les expériences précédentes, pour constater la production d'une image réelle, nous avons employé un écran, que nous placions au point où l'image apparaissait avec le plus de netteté: elle devenait alors *visible de tous les points de l'espace environnant*, parce que les points de l'écran qui étaient éclairés diffusaient de la lumière dans toutes les directions.

On peut encore percevoir la formation d'une image réelle sans employer d'écran. En effet, les rayons émis par un point A de l'objet (fig. 584) donnent naissance, après réflexion, à un cône de rayons convergents, ayant pour base le miroir et pour sommet le point A': donc, si l'on supprime l'écran, ces rayons, continuant leur marche au delà de A', forment un cône de rayons *divergents*, dont les arêtes sont dans le prolongement de celles du cône précédent. Dès lors, si l'œil de l'observateur est placé à l'intérieur de ce dernier cône, il recevra de la lumière dans les mêmes conditions que si le point A' appartenait à un objet lumineux. L'observateur verra de même les autres points de l'image, pourvu que son œil soit placé dans la région commune aux divers cônes ayant ces divers points pour sommets. — Cette région est généralement assez étendue pour que plusieurs observateurs puissent voir simultanément l'image, en se plaçant à une distance suffisante.

Il est intéressant d'observer la formation de ces *images aériennes*

Elles offrent absolument l'aspect d'objets lumineux, mais elles ne sont visibles que pour des positions déterminées de l'œil. — Nous verrons plus loin que les images aériennes jouent un rôle essentiel dans divers instruments d'optique.

**762. Miroirs sphériques convexes. — Foyer principal virtuel.** — Soit  $MOM'$  (fig. 595) la section d'un miroir sphérique convexe,

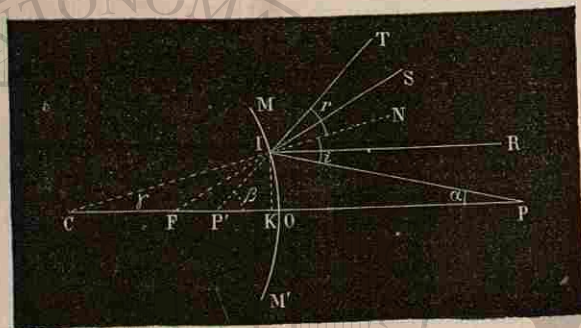


Fig. 595. — Foyers virtuels, produits par un miroir sphérique convexe.

par un plan mené par l'axe principal, et considérons un rayon lumineux RI parallèle à l'axe. La normale au point d'incidence est la droite CIN : le rayon réfléchi IS fait un angle de réflexion SIN égal à l'angle d'incidence RIN. La figure montre qu'il ne peut rencontrer l'axe principal, mais que son prolongement géométrique rencontre cet axe en un point F, situé derrière le miroir. Un raisonnement semblable à celui que nous avons fait pour les miroirs concaves (751) montre que le point F est également éloigné du centre C et du sommet O du miroir, pourvu que le rayon RI soit suffisamment voisin de l'axe. Donc, si l'ouverture du miroir est très petite, tout rayon parallèle à l'axe principal se réfléchit de manière que son prolongement géométrique passe par un point situé sur l'axe, sensiblement à égale distance du centre et du sommet du miroir. — Ce point F est le foyer principal du miroir; c'est un foyer virtuel.

**763. Foyers des points situés sur l'axe principal d'un miroir convexe.** — Si l'on considère un rayon PI (fig. 595), émané d'un point P situé sur l'axe principal, ce rayon doit se réfléchir suivant une direction IT qui fasse avec la normale un angle TIN plus grand que SIN : le prolongement géométrique du rayon réfléchi rencontrera donc l'axe principal en un point P' situé entre le foyer principal F et le sommet du miroir. — Désignons toujours par  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$  les angles IPO, IPO et ICO; par  $i$  et  $r$  les angles d'incidence et de réflexion. On a :

$i = \alpha + \gamma$ ,  $r = \beta - \gamma$ , en remarquant que l'angle de réflexion est égal à l'angle P'IC; et comme  $i = r$ , il vient

$$\beta - \alpha = 2\gamma.$$

Si nous supposons l'ouverture du miroir assez petite pour que l'on puisse considérer les angles  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , comme mesurés respectivement par  $\frac{IK}{PO}$ ,  $\frac{IK}{P'O}$  et  $\frac{IK}{CO}$ , la relation précédente devient, en supprimant le facteur commun IK :

$$\frac{1}{P'O} - \frac{1}{OP} = \frac{2}{CO}.$$

La position du point P' est donc indépendante de la position du point d'incidence I, pourvu que l'ouverture du miroir soit très petite. — Donc, tout point lumineux situé sur l'axe principal d'un miroir convexe a un foyer virtuel, situé derrière le miroir, entre le foyer principal et le sommet.

Inversement, si l'on fait tomber sur un miroir convexe des rayons convergents, tels que TI, dont les prolongements géométriques aillent rencontrer l'axe principal en un point P', situé entre le foyer principal F et le sommet O, les rayons réfléchis vont former un foyer réel P sur l'axe principal; les points P et P' doivent donc être considérés comme des foyers conjugués.

**764. Images produites par les miroirs sphériques convexes.**

— Si l'on continue à appliquer aux miroirs convexes les raisonnements qui ont été faits pour les miroirs concaves, on voit que tout point

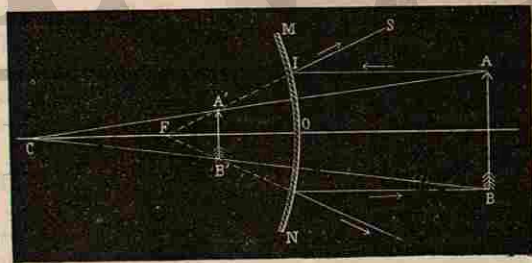


Fig. 596. — Image virtuelle, produite par un miroir sphérique convexe.

lumineux situé en dehors de l'axe principal a un foyer conjugué virtuel, situé sur son axe secondaire, c'est-à-dire sur la droite qui joint ce point lumineux au centre du miroir. Ce foyer conjugué peut donc être obtenu en construisant géométriquement un seul rayon réfléchi, et en déter-

minant le point où l'axe secondaire est coupé par ce rayon ou par son prolongement; c'est ce que nous allons montrer sur un exemple.

Soit AB (fig. 596) un objet rectiligne, placé devant un miroir convexe MN. Pour trouver le foyer conjugué du point A, on tracera l'axe secondaire AC, et un rayon AI parallèle à l'axe principal: ce rayon se réfléchit suivant une direction IS, telle que son prolongement géométrique passe au foyer principal virtuel F (762). Ce prolongement rencontre l'axe secondaire AC au point A', qui est l'image virtuelle du point A. On obtiendra de même l'image B' du point B: les autres points de la droite AB auront leurs images placées sur la droite A'B', entre A' et B'.

Cette construction montre qu'un miroir convexe donne toujours une image virtuelle, droite, et diminuée, d'un objet placé devant lui. — Il est d'ailleurs facile de voir que cette image est d'autant plus petite et d'autant plus rapprochée du foyer principal que l'objet est lui-même plus loin du miroir (\*).

765. **Détermination expérimentale de la distance focale principale d'un miroir sphérique.** — 1° *Miroir concave.* — On obtient immédiatement la distance focale principale d'un miroir sphérique concave, en orientant ce miroir de façon que son axe principal soit dirigé vers un point lumineux très éloigné, vers le centre du soleil, par exemple. On cherche, à l'aide d'un petit écran, l'endroit où l'image se forme avec le plus de netteté; on obtient ainsi le foyer principal, dont il ne reste plus qu'à mesurer la distance au sommet du miroir. —

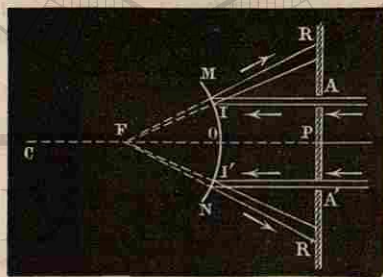


Fig. 597.

Le double de la distance focale ainsi trouvée est le rayon du miroir.

2° *Miroir convexe.* — On dirige encore l'axe principal du miroir vers le soleil, et l'on place, en avant de la surface réfléchissante MN (fig. 597), un écran perpendiculaire à l'axe et percé de deux ouvertures A, A'. Ces deux ouvertures laissent passer deux faisceaux de rayons solaires AI, A'I', qui tombent sur le miroir et produisent deux faisceaux réfléchis IR, I'R': on obtient ainsi sur l'écran deux surfaces éclairées R, R', et l'on approche ou l'on écarte l'écran du miroir, jusqu'à ce que la distance de ces petites surfaces soit double de celle des ouvertures A, A'. Lorsque ce résultat est atteint, les prolongements des

(\*) En désignant, comme on l'a fait pour les miroirs concaves, par  $p$  et  $p'$  les dis-

rayons réfléchis allant toujours passer par le foyer principal virtuel F, on a sensiblement  $FP = 2FO$ . Par suite, il suffit de mesurer la distance du miroir à l'écran, pour avoir la distance focale principale. — Le rayon du miroir est le double de cette distance.

tances  $OP$  et  $OP'$  (fig. 595) du miroir à un point et à son image, et par  $R$  le rayon de courbure du miroir, la relation  $\frac{1}{FO} - \frac{1}{OP} = \frac{2}{CO}$  donne  $\frac{1}{p'} - \frac{1}{p} = \frac{2}{R}$ .

Si l'on fait  $p = \infty$ , on trouve  $p' = \frac{R}{2}$ ; en désignant par  $f$  la distance focale principale,  $f = \frac{R}{2}$ , la relation précédente devient :

$$(1) \quad \frac{1}{p'} - \frac{1}{p} = \frac{1}{f}$$

On a d'ailleurs toujours, entre la grandeur de l'image et celle de l'objet, la relation :

$$(2) \quad \frac{i}{o} = \sqrt{\frac{p'^2}{p^2}}$$

La discussion de ces expressions fournira tous les rapports de grandeur et de position de l'image et de l'objet.

### CHAPITRE III

#### REFRACTION DE LA LUMIÈRE

##### L — PRINCIPES GÉNÉRAUX

**766. Lois de la réfraction.** — On appelle *réfraction*, la déviation que subissent les rayons lumineux lorsque, rencontrant obliquement la surface de séparation de deux milieux transparents, ils passent de l'un de ces milieux dans l'autre. — Ainsi, lorsqu'un rayon lumineux  $SI$  (fig. 598) rencontre obliquement la surface d'une nappe d'eau  $AB$ , ce rayon, au lieu de suivre sa direction primitive  $IS'$ , prend une direction différente  $IR$ .

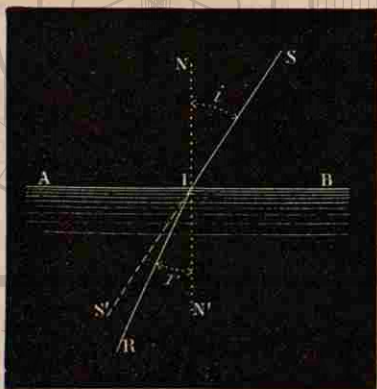


Fig. 598.

On nomme *plan d'incidence*, le plan mené par le rayon incident  $SI$  et la normale  $IN$ ; — *angle d'incidence*, l'angle  $i$  que forme le rayon incident avec la normale; — *angle de réfraction* l'angle  $r$  que forme le rayon réfracté avec la normale. — Lorsque l'angle de réfraction est *plus petit* que l'angle d'incidence, on dit que le second milieu est *plus réfringent* que le premier; dans le cas contraire, on dit qu'il est *moins réfringent*. — En général, de deux corps transparents, le *plus dense* est aussi le *plus réfringent*; cette règle offre cependant quelques exceptions.

La réfraction est soumise aux deux lois suivantes, connues sous le nom de lois de Descartes :

1° Le rayon réfracté reste dans le plan d'incidence.

2° Le rapport du sinus de l'angle d'incidence au sinus de l'angle de réfraction est constant pour les mêmes milieux, quelle que soit la valeur de l'angle d'incidence.

Pour vérifier ces lois on peut employer l'appareil de Silbermann, déjà décrit (737), en y adaptant, au lieu du miroir  $A$ , une auge cylindrique, limitée par deux plans de verre (fig. 599); on verse de l'eau jusqu'à la hauteur du centre  $C$  du cercle, et, au moyen du petit miroir  $m$ , on fait arriver un faisceau de lumière solaire qui, passant par l'ouverture  $i$ , vient tomber à la surface de l'eau en  $C$ . — Nous ferons remarquer que le faisceau lumineux, après s'être réfracté en pénétrant de l'air dans l'eau, se propage dans l'eau suivant un rayon du cercle; dès lors, il se présente, pour sortir de l'eau, suivant un angle d'incidence nul: il ne subit donc pas de nouvelle déviation à l'émergence. L'appareil permet donc d'étudier la déviation produite uniquement par le premier passage, de l'air dans l'eau.

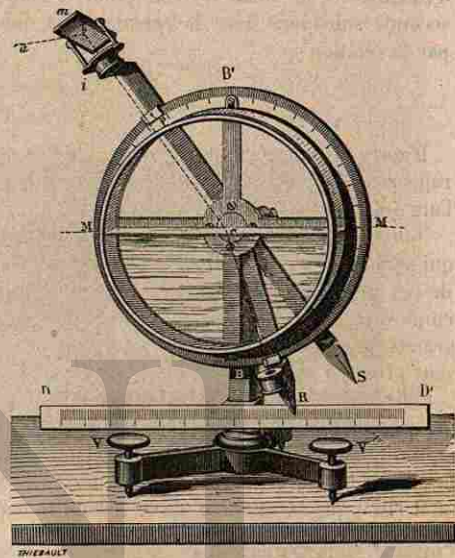


Fig. 599. — Appareil de Silbermann, pour les lois de la réfraction.

On constate, d'abord qu'il est toujours possible de donner à l'alidade  $R$  une position telle, que le faisceau réfracté vienne passer par l'ouverture  $i$ ; ce faisceau reste donc dans le plan d'incidence, qui est parallèle au plan du cercle. — Pour mesurer les sinus des angles d'incidence et de réfraction, on fait mouvoir la règle horizontale  $DD'$  le long du support vertical de l'appareil, de façon qu'elle vienne toucher l'extrémité  $S$  de l'alidade qui porte l'ouverture  $i$ : la longueur comptée sur cette règle, entre  $S$  et le diamètre vertical  $BB'$ , mesure le sinus de l'angle  $SCB$ , dans le cercle de rayon  $CS$ ; c'est le *sinus de l'angle d'incidence*, puisque l'angle  $SCB$  est égal à  $iCB'$ , comme opposé par le sommet. On amène ensuite la règle en contact avec l'extrémité  $R$  de l'autre alidade, dont la longueur  $CR$  est égale à  $CS$ , et l'on mesure ainsi le sinus de l'angle de réfraction. On trouve que le rapport de ces deux

sinus est sensiblement  $\frac{1}{2}$ . — On répète l'expérience en donnant une autre valeur à l'angle d'incidence : on constate que le rapport des deux sinus reste toujours égal à  $\frac{1}{2}$ .

767. **Indices de réfraction.** — On appelle *indice de réfraction* d'une substance, par rapport à une autre, le rapport constant  $n$  du sinus d'incidence  $i$  au sinus de réfraction  $r$ , pour un rayon passant de la seconde substance dans la première. La quantité  $n$  est donc définie par la relation

$$\frac{\sin i}{\sin r} = n.$$

D'après l'expérience qui précède, l'indice de réfraction de l'eau par rapport à l'air est  $\frac{1}{2}$ . — Pour le verre ordinaire, l'indice par rapport à l'air est environ  $\frac{3}{2}$ , etc.

Nous indiquerons plus loin (783) le principe de l'une des méthodes qui servent à la détermination des indices de réfraction, et les valeurs de ces indices pour les corps solides ou liquides le plus fréquemment employés. — Ces indices sont tous représentés par des nombres plus grands que l'unité; c'est-à-dire que tous les corps solides ou liquides sont plus réfringents que l'air (\*).

Enfin, quand on connaîtra l'indice de réfraction  $n$  relatif au passage de la lumière de l'air dans une substance déterminée, on connaîtra, sans nouvelle expérience, l'indice de réfraction  $n'$  pour le passage de la lumière de cette même substance dans l'air. Nous verrons bientôt en effet (769) que la valeur  $n'$  de ce second indice s'obtiendra en prenant l'inverse  $\frac{1}{n}$  du premier.

768. **Construction géométrique d'Huyghens.** — La théorie des ondulations a conduit Huyghens à la construction géométrique suivante, qui donne la direction du rayon réfracté, quand on connaît l'indice de réfraction  $n$  du second milieu par rapport au premier.

Soit AB (fig. 600) la surface de séparation, que nous supposons plane; soient SI le rayon incident, et NV la normale. Prenons une unité de longueur quelconque et, du point I comme centre, décrivons, dans le plan d'incidence et à l'intérieur du second milieu : 1° une demi-circonférence C, avec un rayon égal à 1; 2° une demi-circonférence D, avec un rayon égal à  $\frac{1}{n}$ . Par le point S', où le prolongement de SI rencontre la première, menons une tangente S'T; par le point M, où cette droite rencontre la surface de séparation AB, menons une tangente à

(\*) Lorsqu'on répète ces mêmes déterminations en faisant en sorte que la lumière passe, non plus de l'air dans l'eau ou dans le verre, mais du vide dans ces mêmes milieux, on trouve des nombres qui diffèrent peu des précédents, et qu'on peut appeler indices de réfraction par rapport au vide, ou *indices absolus*.

la seconde, soit R le point de contact, et joignons IR : la droite IR représentera la direction du rayon réfracté. — En effet, si l'on désigne par  $r$  l'angle NIR, on a  $ITS' = i$ ,  $ITR = r$ , et les deux triangles TIS', TIR donnent

$$TI = \frac{1}{\sin i} = \frac{\left(\frac{1}{n}\right)}{\sin r}; \quad \text{d'où l'on tire} \quad \sin r = \frac{\sin i}{n};$$

l'angle  $r$ , déterminé par cette construction, est donc bien l'angle de réfraction, et la direction IR est bien celle du rayon réfracté.

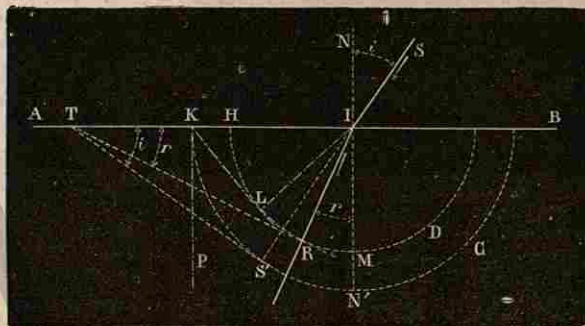


Fig. 600. — Construction d'Huyghens.

Cette construction d'Huyghens montre immédiatement comment varie l'angle S'IR, qui représente la *dévi*ation du rayon réfracté, quand on fait varier l'angle d'incidence  $i$ . — En effet, si l'on fait varier  $i$  de zéro à  $90^\circ$ , le point S' se déplace, sur l'arc NK, depuis N jusqu'à K; par suite, le point R se déplace, sur l'arc MH, depuis M jusqu'au point de contact L de la tangente KL; donc l'angle de réfraction  $r$  varie de zéro jusqu'à la valeur IKL. (On voit que cet angle, que nous appellerons l'angle limite, a pour sinus  $\frac{1}{n}$ ). — Or l'angle de *dévi*ation S'IR, ou  $(i - r)$ , pour une valeur quelconque de  $i$ , est toujours égal à l'angle S'TR des deux tangentes : quand le sommet T de cet angle se déplace sur IA, depuis l'infini jusqu'au point K, cet angle va constamment en croissant depuis zéro jusqu'à la valeur LKP. Donc, quand l'angle d'incidence augmente, la *dévi*ation va constamment en croissant, depuis zéro jusqu'à une valeur déterminée. (On voit que cette valeur limite LKP de l'angle de *dévi*ation a son sinus égal à  $\cos IKL$ , ou à  $\sqrt{1 - \frac{1}{n^2}}$ ).

769. **Réfraction par une lame à faces parallèles.** — **Principe du retour inverse des rayons.** — Lorsqu'on place une lame

de verre à faces parallèles entre l'œil et un objet éloigné, comme une étoile, l'observation montre que la direction dans laquelle on voit cet objet n'est pas changée. Il en résulte que chaque rayon émergent IS' (fig. 601) est parallèle au rayon incident SI dont il provient (\*). — Dès lors, l'angle d'émergence NIS est égal à l'angle d'incidence NIS : soit  $i$  la valeur commune de ces deux angles. Soit  $r$  la valeur commune des angles PII' et P'I, égaux comme alternes-internes. Soient  $n$  l'indice de réfraction du verre par rapport à l'air, et  $n'$  l'indice de l'air par rapport au verre. Le passage de l'air dans le verre, en I, donne

$$\sin i = n \sin r;$$

le passage du verre dans l'air, en I', donne

$$\sin r = n' \sin i.$$

De ces deux équations, on tire

$$n' = \frac{1}{n},$$

c'est-à-dire que l'indice de l'air par rapport au verre est l'inverse de l'indice du verre par rapport à l'air.

Il résulte de là que, si un rayon, passant de l'air dans le verre, se réfracte suivant une certaine direction, un rayon qui suivrait cette même direction en sens inverse se réfractera, en passant du verre dans l'air, suivant la direction du rayon incident primitif. — Ce résultat n'est qu'un cas particulier du principe qui est connu sous le nom de *retour inverse des rayons lumineux*. Ce principe peut s'énoncer de la manière suivante : En général, si, en traversant des milieux déterminés, un rayon lumineux suit une certaine route, un rayon se propageant en sens inverse suit la même route que le premier.

(\*) C'est ce qu'on peut vérifier encore, d'une manière grossière, en faisant passer, dans une chambre obscure, un faisceau de lumière solaire au travers d'une lame à faces parallèles, et comparant la direction du faisceau émergent à la direction du faisceau incident.

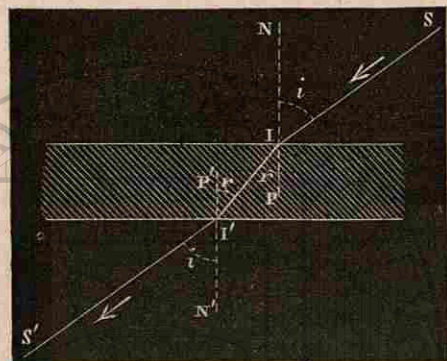


Fig. 601. — Réfraction par une lame à faces parallèles.

770. **Cas où la lumière passe d'un milieu dans un autre milieu plus réfringent.** — Lorsque des rayons lumineux se présentent pour passer d'un milieu dans un autre milieu plus réfringent, par exemple de l'air dans un corps solide ou liquide, l'expérience montre qu'il y a toujours des rayons transmis, quel que soit l'angle d'incidence. — La loi de Descartes permet d'ailleurs toujours de déterminer la direction des rayons réfractés.

Soit, par exemple, un rayon lumineux NI (fig. 602), tombant sur la surface de l'eau dans la direction même de la normale. On a, pour ce rayon,  $i=0$ ; par suite,  $r=0$ , c'est-à-dire que le rayon pénètre dans l'eau sans déviation, suivant IN. — Pour un rayon quelconque SI, tombant au même point I, la direction du rayon réfracté IR est donnée par la loi de Descartes. A mesure que l'angle d'incidence SIN augmente, l'angle de déviation va en augmentant : c'est ce qu'il est facile de vérifier en calculant la valeur de cet angle, et c'est ce que montre d'ailleurs la construction d'Huyghens (768). Enfin, pour un rayon qui tomberait au point I dans une direction rasante BI, on aurait  $i=90^\circ$ , c'est-à-dire  $\sin i=1$ ; par suite,  $\sin r = \frac{1}{n}$  ou, dans le cas actuel,  $\sin r = \frac{5}{4}$ , ce qui donne pour la valeur de  $r$  environ 48 degrés. On obtient ainsi la direction du rayon réfracté IT, correspondant au rayon incident BI, et la déviation est représentée par AIT.

Dès lors, pour tous les rayons incidents qui tombent sur la surface de l'eau au point I, de toute la région située au-dessus de cette surface, les rayons réfractés sont compris à l'intérieur du cône TIT', qu'on obtiendrait en faisant tourner l'angle TIN' autour de la normale IN'. — Nous venons de voir que, pour l'eau, la valeur de cet angle est d'environ 48 degrés. Pour une substance quelconque, c'est toujours l'angle dont le sinus est égal à  $\frac{1}{n}$ .

Mais il est essentiel de remarquer que les divers rayons réfractés ne conservent pas, en égale proportion, l'intensité lumineuse des rayons incidents. — En effet, nous avons vu (744) que, quand un rayon lu-

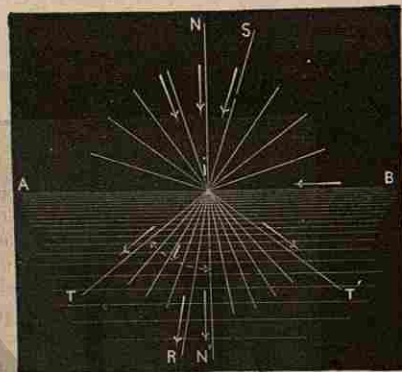


Fig. 602. — Passage de la lumière, de l'air dans l'eau.

mineux tombe sur la surface d'un corps transparent, la proportion de lumière réfléchie augmente avec l'angle d'incidence. Par suite, la proportion de lumière réfractée diminue à mesure que l'angle d'incidence augmente. En d'autres termes, l'intensité lumineuse du rayon réfracté  $IN'$  (fig. 602) est presque égale à celle du rayon incident  $NI$ , tandis que l'intensité des rayons réfractés voisins de  $IT$  est presque nulle.

**771. Cas inverse. — Angle limite. — Réflexion totale.** — Considérons maintenant le cas inverse, où des rayons se présentent pour passer d'un milieu dans un autre milieu moins réfringent. — Nous allons voir que, dans certains cas, ce passage devient impossible.

Soit un point lumineux  $O$  (fig. 603), situé dans l'eau et émettant des

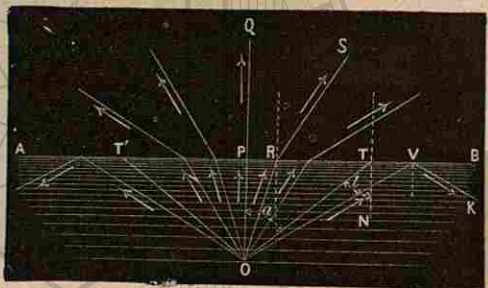


Fig. 603. — Passage de l'eau dans l'air. — Angle limite. — Réflexion totale.

rayons vers sa surface, — Le rayon  $OP$ , qui tombe dans une direction normale à la surface de l'eau, sort sans déviation, suivant  $PQ$ , et son intensité lumineuse est sensiblement égale à celle du rayon incident. — Un rayon  $OR$ , qui tombe sur la surface de l'eau suivant un angle d'incidence assez petit, sort de l'eau en s'écartant de la normale. Si l'on désigne toujours par  $n$  l'indice de réfraction de l'eau par rapport à l'air, l'indice de l'air par rapport à l'eau est  $\frac{1}{n}$ , et la direction  $RS$  du

rayon réfracté est donnée par la relation  $\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{1}{n}$ , ou  $\sin r = n \sin i$ .

L'intensité lumineuse de ce rayon  $RS$  est moindre que celle du rayon incident  $OR$ , une portion de la lumière incidente étant réfléchie vers la partie inférieure. — Si maintenant on considère des rayons incidents qui s'écartent de plus en plus de la direction  $OP$ , la relation  $\sin r = n \sin i$  ne peut fournir de valeur réelle pour  $r$  que si la valeur de  $\sin i$  n'est pas supérieure à  $\frac{1}{n}$ , ou dans le cas actuel, si l'angle d'incidence  $i$  n'est pas supérieur à 48 degrés. Désignons en général par  $l$ , pour une sub-

stance quelconque, l'angle dont le sinus est égal à  $\frac{1}{n}$ ; la réfraction ne sera possible que pour les rayons dont l'angle d'incidence sera inférieur à cet angle limite.

L'expérience montre, en effet, que, pour des rayons s'écartant de plus en plus de la direction  $OP$ , la déviation devient de plus en plus grande, jusqu'à ce qu'on arrive à un rayon incident  $OT$  dont l'angle d'incidence est égal à  $l$ , et qui sort de l'eau en rasant la surface, suivant  $TB$  (la relation précédente donne, pour ce rayon,  $\sin r = 1$ , ou  $r = 90^\circ$ ). L'intensité lumineuse de ce rayon émergent  $TB$  est d'ailleurs presque nulle, la plus grande partie de la lumière étant réfléchie. — Enfin, pour tout rayon incident  $OV$  tombant sous une incidence plus grande, il y a réflexion totale, c'est-à-dire que toute la lumière du rayon incident se retrouve dans le rayon réfléchi  $VK$ , et aucune partie de cette lumière ne sort du liquide.

Il en est ainsi pour tous les rayons émis par le point  $O$  en dehors du cône que l'on obtiendra en faisant tourner l'angle  $TOP$  autour de la normale  $OP$ . Cet angle  $TOP$ , ou  $a$ , est égal à l'angle d'incidence  $OTN$  ou  $l$ , puisque ces deux angles sont alternes-internes, par rapport aux parallèles  $OP$  et  $TN$  coupées par la sécante  $OT$ .

**772. Expérience fondée sur la réflexion totale.** — Mettons de l'eau dans un vase de verre (fig. 604) et faisons flotter sur cette eau un disque de liège circulaire  $TT'$ , d'environ 3 centimètres de rayon, au-dessous duquel nous aurons adapté une épingle  $A$ , perpendiculaire à sa surface, et ayant une longueur d'environ 2 centimètres. En raison de ces dimensions, tout rayon lumineux émis par un point quelconque de l'épingle, et venant rencontrer la surface de l'eau en dehors du disque, fait avec la normale au point d'incidence un angle plus grand

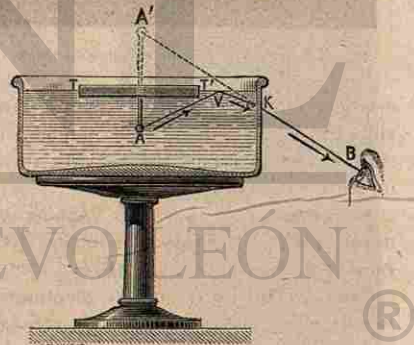


Fig. 604. — Expérience de la réflexion totale.

que l'angle limite, et éprouve, par suite, la réflexion totale. — On constate en effet que, quel que soit le point où l'on place l'œil au-dessus de la surface de l'eau, il est impossible d'apercevoir l'épingle. Au contraire, en plaçant l'œil en  $B$ , au-dessous de cette surface, on aperçoit une image de l'épingle, par réflexion. Cette image est seulement un peu allongée, en raison de la petite déviation qu'éprouvent les rayons lumineux en sortant de l'eau, en  $K$ , comme le montre la figure.

775. **Prismes à réflexion totale.** — C'est par ces mêmes principes que s'explique l'emploi des prismes dits à réflexion totale.

Les indices des diverses espèces de verre ayant toujours une valeur voisine de 1,5, l'angle limite est toujours voisin de  $41^\circ$ . Dès lors, soit

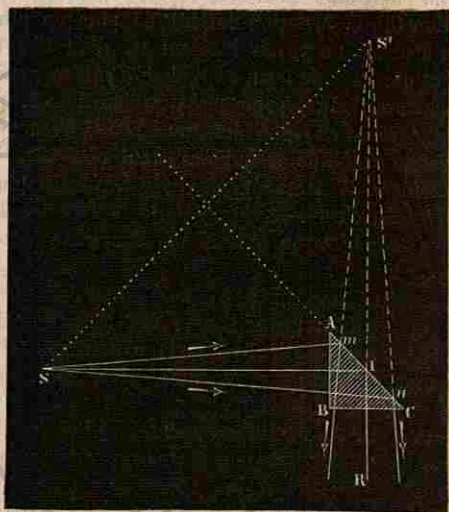


Fig. 605. — Prisme à réflexion totale.

un prisme triangulaire de verre, à base rectangle et isocèle ABC (fig. 605); soit S un point lumineux, situé à une distance telle que tous les rayons émis par ce point sur l'une des faces AB de l'angle droit s'écartent peu de la direction normale à cette face. Le rayon normal SI pénètre sans déviation par la face AB; il éprouve la réflexion totale sur la face hypoténuse AC, qu'il rencontre sous un angle de  $45^\circ$ ; enfin, il sort normalement à la face BC, suivant IR. — Quant aux rayons voisins Sm, Sn, qui sont émis par le même point S, ils tombent toujours sur la face hypoténuse sous un angle voisin de  $45^\circ$ ; ils se comportent donc de la même manière (\*).

Le prisme agit donc, par rapport à tous ces rayons, comme un miroir plan : il donne une image virtuelle S', symétrique de S par rapport au plan de la face AB.

Dans certains instruments d'optique, lorsqu'un faisceau formé de rayons à peu près parallèles doit être réfléchi dans une direction perpendiculaire à sa direction primitive, il est avantageux d'employer un prisme à réflexion totale, plutôt qu'un miroir métallique dont la surface éprouve, avec le temps, une altération toujours assez rapide.

774. **Déplacement apparent des objets vus dans l'eau.** — Lorsque l'œil est placé au-dessus de la surface d'une eau tranquille, dans une position qui lui permette de recevoir des rayons lumineux

(\*) Pour construire la direction des rayons émergents qui correspondent à Sm et Sn, on peut ne pas tenir compte des deux déviations produites par les faces AB et BC, ces deux déviations étant toujours égales et de sens contraires.

émis par des points placés dans l'eau, il voit en général ces points, non pas dans leur position réelle, mais dans une position plus voisine de la surface libre du liquide.

Mettons, par exemple, une pièce de monnaie m sur le fond d'un vase à parois opaques V (fig. 606); le vase étant d'abord vide, plaçons notre œil en un point O, tel qu'il aperçoive la pièce à moitié cachée par le

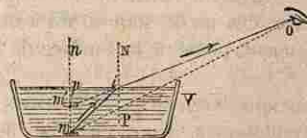


Fig. 606. — Déplacement apparent des objets vus dans l'eau.

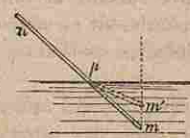


Fig. 607. — Apparence brisée d'un bâton pénétrant dans l'eau.

bord du vase. Lorsqu'on viendra à verser de l'eau dans le vase, la pièce de monnaie deviendra visible tout entière : elle paraîtra relevée, ainsi que le fond du vase qui la supporte. — Dans cette expérience, en effet, les rayons qui parviennent à l'œil ne lui arrivent plus en ligne droite, suivant mO. L'œil reçoit des rayons, tels que mi, qui ont éprouvé en i une réfraction les écartant de la normale : il voit alors la pièce en un point m' du prolongement de Oi, c'est-à-dire qu'il la voit relevée vers la surface de l'eau (\*).

De même un bâton mn (fig. 607), en partie plongé dans l'eau, paraît brisé au point p, où il pénètre dans le liquide : la partie plongée pm apparaît en pm', c'est-à-dire relevée vers la surface.

775. **Influence des réfractions produites par l'atmosphère, dans l'observation des astres.** — Les rayons émis par les astres éprouvent, en traversant les couches de notre atmosphère, dont les densités sont progressivement croissantes, des réfractions qui nous font voir ces astres dans des positions plus voisines de notre zénith qu'ils ne le sont en réalité. En effet, en supposant ces couches limitées par des surfaces sphériques dont le centre

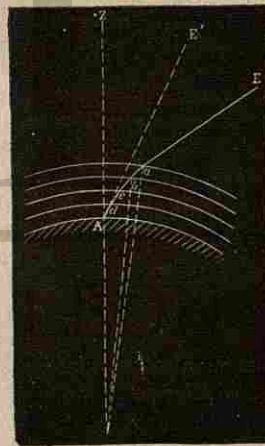


Fig. 608. Réfractions atmosphériques.

(\*) Si les rayons émergents qui parviennent à l'œil ne sont pas trop inclinés sur la surface du liquide, ce point m' est celui où le prolongement de Oi rencontre le rayon lumineux mp qui tombe normalement à la surface, rayon qui sort sans déviation.



est celui de notre globe, un rayon lumineux  $Ea$  (fig. 608), à chacun de ses passages  $a, b, c$ , se rapproche de la normale au point d'incidence, c'est-à-dire de la verticale en ce point. Ces déviations successives lui font donc décrire une courbe, dont la convexité est toujours tournée vers le zénith  $Z$  du point d'arrivée  $A$ . Un observateur placé en  $A$  voit l'astre dans la direction du dernier élément de la courbe, c'est-à-dire suivant la tangente  $AE'$ . — Ainsi, le Soleil ou les astres nous apparaissent *au-dessus de l'horizon*, dès qu'ils sont situés à une petite distance *au-dessous du plan tangent* mené à la surface de la Terre.

On a construit des *tables de réfraction* qui donnent les corrections à effectuer, dans les observations astronomiques, pour chacune des valeurs de la hauteur *apparente* de l'astre au-dessus de l'horizon (\*).

## II. — RÉFRACTION AU TRAVERS DES PRISMES.

**776. Définitions.** — On désigne, en Optique, sous le nom de *prisme*, un milieu transparent, limité par deux faces planes faisant entre elles un certain angle. — On appelle *angle réfringent* l'angle dièdre formé par ces deux faces. — On comprend sous le nom de *base du prisme*, la région opposée à l'arête de cet angle. — Dans les prismes de verre qui servent aux expériences d'optique, comme le prisme  $P$  (fig. 609), la base est limitée par un plan parallèle à l'arête réfringente. La masse de verre présente alors la forme du solide que l'on désigne, en géométrie, sous le nom de *prisme triangulaire*.

On appelle *section principale* d'un prisme, toute section faite perpendiculairement à l'arête réfringente : c'est ce qu'on désigne, en géométrie, sous le nom de *section droite*. — Dans ce qui va suivre, nous supposons que les rayons incidents sont dans le plan d'une *section principale*.



Fig. 609. — Prisme.

(\*) Ces tables ne s'appliquent pas aux cas où l'on observe des astres très voisins de l'horizon. Les rayons traversant alors des couches d'air dont les densités sont influencées, de manières très diverses, par le voisinage du sol, on ne peut exprimer la déviation par une loi. Il arrive même que la trajectoire du rayon lumineux ne reste pas dans un même plan vertical. — Le phénomène connu sous le nom de *mirage latéral* n'est qu'un cas particulier de ce genre d'effets, quand on observe des objets terrestres *voisins de l'horizon*. — Enfin le phénomène célèbre du *mirage* des plaines sablonneuses d'Égypte est encore un phénomène qui se rattache à ces réfractions anormales, mais dont l'interprétation exacte, donnée par Bravais, repose sur les théories de l'Optique supérieure.

**777. Action d'un prisme sur un faisceau de lumière parallèle.** — Lorsqu'on introduit un faisceau de rayons solaires par une petite ouverture pratiquée dans le volet d'une chambre obscure, et qu'on le reçoit sur un prisme placé de manière que l'axe du faisceau lumineux soit dans le plan d'une section principale, on observe que les rayons émergents sont *déviés* vers la base du prisme. — En outre, si l'on reçoit le faisceau émergent sur un écran, on obtient une image *allongée*, et *colorée* des couleurs de l'arc-en-ciel.

De ces divers effets, nous allons étudier d'abord exclusivement le premier, la *déviation* : les autres seront étudiés plus loin.

**778. Déviation produite par un prisme.** — Soit  $A$  (fig. 610) une *section principale* d'un prisme. Soit  $SI$  un rayon incident : ce rayon pénètre dans le prisme en restant dans le plan de la figure, et en se rapprochant de la normale, suivant  $II'$ . En arrivant en  $I'$ , le rayon éprouve, en général, une nouvelle réfraction (\*); il s'écarte de la normale, et sort du prisme en restant dans le plan de la figure, dans une direction telle que  $I'S'$ . Ces deux réfractions, en  $I$  et  $I'$ , ont donc, l'une et l'autre, pour effet de dévier le rayon *vers la base du prisme*. — On appelle *angle de déviation*, l'angle  $D$  que forme le rayon émergent  $I'S'$  avec le prolongement du rayon incident  $SI$ .

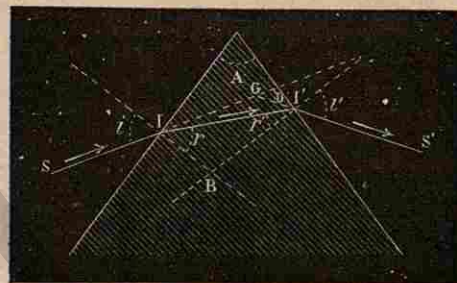


Fig. 610. — Déviation produite par un prisme.

(\*) Lorsqu'un rayon lumineux, arrivé à la seconde face du prisme, fait avec la normale à cette face un angle supérieur à l'angle limite (774), il éprouve la réflexion totale et se trouve rejeté vers l'intérieur du prisme, sans pouvoir émerger. — Soit  $RI$  (fig. 611) un rayon incident, qui se réfracte suivant  $II'$ ; pour que ce rayon puisse émerger en  $I'$ , il suffit qu'il fasse, avec la normale  $I'n$  en ce point, un angle inférieur à l'angle limite. Abaissons du point  $I$  une droite  $ID$  perpendiculaire sur  $AC$ , et décrivons autour de cette droite un cône  $EIE'$  dont l'angle générateur  $EID$  soit égal à l'angle limite : si le rayon  $II'$  qui traverse le prisme est compris dans ce cône, l'angle  $II'n$  étant plus petit que  $EID$ , ce rayon peut émerger. Au contraire, s'il était extérieur au cône  $EIE'$ , il éprouverait la réflexion totale.

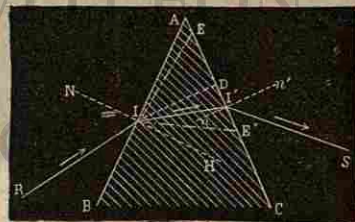


Fig. 611

779. **Équations du prisme.** — L'angle de déviation  $D$  est, dans le triangle  $GII'$ , l'angle extérieur au sommet  $G$ ; il est donc égal à la somme des deux angles  $GII'$  et  $GII$  (fig. 610). Si nous désignons par  $i$  l'angle d'incidence, et par  $r$  l'angle de réfraction au point  $I$ ; par  $r'$ , l'angle que fait le rayon  $II'$  avec la normale au point  $I'$ , et par  $i'$  l'angle d'émergence, on voit que l'on a  $GII' = i - r$ , et  $GII = i' - r'$ ; et par suite :

$$(1) \quad D = i + i' - (r + r').$$

Dans le triangle  $IBH'$ , l'angle  $B$  est le supplément de la somme  $r + r'$ ; cet angle est aussi le supplément de l'angle  $A$ , puisque ses deux côtés sont respectivement perpendiculaires aux deux côtés de l'angle  $A$ ; on a donc

$$(2) \quad r + r' = A.$$

Enfin, d'après les lois de la réfraction, on a

$$(3) \quad \sin i = n \sin r,$$

$$(4) \quad \sin i' = n \sin r'.$$

Ces quatre équations sont les *équations du prisme*.

Le prisme étant donné par son indice de réfraction  $n$  et par son angle  $A$ , et la direction du rayon incident  $SI$  étant déterminée par l'angle  $i$ , l'équation (3) fera connaître la valeur de  $r$ ; en portant cette valeur dans l'équation (2), on déterminera l'angle  $r'$ ; l'équation (4) fera ensuite connaître  $i'$ ; enfin, en portant dans l'équation (1) les valeurs de  $r$ ,  $r'$  et  $i'$ , ainsi calculées successivement, on aura la valeur de la déviation  $D$ .

*Remarque.* — Si l'angle du prisme est *très petit*, et si l'angle d'incidence  $i$  n'est que d'un petit nombre de degrés, les angles  $r$ ,  $r'$  et  $i'$  seront du même ordre de grandeur; on pourra alors remplacer les équations (3) et (4) par les équations  $i = nr$ ,  $i' = nr'$ ; en portant ensuite ces valeurs de  $i$  et de  $i'$  dans l'équation (1), on aura, en tenant compte de l'équation (2),

$$D = (n - 1)A;$$

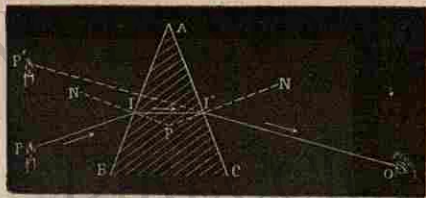


Fig. 612. — Déplacement apparent d'un objet vu au travers d'un prisme.

objet paraît déplacé *vers l'arête* du prisme: ce résultat s'explique immédiatement, d'après ce qui précède. — En effet, si le rayon  $PI$ , parti du point lumineux  $P$  (fig. 612), est réfracté de manière à suivre

relation dont nous ferons usage, quand nous étudierons les propriétés des *lentilles* (792).

780. **Déplacement apparent des objets vus au travers des prismes.** — Lorsqu'on regarde un objet au travers d'un prisme, cet

la route  $PI'O$ , l'œil placé en  $O$  voit ce point en  $P'$ , dans le prolongement de  $OP$ . — Les images ainsi observées sont d'ailleurs généralement confuses, et elles offrent des contours irisés, comme nous l'expliquerons plus loin.

781. **Influence de la nature du prisme et de la valeur de son angle réfringent sur la grandeur de la déviation.** — D'après la marche même de la lumière dans un prisme (778), il est évident que la grandeur de la déviation doit dépendre, d'une part, de la nature du prisme; d'autre part, de la valeur de l'angle réfringent. — C'est ce que nous allons vérifier par l'expérience.

1° Pour constater l'influence de la *nature* du prisme, on prend un *polyprisme* (fig. 615), formé de petits prismes égaux, de *différents verres*, ayant leurs arêtes en prolongement. Si, par une fente horizontale pratiquée dans le volet d'une chambre obscure, on fait arriver un faisceau de rayons solaires qui rencontre à la fois tous ces prismes, on obtient une série de petits faisceaux émergents, présentant autant de directions différentes que le polyprisme comprend de substances diverses.



Fig. 615. Polyprisme.

2° Pour constater l'influence de la valeur de l'angle réfringent, on fait usage du *prisme à angle variable* (fig. 614), c'est une auge formée par deux plaques métalliques fixes, entre lesquelles peuvent se mouvoir, autour de deux charnières, deux cadres formés par des glaces de verre. Si l'on verse de l'eau dans cette auge, la masse liquide représente un prisme, dont l'arête réfringente serait déterminée par l'intersection des plans des deux glaces prolongées. — Or, si l'on fait tomber un faisceau lumineux sur ce prisme, et si, laissant immobile la face d'entrée, on incline de plus en plus la face de sortie, on observe une déviation d'autant plus grande qu'on a donné au prisme liquide un angle plus grand (\*).



Fig. 614. — Prisme à angle variable.

782. **Minimum de déviation.** — Lorsqu'un rayon tombe, sous une incidence déterminée  $i$ , sur un prisme dont on connaît l'angle  $A$  (fig. 610) et l'indice de réfraction  $n$ , la loi de Descartes permet de

(\*) En changeant progressivement l'inclinaison des faces, il est facile de réaliser également, avec cet appareil, les conditions nécessaires pour qu'il y ait *réflexion totale* sur la seconde face du prisme. (Voir la note de la page 685.)

déterminer les directions successives  $II'$ ,  $I'S'$ , que prend ce rayon : on arrive ainsi à une expression de la *dévi*ation produite par le prisme, c'est-à-dire de l'angle que forme le rayon émergent avec la direction primitive du rayon incident. — Si l'on considère  $i$  comme une variable, prenant successivement toutes les valeurs, depuis  $0^\circ$  jusqu'à  $90^\circ$ , le calcul montre que la déviation passe par un *minimum* : ce minimum correspond au cas où l'incidence est telle, que l'angle d'émergence  $i'$  soit égal à l'angle d'incidence  $i$ .

On peut vérifier ce résultat par l'expérience. — Si par une petite ouverture, pratiquée dans le volet d'une chambre obscure, on fait arriver un pinceau de lumière sur un prisme  $P$  (fig. 609), on voit, sur les deux faces du prisme, deux petites taches lumineuses qui correspondent aux deux points d'incidence et d'émergence, et qui sont produites par une diffusion partielle de la lumière sur les surfaces du verre. En faisant tourner le prisme  $P$ , au moyen du bouton  $b$ , autour d'un axe parallèle à son arête, de manière que l'angle d'incidence augmente d'une manière continue, et en recevant le faisceau émergent sur un écran, on constate que la déviation diminue d'abord, mais seulement jusqu'à un *minimum*, à partir duquel elle reprend des valeurs croissantes. — Lorsque le prisme est dans la position correspondante au minimum de déviation, on constate que les deux taches lumineuses sont à égale distance de l'arête du prisme. Il en faut conclure que le rayon intérieur  $II'$  (fig. 615) est alors perpendiculaire au plan bissecteur du dièdre  $A$ , que les angles  $r$  et  $r'$  sont égaux, et que par conséquent les angles  $i$  et  $i'$  sont égaux.

**785. Détermination des indices de réfraction.** — Nous pouvons maintenant, en considérant ce dernier résultat comme fourni par l'expérience, obtenir une relation simple, entre la valeur de la *dévi*ation *minimum*  $D$ , l'angle du prisme  $A$ , et son indice de réfraction  $n$ .

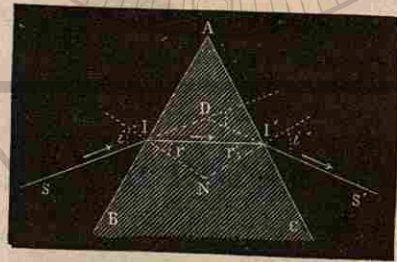


Fig. 615. — Minimum de déviation.

Dans le triangle  $NI'I'$  (fig. 615), la somme des angles  $r$  et  $r'$  est le supplément de l'angle  $N$ ; d'autre part, dans le quadrilatère  $AINI'$ , les angles en  $I$  et en  $I'$  étant droits, l'angle  $N$  est le supplément de  $A$  : donc  $r + r' = A$ , et comme  $r = r'$ , on a

$$r = \frac{A}{2}.$$

— Si nous considérons maintenant le triangle  $DI'I'$ , l'angle extérieur  $D$  est égal à la somme des deux angles intérieurs  $DI'I$  et  $DI'I'$  : chacun de ces deux angles a pour valeur  $i - r$ ; donc  $D = 2i - 2r$ . En remplaçant  $2r$  par  $A$ , il vient  $D = 2i - A$ , ou enfin

$$i = \frac{D + A}{2}.$$

En remplaçant  $r$  et  $i$  par ces valeurs dans la relation  $\frac{\sin i}{\sin r} = n$ , on obtient la relation cherchée

$$\frac{\sin \frac{D + A}{2}}{\sin \frac{A}{2}} = n.$$

Cette relation est celle dont on fait usage pour la détermination expérimentale des indices de réfraction des diverses substances. — Lorsqu'il s'agit d'un corps solide, on taille deux faces planes formant un angle réfringent, sur lequel on reçoit un faisceau de lumière parallèle : on cherche, par tâtonnements, quelle est la position pour laquelle on obtient la *dévi*ation *minimum*. Connaissant l'angle  $A$  des deux faces, il suffit de mesurer la déviation  $D$ , au moyen d'appareils spécialement construits pour cet usage; la relation précédente permet alors de calculer  $n$ . — Lorsqu'il s'agit d'un corps liquide, on le renferme dans un prisme creux, limité par des lames de verre à faces parallèles, qui n'ont pas d'influence sur la déviation.

Le tableau suivant donne les indices de quelques corps solides ou liquides, dont on a le plus souvent à faire usage :

| INDICES DE RÉFRACTION (*)                          |       |
|--|-------|
| Eau . . . . .                                      | 1,336 |
| ether . . . . .                                    | 1,538 |
| Alcool . . . . .                                   | 1,365 |
| Crown-glass (verre sans plomb) . . . . .           | 1,529 |
| Sel gemme . . . . .                                | 1,550 |
| Flint-glass, ou cristal (verre plombeux) . . . . . | 1,655 |
| Sulfure de carbone . . . . .                       | 1,678 |
| Diamant . . . . .                                  | 2,420 |

### III. — LENTILLES SPHÉRIQUES.

**784. Définitions.** — On nomme *lentilles sphériques*, des masses transparentes, généralement en verre, et limitées par deux surfaces sphé-

(\*) Les indices de réfraction varient, comme on le verra plus loin, avec la couleur de la lumière employée. Les nombres ci-dessus se rapportent à la lumière *jaune*

riques ou par une surface sphérique et une surface plane. Nous les distinguerons en deux groupes :

1<sup>o</sup> Les lentilles à *bords minces*, dont l'épaisseur est croissante depuis les bords jusqu'au milieu. Ces lentilles sont aussi désignées sous le nom de lentilles *convergentes*, qui indique, comme on le verra plus loin, leur propriété essentielle. — Elles comprennent trois variétés : la lentille *biconvexe* A (fig. 616), la lentille *plan-convexe* A', et le *ménisque convergent* A''.

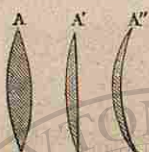


Fig. 616. — Lentilles convergentes.

2<sup>o</sup> Les lentilles à *bords épais*, dont l'épaisseur diminue depuis les bords jusqu'au milieu : on les désigne sous le nom de lentilles *divergentes*. — Ces lentilles comprennent encore trois variétés : la lentille *biconcave* B (fig. 617), la lentille *plan-concave* B', et le *ménisque divergent* B''.

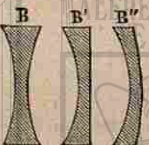


Fig. 617. — Lentilles divergentes.

On appelle *axe principal* d'une lentille, la droite qui passe par les centres des deux faces sphériques. Si l'une des deux faces est plane, l'*axe principal* est la perpendiculaire menée du centre de la face sphérique sur la face plane.

785. **Lentilles convergentes. — Foyer principal.** — Lorsqu'on prend une lentille à *bords minces*, et qu'on l'oriente de façon que son axe principal soit dirigé vers le Soleil, l'expérience montre que les rayons lumineux, tombant alors sur la lentille dans des directions parallèles à son axe principal, sont réfractés de manière à passer tous sensiblement par un même point F (fig. 618). — Ce point est le *foyer principal* de la lentille.

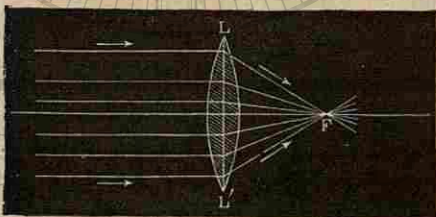


Fig. 618. — Foyer principal d'une lentille convergente.

Elle reste la même, que l'on reçoive les rayons lumineux d'un côté ou de l'autre de la lentille.

Il est facile de se rendre compte de cette action exercée, par une lentille à bords minces, sur les rayons qui la rencontrent parallèlement à son axe principal. — Soit LL' (fig. 619) la section d'une lentille biconvexe par un plan passant par son axe principal OO', et soit RI un rayon lumineux incident, parallèle à l'axe principal : ce rayon

La distance de ce point à la lentille est ce qu'on appelle la *distance focale principale*.

— Pour une lentille convergente quelconque, on peut déterminer cette distance en opérant comme nous venons de l'indiquer.

éprouve, en pénétrant dans le verre, une première réfraction suivant II', qui le rapproche de la normale menée au point d'incidence, c'est-à-dire du rayon de courbure OI. En sortant de la lentille, il éprouve

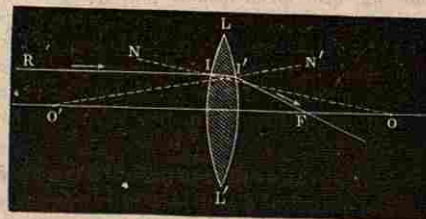


Fig. 619. — Convergence des rayons, produite par une lentille à bords minces.

une seconde réfraction et s'écarte de la normale en F c'est-à-dire du rayon de courbure O'N'. Ces deux réfractations successives ont pour effet, l'une et l'autre, de ramener le rayon lumineux vers l'axe principal, et comme le rayon incident était parallèle

à l'axe, le rayon émergent IF viendra nécessairement rencontrer cet axe en un certain point F, situé *au delà de la lentille* (\*). — Pour compléter cette explication, il resterait à montrer qu'un autre rayon incident quelconque, parallèle à l'axe principal, doit venir, après réfraction, passer *par le même point* F : nous nous contenterons, quant à présent, d'avoir constaté ce résultat par l'expérience.

C'est cette propriété, commune aux trois variétés de lentille A, A' et A'' (fig. 616), qui leur fait donner le nom de lentilles *convergentes*.

Dans la figure 618, pour simplifier le tracé, on a supposé que chaque rayon, au lieu d'éprouver deux déviations successives, l'une à l'entrée et l'autre à la sortie, n'en éprouve qu'une, au point où il rencontre le plan LL' mené par les bords de la lentille. C'est ce que nous ferons dans toutes les constructions du même genre.

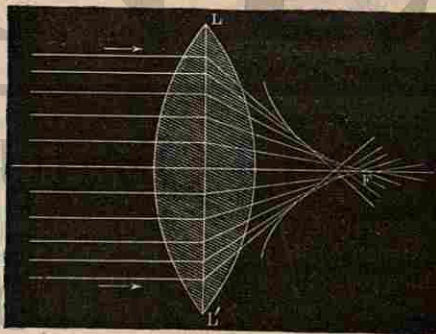


Fig. 620. — Aberration de sphéricité.

786. **Aberrations de sphéricité des lentilles. — Causatives par réfraction.** — Lorsque les ouvertures des faces d'une lentille ne sont pas négligeables, il se produit un phénomène

analogue à celui que nous avons signalé dans les miroirs sphériques (752), pour des rayons incidents parallèles à l'axe principal : les rayons réfractés

(\*) C'est, du reste, ce dont on peut encore se rendre compte, en observant que la lentille agit sur le rayon RI comme le ferait un prisme de verre dont les faces se con-

viennent rencontrer l'axe en des points d'autant plus voisins de la lentille, que l'incidence a lieu plus près du bord. Les intersections successives de ces rayons déterminent alors, dans le plan de la figure, une courbe lumineuse (fig. 620), qu'on nomme *caustique par réfraction*; dans l'espace, une surface lumineuse, dite *surface caustique*, qu'on peut regarder comme engendrée par la révolution de la courbe autour de l'axe principal.

Pour diminuer ces effets de l'*aberration de sphéricité*, dans les instruments d'optique, on masque les bords des lentilles au moyen de diaphragmes annulaires qui arrêtent les rayons trop voisins des bords.

**787. Foyers des divers points d'un objet.** — Plaçons maintenant, sur l'axe principal d'une lentille convergente, et à une distance plus grande que sa distance focale principale, une source lumineuse de petite dimension, comme la flamme d'une bougie P (fig. 621); puis,

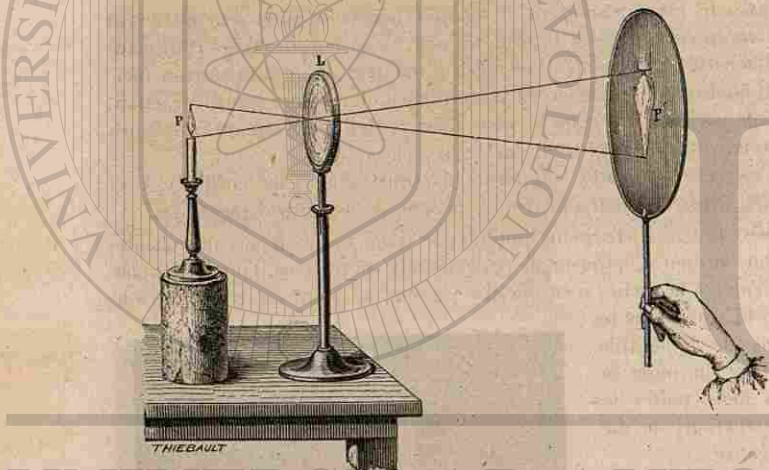


Fig. 621. — Image produite par une lentille convergente.

cherchons, comme nous l'avons fait dans les expériences sur les miroirs sphériques, quelle position il faut donner à un écran, au delà de la lentille, pour obtenir la plus grande concentration possible de lumière. — Nous trouverons que la région éclairée sur l'écran P' présente la forme d'une image de la bougie.

On peut donc considérer comme un résultat d'expérience que, à chaque point de l'objet lumineux, correspond un *foyer* par lequel viennent

fronderaient avec les plans tangents menés en I et en I'; la base de ce prisme se trouvant toujours, par suite de la forme même de la lentille, du côté de l'axe principal, le rayon est toujours dévié vers cette région (778).

passer tous les rayons lumineux émanés de ce point. — On verra d'ailleurs plus loin (791) comment on peut démontrer qu'il en est ainsi.

**788. Centre optique.** — **Rayons sans déviation.** — Dans un rayon lumineux qui traverse une lentille, on doit considérer, en général, trois directions successives différentes : la direction du rayon *incident*, celle du rayon *intérieur* à la lentille, et celle du rayon *émergent*. — Nous allons démontrer qu'il existe un point jouissant de cette propriété, que, si un rayon incident donne un rayon *intérieur* qui passe par ce point, le rayon émergent est parallèle au rayon incident. — Ce point prendra le nom de *centre optique* de la lentille.

Soient O et O' (fig. 622) les centres des faces d'une lentille, R et R' leurs rayons de courbure : nous allons démontrer d'abord que, si l'on mène à cette lentille deux plans tangents parallèles entre eux, la droite qui joint les deux points de contact rencontre l'axe principal en un point constant, quels que soient les deux plans considérés. — Soient mn et m'n' les traces de deux plans parallèles, tangents à la lentille en I et I' : menons la droite II' et soit C le point où elle rencontre l'axe OO'.

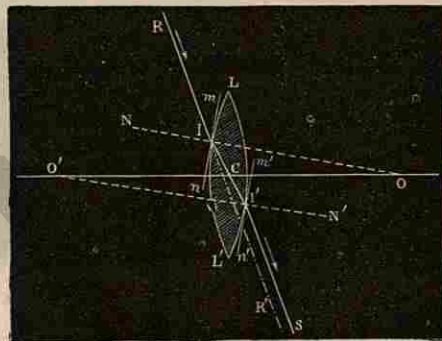


Fig. 622. — Centre optique.

Les normales OI et O'I' étant parallèles, les triangles semblables ICO et I'CO' donnent  $\frac{CO}{CO'} = \frac{OI}{O'I'}$ , ou  $\frac{CO}{CO'} = \frac{R}{R'}$ .

Donc la position du point C est indépendante de celle du point I, c'est-à-dire de la direction particulière des deux plans tangents considérés. — Il est aisé de voir que, réciproquement, si, par le point C ainsi déterminé, on mène une droite quelconque, et des plans tangents aux points I et I' où elle rencontre les deux faces, ces plans tangents seront toujours parallèles.

Or, ce point C jouit précisément de la propriété qui a été énoncée plus haut, comme caractérisant le *centre optique*. — En effet, soit un rayon lumineux RI, rencontrant la lentille sous une incidence telle que le rayon *intérieur* passe par le point C; les plans tangents menés au point d'incidence I et au point d'émergence I' étant parallèles entre

eux, tout se passe comme si ce rayon traversait une lame de verre à faces parallèles (769); par suite, le rayon émergent  $IS$  est *parallèle au rayon incident*  $RI$ ; c'est ce qu'on nomme un rayon *sans déviation*.

Si maintenant l'épaisseur de la lentille est négligeable, on pourra regarder le rayon émergent comme *se confondant* avec la direction  $IR'$  du rayon incident, et cette direction comme passant elle-même par le point  $C$ . — On est conduit ainsi à cet énoncé, dont nous ferons usage dans tout ce qui va suivre : *Dans toute lentille d'épaisseur négligeable, pour tout rayon incident dont la direction passe par le centre optique, le rayon émergent est dans le prolongement du rayon incident.*

**789. Axes secondaires. — Foyers conjugués sur un axe secondaire.** — Soit  $A$  (fig. 625) un point lumineux situé hors de l'axe

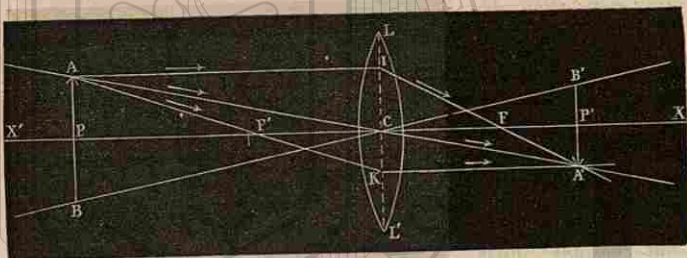


Fig. 625. — Construction géométrique du foyer d'un point lumineux.

principal d'une lentille, et à une petite distance de cet axe; la droite  $AC$ , qui joint ce point  $A$  au centre optique  $C$ , prend le nom d'*axe secondaire du point A*.

Un rayon lumineux dirigé suivant  $AC$  pourra être considéré comme continuant sa route en ligne droite (788), suivant  $CA'$ ; mais, d'autre part, nous avons admis, comme un résultat d'expérience, que tous les rayons émanés du point  $A$  et traversant la lentille vont passer par un même point (787): ce point se trouve donc sur la droite  $ACA'$ . — En d'autres termes, le *foyer conjugué d'un point situé hors de l'axe principal, à peu de distance de cet axe, se trouve sur l'axe secondaire de ce point*.

Cela posé, pour construire géométriquement la position du foyer conjugué de  $A$ , il suffira de tracer un seul rayon réfracté, et de déterminer son intersection avec l'axe secondaire. — Menons, par exemple, un rayon  $AI$  parallèle à l'axe principal (fig. 625); ce rayon se réfracte suivant la direction  $IF$  qui passe par le foyer principal  $F$ ; l'intersection de son prolongement avec l'axe secondaire détermine le point  $A'$ , foyer conjugué de  $A$ . — Il est quelquefois plus commode d'employer, au lieu du rayon pré-

cédent, un autre rayon. — Soit  $F'$  le foyer principal pour les rayons parallèles à l'axe qui tomberaient sur la face de droite; si l'on mène du point  $A$  un rayon incident  $AF'$  qui passe par ce point, ce rayon sortira de la lentille suivant une direction  $KA'$  parallèle à l'axe principal; l'intersection de  $KA'$  avec l'axe secondaire détermine encore le point  $A'$ , foyer conjugué de  $A$  (\*).

**790. Réfraction d'un faisceau lumineux, par une surface sphérique de faible ouverture.** — Pour établir une relation entre les distances de la lentille à deux points conjugués, nous considérerons d'abord la réfraction au travers d'une seule surface réfringente.

Soit  $MM'$  une surface sphérique (fig. 624) séparant deux milieux inéga-

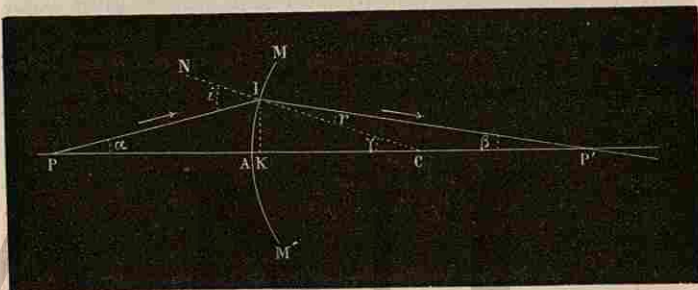


Fig. 624. — Réfraction à travers une surface sphérique.

ment réfringents, et soit  $n$  l'indice de réfraction du second milieu par rapport au premier; nous supposons que l'angle d'ouverture  $MCM'$  soit très petit. Soit  $CA$  un axe de la surface, c'est-à-dire l'un des diamètres de la sphère, qui rencontre la portion  $MM'$ . Considérons un point lumineux  $P$  pris sur cet axe, et soient  $PI$  un rayon incident quelconque,  $IP'$  le rayon réfracté correspondant. Désignons par  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , les angles  $IPA$ ,  $IP'A$ ,  $ICA$ , par  $i$  et  $r$  les angles d'incidence et de réfraction; on a :

$$i = \alpha + \gamma, \quad r = \gamma - \beta, \quad \sin i = n \sin r.$$

En égard à la faible ouverture de la surface, si le point lumineux  $P$  est suffisamment éloigné du point  $A$ , les angles  $i$  et  $r$  sont toujours assez petits pour que l'on puisse considérer le rapport de ces angles comme égal au rapport de leurs sinus; la dernière relation peut alors s'écrire  $i = nr$ , et en remplaçant  $i$  et  $r$  par leurs valeurs, il vient :

$$(1) \quad \alpha + n\beta = (n-1)\gamma.$$

(\*) Nous observerons, comme nous l'avons fait pour les miroirs, que ces constructions donnent le foyer conjugué du point  $A$ , lors même que le rayon lumineux dont on fait usage ne rencontrerait pas la lentille; ce sont des constructions purement géométriques, et, si l'un des rayons  $AI$  ou  $AK$  ne rencontre pas la lentille, il en faut conclure simplement que ce rayon ne concourt pas à la production de l'image.

Abaissons du point I la perpendiculaire IK sur l'axe CA; si l'ouverture de la surface est suffisamment petite, on peut considérer les angles  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , comme mesurés par  $\frac{IK}{AP}$ ,  $\frac{IK}{AP'}$ ,  $\frac{IK}{AC}$ ; et la relation (1) devient, en supprimant le facteur commun IK;

$$(2) \quad \frac{1}{AP} + \frac{n}{AP'} = \frac{n-1}{AC}.$$

La position du point P' est donc indépendante du point d'incidence I, c'est-à-dire que tous les rayons issus du point P, viennent, après réfraction à travers la surface MN, se couper en un même point P' situé sur l'axe CP.

On démontrerait de même que tous les rayons qui tomberaient sur la surface MM', en convergeant vers un même point Q, iraient, après réfraction, se couper en un même point Q', situé sur l'axe CQ.

**791. Lentilles sphériques. — Foyer d'un point lumineux situé sur un axe secondaire faisant avec l'axe principal un petit angle.** — Soit maintenant une lentille, limitée par deux portions de surface sphériques dont les centres sont C et C'; et soit un point lumineux P, situé sur un axe secondaire peu incliné sur l'axe principal CC'. Les rayons issus du point P, après réfraction à travers la première face de la lentille, se coupent en un même point P<sub>1</sub>, virtuel ou réel, situé sur l'axe CP; nous pouvons alors considérer les rayons qui traversent la deuxième face de la lentille comme issus d'un même point P<sub>1</sub>, ou comme allant concourir en un même point P<sub>1</sub>; dans tous les cas, après avoir subi la réfraction sur la deuxième face, ces rayons, ou leurs prolongements, iront passer par un même point P', situé sur l'axe CP<sub>1</sub>. — Donc, en définitive, les rayons lumineux issus d'un point P, après avoir traversé la lentille, se coupent en un même point P', qui est le foyer du point P. Nous savons, d'après les propriétés du centre optique (788), que ce point P' est situé sur l'axe secondaire qui passe par le point P.

**/792. Foyer d'un point situé sur l'axe principal. — Relation numérique entre les distances de la lentille aux deux foyers conjugués.** — Dans le cas particulier où le point lumineux P est situé sur l'axe principal CC' de la lentille, le foyer conjugué P' est aussi sur l'axe principal. Il existe une relation numérique très simple, entre les distances de la lentille aux deux points conjugués P et P'.

Soit LL' une section de la lentille par un plan qui contient l'axe principal (fig. 625); le rayon incident PI se réfracte suivant II'P', en demeurant dans le plan de la figure. Par rapport à ce rayon lumineux, la lentille LL' se comporte comme le ferait un prisme dont la section principale serait IAI'; désignons par D la déviation, c'est-à-dire l'angle formé par le prolongement du rayon incident PI et par le prolongement du rayon émergent IP'; par A l'angle que font entre elles les tangentes menées aux points I et I': on sait (779. Rem.) que l'on a

$$D = (n-1)A.$$

Mais, en désignant par  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\gamma'$  les angles IPO, IP'O, ICO, IC'O, il est facile de voir que l'angle de déviation, extérieur au sommet D du triangle DPI', est égal à la somme  $\alpha + \beta$ ; d'autre part, l'angle A et l'angle obtus N, ayant

leurs côtés respectivement perpendiculaires, sont supplémentaires: et comme, dans le triangle CNC', l'angle N est supplémentaire de la somme  $\gamma + \gamma'$ , il en résulte que l'angle A est égal à la somme  $\gamma + \gamma'$ ; la relation précédente devient donc

$$(1) \quad \alpha + \beta = (n-1)(\gamma + \gamma').$$

Puisque nous supposons que la lentille est très mince, nous devons considérer les points I et I' comme se confondant en un seul, situé sur la per-

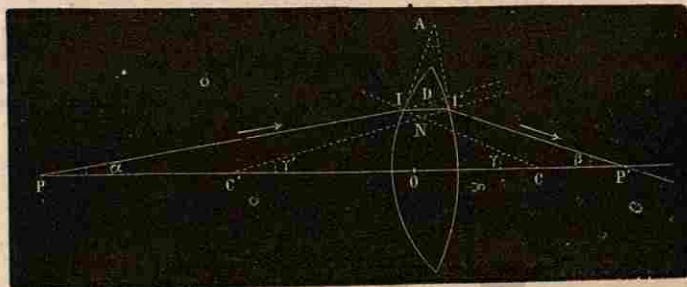


Fig. 625.

pendiculaire à l'axe principal, élevée au centre optique O, et à une distance de cet axe que nous appellerons  $y$ . Les angles  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  et  $\gamma'$  ont alors sensiblement pour mesures  $\frac{y}{OP}$ ,  $\frac{y}{OP'}$ ,  $\frac{y}{OC}$  et  $\frac{y}{OC'}$ ; et la relation (1) devient, en supprimant le facteur commun  $y$ ,

$$(2) \quad \frac{1}{OP} + \frac{1}{OP'} = (n-1) \left( \frac{1}{OC} + \frac{1}{OC'} \right).$$

Si l'on désigne par  $p$  et  $p'$  les distances de la lentille au point lumineux et à son foyer, par R et R' les deux rayons de courbure de la lentille, que nous supposons ici biconvexe, on obtient ainsi, entre les quantités  $p$  et  $p'$ , la relation numérique

$$(3) \quad \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = (n-1) \left( \frac{1}{R} + \frac{1}{R'} \right).$$

Cette relation étant symétrique par rapport à  $p$  et  $p'$ , les deux points P et P' sont des points conjugués, c'est-à-dire que les rayons lumineux qui émaneraient du point P' iraient passer par le point P, en suivant une marche inverse de celle qui est indiquée par les flèches.

La lentille est supposée définie par ses deux rayons de courbure R et R', et par son indice de réfraction  $n$ : le second membre de la relation (3) est alors connu. Dès lors, si l'on se donne la position d'un point lumineux sur l'axe principal, c'est-à-dire sa distance  $p$  à la lentille, l'équation (3) fera connaître la distance  $p'$  de la lentille au foyer conjugué de ce point. Si la valeur ainsi trouvée est positive, on prendra, comme sur la figure 625, une

distance  $OP'$  égale à  $p'$ , dans le sens de la lumière réfractée; le foyer  $P'$  est alors réel. — Si la valeur trouvée pour  $p'$  est négative, on verra, par un raisonnement semblable à celui que nous avons fait pour les miroirs concaves (755), qu'il faut interpréter le signe —, en comptant la distance  $OP'$  en sens inverse du sens de la lumière réfractée: le foyer  $P'$  est alors *virtuel*.

L'équation (3) montre que si le point  $P$  s'éloigne de la lentille, tout en restant sur l'axe principal, c'est-à-dire si la quantité  $\frac{1}{p}$  devient de plus en plus petite, la quantité  $\frac{1}{p'}$  devient de plus en plus grande, et par conséquent  $p'$  devient de plus en plus petit. Lorsque que le point  $P$  s'éloigne jusqu'à l'infini, les rayons issus de ce point constituent un faisceau parallèle à l'axe principal, et vont, après avoir traversé la lentille, se couper en un point  $F$ . La distance  $f$  de ce foyer principal  $F$  au centre optique  $O$  de la lentille s'appelle *longueur focale*; et on a, d'après l'équation (3),

$$(4) \quad \frac{1}{f} = (n-1) \left( \frac{1}{R} + \frac{1}{R'} \right).$$

Si nous remplaçons le second membre de l'équation (3) par sa valeur  $\frac{1}{f}$ , l'équation devient identique à celle des miroirs concaves:

$$(5) \quad \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}.$$

Cette relation permet, étant données deux des trois quantités  $p$ ,  $p'$  et  $f$ , de trouver la troisième.

**795. Droites conjuguées. — Plans conjugués.** — Soit  $LL'$  la section d'une lentille convergente, par un plan qui contient l'axe principal; soient  $C$ ,  $F$  et  $F'$  le centre optique et les deux foyers principaux (fig. 625). Puisque tous les rayons issus du point  $A$  doivent se couper en un même point  $A'$  (787, 791), ce point sera situé à l'intersection de deux rayons réfractés; l'une ou l'autre des deux constructions géométriques que nous avons indiquées (789) détermine la position de ce point. — Des points  $A$  et  $A'$  abaissons sur l'axe principal les perpendiculaires  $AP$  et  $A'P'$ ; et considérons, d'une part, les triangles semblables  $ICF$ ,  $IKA'$ ; d'autre part, les triangles  $KCF'$ ,  $KIA'$ ; nous avons:

(\*) Dans le calcul de  $\frac{1}{p'}$  au moyen de la formule  $\frac{1}{p'} = (n-1) \left( \frac{1}{R} + \frac{1}{R'} \right)$ , on devra affecter du signe — le rayon de courbure correspondant à une face concave. Si l'une des faces est plane, on devra considérer le rayon de courbure comme égal à l'infini: l'inverse du rayon de courbure sera alors nul.

Quand la lentille est bi-convexe ou plan-convexe, la quantité  $f$  est nécessairement positive. — Si la lentille a une face convexe et l'autre concave, la quantité  $f$ , calculée comme il vient d'être dit, est positive si le rayon de courbure de la face convexe est plus petit que le rayon de courbure de la face concave; c'est le cas du ménisque convergent (fig. 616, A').

$$\frac{IC}{IK} = \frac{CF}{KA'}, \quad \frac{KC}{KI} = \frac{CF'}{IA'}$$

d'où, en remarquant que  $IC + KC = KI$ , et que  $CF = CF'$ ,

$$\frac{CF}{KA'} + \frac{CF}{IA} = 1 \quad \text{ou} \quad \frac{1}{KA'} + \frac{1}{IA} = \frac{1}{CF}.$$

Si le point lumineux  $A$  se déplace sur la droite  $AP$ , la distance  $IA$  demeurant constante, la distance  $KA'$  est donc invariable, c'est-à-dire que le point conjugué se déplace sur la droite  $A'P'$ . Ces deux droites, qui jouissent de cette propriété, que tout point lumineux pris sur l'une a son foyer conjugué sur l'autre, sont appelées *droites conjuguées*.

Faisons maintenant tourner le plan de la figure autour de l'axe principal: chacune des droites conjuguées décrit un plan perpendiculaire à l'axe principal, et il est évident que tout point lumineux pris sur l'un de ces plans a son foyer conjugué sur l'autre. Ces deux plans sont appelés *plans conjugués*. — Si l'on désigne par  $p$  et  $p'$  les distances de ces plans au centre optique de la lentille, par  $f$  la distance  $CF$ , on a, entre  $p$ ,  $p'$  et  $f$ , la relation

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f},$$

qui permet de déterminer la position du plan conjugué d'un plan donné, sans construction géométrique.

**794. Construction géométrique de l'image d'une droite perpendiculaire à l'axe principal.** — Soit  $LL'$  la section d'une lentille convergente, dont  $C$  est le centre optique, et dont les deux foyers sont  $F$  et  $F'$ . Marquons aussi sur l'axe les deux points  $H$  et  $H'$  (fig. 626) dont les distances au centre optique sont égales au double de la distance focale principale  $CF$ . — D'après la propriété des droites conjuguées, l'image d'une droite perpendiculaire à l'axe principal sera une autre droite perpendiculaire à cet axe; il suffira donc, pour construire l'image, de déterminer le foyer d'un point de la droite donnée, de mener par ce foyer une perpendiculaire à l'axe principal, et de limiter la grandeur de l'image, en menant les axes secondaires qui passent par les extrémités de la droite donnée.

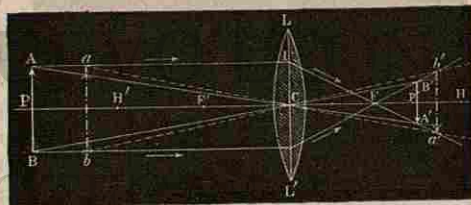


Fig. 626. — Image réelle, plus petite que l'objet.



1° Considérons d'abord un objet lumineux AB (fig. 626) placé à une distance de la lentille *plus grande que le double de la distance focale principale*. — Déterminons, comme il vient d'être dit, les foyers A' et B' de deux points A et B de l'objet; l'image A'B' est *réelle*, et *renversée* par rapport à l'objet. — La figure montre, de plus, que, dans le cas actuel, l'image est *plus petite que l'objet*; en effet, dans les triangles semblables A'Al et A'CF, Al étant, par hypothèse, plus grand que 2CF, CA est plus grand que CA'; dès lors, les triangles semblables ACB et A'CB' montrent que AB est plus grand que A'B'. — Enfin, des considérations analogues montrent que CP' est plus grand que CF et plus petit que CH, c'est-à-dire que *la distance de l'image à la lentille est supérieure à la distance focale principale, mais inférieure au double de cette distance (\*)*.

A mesure que l'objet se rapproche de la lentille, l'image s'en éloigne et grandit. Dans la figure 626, *ab* représente le même objet, placé plus près de la lentille: il forme alors son image en *a'b'*.

2° Si l'objet est à une distance de la lentille *égale au double de la distance focale principale*, la même construction montre que *l'image est réelle, renversée et égale en grandeur à l'objet*; l'image et l'objet sont alors *également distants de la lentille*.

3° Si l'objet est à une distance de la lentille *plus petite que le double de la distance focale principale*, l'image, toujours *réelle et renversée* par rapport à l'objet, se forme au delà du point H, et elle devient *plus grande que l'objet*. C'est ce qui résulte de la réciprocité des positions des foyers conjugués; c'est dans ces conditions qu'est faite l'expérience représentée par la figure 621.

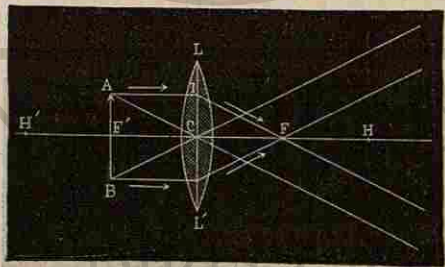


Fig. 627.

4° Si l'objet arrive à la distance focale CF' (fig. 627), il ne se forme plus d'image. En effet, l'axe secondaire AC et le rayon réfracté IF, dont la rencontre doit déterminer le foyer conjugué du point A, sont parallèles, puisque les côtés Al et CF du quadrilatère AICF sont égaux et parallèles. Tous les rayons émanés du point A sortent de la lentille parallèlement à l'axe secondaire de ce point.

(\*) On voit que l'image et l'objet sont compris entre les mêmes droites AA' et BB' qui se croisent au centre optique: c'est-à-dire que l'image et l'objet sont vus du centre optique sous le même angle.

5° Supposons enfin l'objet AB placé *entre le foyer principal F' et la lentille* (fig. 628). — La figure AICF est alors un trapèze, dans lequel Al est plus petit que CF: donc les prolongements du rayon réfracté IF et de l'axe secondaire AC se rencontrent en A', du même côté que l'objet, et au delà de A. Les rayons émanés de A forment donc, au sortir de la lentille, un faisceau *divergent*: si ce faisceau vient rencontrer l'œil, il paraît émané du *foyer virtuel A'*. — On trouvera de même l'image virtuelle B' du point B, et l'on obtiendra définitivement une image A'B', qui sera *droite, virtuelle et plus grande que l'objet*. — Une pareille image ne peut venir se peindre sur un écran; elle ne peut être perçue que par un observateur dont l'œil sera placé de manière à recevoir les faisceaux divergents. La lentille fonctionne alors comme une *loupe*: nous reviendrons plus loin sur ce sujet (828).

A mesure que l'objet s'éloigne de la lentille, sans arriver au foyer principal F', l'image s'en éloigne également et grandit. Dans la figure 628, *ab* représente le même objet, placé plus loin de la lentille que AB; il forme alors son image en *a'b'*.

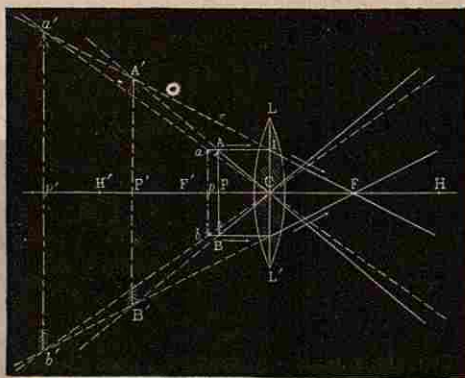


Fig. 628. — Image virtuelle.

Tous les résultats que nous venons d'obtenir, quant à la position de l'image et à sa grandeur par rapport à celle de l'objet, se vérifient facilement en plaçant devant une lentille un objet lumineux de dimensions sensibles, par exemple la flamme P d'une bougie (fig. 621). — Dans les cas où l'image est *réelle*, on peut, soit la recevoir sur un écran, soit observer directement l'image *aérienne*, comme nous l'avons indiqué à propos des miroirs concaves (761).

795. **Image d'un objet situé dans un plan perpendiculaire à l'axe principal. — Rapports de position et de grandeur de l'image et de l'objet.** — Quand un objet lumineux est situé dans un plan P perpendiculaire à l'axe principal d'une lentille, l'image est dans le plan conjugué P' du plan de l'objet; la position de l'image est donc déterminée par l'équation

$$(1) \quad \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}$$

Si cette équation donne pour  $p'$  une valeur positive, l'image est *réelle*; elle est *virtuelle* dans le cas contraire.

Considérons le cône qui a pour sommet le centre optique de la lentille, et pour base le contour de l'objet; ce cône est formé par les axes secondaires des différents points du contour de l'objet; le contour de l'image, devant se trouver à la fois sur le cône et dans le plan  $P'$ , est à l'intersection de ce cône et du plan conjugué du plan de l'objet. — Supposons que  $p$  soit toujours positif. Si la valeur trouvée pour  $p'$  est positive, les deux plans  $P$  et  $P'$  sont situés de part et d'autre de la lentille; chacun d'eux rencontre donc une des deux nappes du cône, et l'image est *renversée*. — Si la valeur trouvée pour  $p'$  est négative, les deux plans sont du même côté de la lentille; ils coupent la même nappe du cône: l'image est *droite*. — En général, l'image est *renversée* ou *droite*, selon que le rapport  $\frac{p'}{p}$  est positif ou négatif.

Enfin le rapport de deux dimensions linéaires homologues  $i$  et  $o$  de l'image et de l'objet, est égal à la valeur absolue du rapport  $\frac{p'}{p}$ ; on a donc, comme pour les miroirs concaves,

$$(2) \quad \frac{i}{o} = \sqrt{\frac{p'^2}{p^2}}$$

L'image est *agrandie* ou *diminuée*, selon que  $\frac{p'^2}{p^2}$  est supérieur ou inférieur à l'unité.

L'équation (1) permettant de calculer  $p'$ ,  $\frac{p'}{p}$ , et  $\frac{p'^2}{p^2}$ , on connaîtra, d'après les signes et les grandeurs de ces quantités, la position, la nature (réelle ou virtuelle) et la grandeur de l'image.

**796. Lentilles divergentes. — Foyer principal virtuel.** — Prenons une lentille à bords épais, telle que B, B' ou B'' (fig. 617), et recevons sur cette lentille un faisceau de rayons solaires, *parallèlement à son axe principal*:

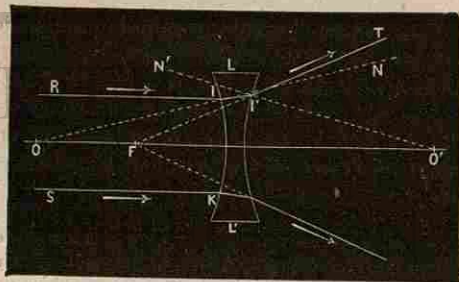


Fig. 629. — Divergence des rayons, produite par une lentille à bords épais.

l'expérience montre qu'on obtient au sortir de la lentille, un faisceau *divergent*. — L'œil d'un observateur, placé dans ce faisceau divergent, voit un point lumineux, dont l'éclat est tel que l'œil ne peut le supporter, et qui est situé *du côté où la lentille reçoit la lumière*. Ce point est le *foyer principal virtuel* de la lentille.

Voici comment on peut se rendre compte de ce résultat. — Soit un

rayon RI, tombant par exemple sur une lentille biconcave LL' (fig. 629), dans une direction parallèle à son axe principal OO'. Ce rayon éprouve, en pénétrant dans le verre, une première réfraction, qui le rapproche de la normale OIN, suivant II'; en sortant de la lentille, il éprouve une seconde réfraction, qui l'éloigne de la normale OT', et prend la direction IT. Ces deux réfractions ont pour effet, l'une et l'autre, *d'écarter le rayon lumineux de l'axe principal*. Dès lors, le prolongement géométrique IF du rayon émergent vient rencontrer l'axe principal en un certain point F, situé *du même côté de la lentille que le rayon incident* (\*). — L'expérience montre que le point F est *le même pour tous les rayons incidents* RI, SK, etc., parallèles à l'axe principal.

**797. Images virtuelles produites par les lentilles divergentes.**

— L'expérience montre encore que, quelle que soit la distance d'un objet lumineux à une lentille divergente, il ne se produit jamais qu'une image *virtuelle, droite et plus petite que l'objet*.

C'est ce qu'on peut s'expliquer par une construction géométrique, semblable à celle que nous avons employée pour les lentilles convergentes. — En effet, si l'on considère un objet AB (fig. 650) placé devant une lentille divergente, pour avoir l'image du point A, on mènera d'abord l'axe secondaire AC;

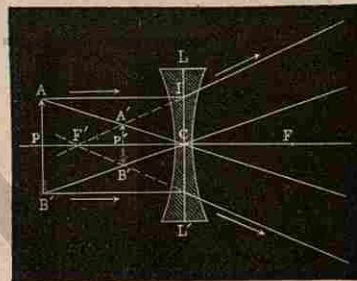


Fig. 650. — Image virtuelle, produite par une lentille divergente.

puis le rayon AI, parallèle à l'axe principal: le prolongement géométrique du rayon émergent devra passer par le foyer principal F'; dès lors, le point de rencontre des deux droites IF' et AC déterminera le point A', qui est l'image du point A. — On construira de même l'image B' du point B. — La figure montre que l'image A'B' est toujours *virtuelle, droite, et plus petite que l'objet* AB.

**798. Formules relatives aux lentilles divergentes.** — Pour ces lentilles, un calcul semblable à celui que nous avons fait pour les lentilles convergentes (792) donne, entre  $p$  et  $p'$ , la relation

$$(1) \quad \frac{1}{p'} - \frac{1}{p} = \frac{1}{f}$$

(\*) On peut encore se rendre compte de cette divergence, en observant que la lentille agit sur le rayon RI (fig. 629) comme le ferait un prisme de verre dont les faces se confondraient avec les plans tangents menés en I et I', et dont la base serait du côté opposé à l'axe principal.

les quantités  $p$  et  $p'$  étant comptées toutes les deux positivement du même côté de la lentille, et  $f$  étant la distance de la lentille au foyer principal virtuel  $F'$  (\*). — On a, en outre, comme pour les lentilles convergentes,

$$(2) \quad \frac{i}{o} = \sqrt{\frac{p'^2}{p^2}}$$

Ces équations suffisent pour résoudre toutes les questions relatives à la position et à la grandeur de l'image.

(\*) La longueur focale  $f$  serait encore déterminée par la relation

$$\frac{1}{f} = (n-1) \left( \frac{1}{R} + \frac{1}{R'} \right),$$

$R$  et  $R'$  désignant les deux rayons de courbure d'une lentille bi-concave. — Dans le cas d'un ménisque divergent (fig. 617 B'), on doit affecter du signe — le rayon de courbure de la face convexe.

## CHAPITRE IV

### DISPERSION

#### I. — DÉCOMPOSITION ET RECOMPOSITION DE LA LUMIÈRE.

##### 799. Décomposition de la lumière blanche du soleil.

**Spectre solaire.** — Lorsqu'on fait tomber un faisceau de rayons solaires sur un prisme, il éprouve, outre la déviation que nous avons étudiée (778) un *épanouissement* et une *coloration*. — En effet, si l'on reçoit le faisceau émergent sur un écran perpendiculaire à la direction moyenne des rayons, on observe que la région éclairée est allongée dans le sens perpendiculaire à l'arête du prisme, et présente des teintes variables d'une extrémité à l'autre. Ces teintes se fondent les unes dans les autres, en sorte qu'il est difficile de distinguer où finit l'une d'elles et où commence l'autre; on peut cependant les rapporter à sept couleurs principales, qui sont :

*Violet, indigo, bleu, vert, jaune, orangé, rouge.*

Cet épanouissement qu'éprouve le faisceau lumineux, en sortant du prisme, a reçu le nom de *dispersion*. — L'image colorée est ce qu'on nomme le *spectre solaire*.

Pour expliquer la formation du spectre solaire, Newton a admis que la *lumière blanche*, telle qu'elle nous arrive du Soleil, n'est pas une *lumière simple*; mais qu'elle est formée de diverses couleurs, *inégalement réfrangibles* par un même milieu transparent, comme le verre. — Cette hypothèse suffit pour expliquer le phénomène : car, si les diverses couleurs sont réunies dans le faisceau incident  $RI$  (fig. 631), et si elles sont inégalement réfrangibles, elles ne peuvent plus rester réunies en traversant le prisme  $A$ ; il se produit, à la sortie de ce prisme, autant de faisceaux de directions différentes qu'il y a de couleurs. — Ces faisceaux, rencontrant l'écran en des points différents, ne peuvent plus produire de la lumière blanche.

les quantités  $p$  et  $p'$  étant comptées toutes les deux positivement du même côté de la lentille, et  $f$  étant la distance de la lentille au foyer principal virtuel  $F'$  (\*). — On a, en outre, comme pour les lentilles convergentes,

$$(2) \quad \frac{i}{o} = \sqrt{\frac{p'^2}{p^2}}$$

Ces équations suffisent pour résoudre toutes les questions relatives à la position et à la grandeur de l'image.

(\*) La longueur focale  $f$  serait encore déterminée par la relation

$$\frac{1}{f} = (n-1) \left( \frac{1}{R} + \frac{1}{R'} \right),$$

$R$  et  $R'$  désignant les deux rayons de courbure d'une lentille bi-concave. — Dans le cas d'un ménisque divergent (fig. 617 B'), on doit affecter du signe — le rayon de courbure de la face convexe.

## CHAPITRE IV

### DISPERSION

#### I. — DÉCOMPOSITION ET RECOMPOSITION DE LA LUMIÈRE.

##### 799. Décomposition de la lumière blanche du soleil.

**Spectre solaire.** — Lorsqu'on fait tomber un faisceau de rayons solaires sur un prisme, il éprouve, outre la déviation que nous avons étudiée (778) un *épanouissement* et une *coloration*. — En effet, si l'on reçoit le faisceau émergent sur un écran perpendiculaire à la direction moyenne des rayons, on observe que la région éclairée est allongée dans le sens perpendiculaire à l'arête du prisme, et présente des teintes variables d'une extrémité à l'autre. Ces teintes se fondent les unes dans les autres, en sorte qu'il est difficile de distinguer où finit l'une d'elles et où commence l'autre; on peut cependant les rapporter à sept couleurs principales, qui sont :

*Violet, indigo, bleu, vert, jaune, orangé, rouge.*

Cet épanouissement qu'éprouve le faisceau lumineux, en sortant du prisme, a reçu le nom de *dispersion*. — L'image colorée est ce qu'on nomme le *spectre solaire*.

Pour expliquer la formation du spectre solaire, Newton a admis que la *lumière blanche*, telle qu'elle nous arrive du Soleil, n'est pas une *lumière simple*; mais qu'elle est formée de diverses couleurs, *inégalement réfrangibles* par un même milieu transparent, comme le verre. — Cette hypothèse suffit pour expliquer le phénomène : car, si les diverses couleurs sont réunies dans le faisceau incident  $RI$  (fig. 631), et si elles sont inégalement réfrangibles, elles ne peuvent plus rester réunies en traversant le prisme  $A$ ; il se produit, à la sortie de ce prisme, autant de faisceaux de directions différentes qu'il y a de couleurs. — Ces faisceaux, rencontrant l'écran en des points différents, ne peuvent plus produire de la lumière blanche.

L'expérience montre que c'est le violet qui est le plus dévié vers la base du prisme; c'est le rouge qui l'est le moins. Dans l'intervalle, se trouve la succession des autres couleurs, les faisceaux voisins empiétant d'ailleurs toujours un peu les uns sur les autres. — Dans la figure 651, on a représenté l'écran rabattu, à droite, autour de la ligne MN;

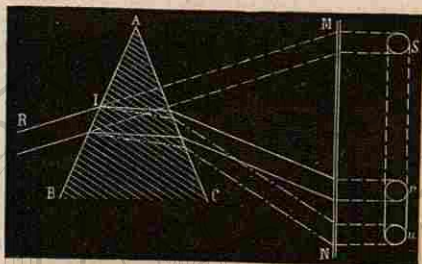


Fig. 651. — Production du spectre.

en S, est l'image blanche que produisait le faisceau de rayons solaires, avant qu'on eût placé le prisme; en ru, la succession des images colorées produites par le prisme, depuis le rouge r jusqu'au violet u.

Pour justifier l'explication précédente, Newton a eu recours à un grand nombre d'expériences : nous allons indiquer les principales. — Ces expériences montrent, comme on va le voir : 1° que les diverses couleurs du spectre sont simples et inégalement réfrangibles; 2° qu'on peut effectuer artificiellement une recombinaison de la lumière blanche, en superposant ces diverses couleurs.

800. **Les diverses couleurs du spectre sont simples et inégalement réfrangibles.** — En pratiquant une petite ouverture m dans l'écran MN, qui reçoit le spectre ru formé par un prisme A (fig. 652),

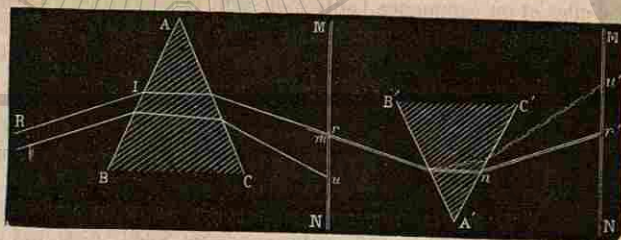


Fig. 652. — Inégale réfrangibilité des diverses couleurs.

on peut isoler un faisceau appartenant à une certaine nuance de rouge, par exemple. Si l'on reçoit ce faisceau rouge r sur un second prisme A', on constate d'abord qu'on n'obtient en r', sur un second écran MN, aucune autre couleur que la couleur rouge primitive. — En général, les expériences de ce genre montrent que chaque nuance du spectre est simple, c'est-à-dire qu'elle n'est plus décomposable en couleurs différentes.

En outre, si l'on fait tourner le prisme A, de manière à faire passer par l'ouverture m des rayons violets, par exemple, on constate qu'ils éprouvent, en traversant le prisme A', une déviation plus grande que les rayons rouges; en sorte que l'image vient se former en u' sur le second écran. — Cette expérience prouve donc bien que les diverses couleurs présentent, à travers une même substance, des réfrangibilités qui vont en croissant depuis le rouge jusqu'au violet.

L'expérience suivante, connue sous le nom d'expérience des prismes croisés, conduit à la même conclusion. — Soient deux prismes égaux placés près l'un de l'autre, l'un P (fig. 653) ayant ses arêtes verticales, l'autre P' ayant ses arêtes horizontales. Introduisons dans une chambre

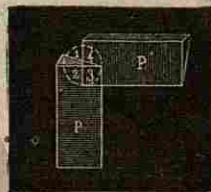


Fig. 653.

Expérience des prismes croisés.

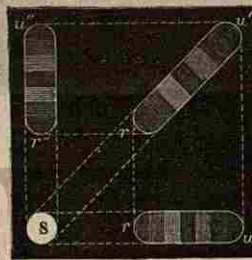


Fig. 654.

obscur un faisceau horizontal de lumière blanche, qui donne, sans interposition d'aucun prisme, une image blanche S (fig. 654) sur un écran. — Si l'on place sur le trajet du faisceau le prisme vertical P, cette image se transforme en un spectre horizontal ru; si maintenant, derrière le prisme P, on dispose le prisme horizontal P', on voit apparaître en r'u' un spectre incliné à 45 degrés par rapport à ru. — Ce résultat s'explique immédiatement, si l'on admet que les diverses couleurs sont inégalement réfrangibles : le faisceau violet tombant sur P' doit éprouver une déviation verticale plus grande que celle du faisceau rouge, en sorte que le spectre doit être incliné; de plus, les angles réfringents des deux prismes étant égaux, les déviations Sr et rr' doivent être égales entre elles : l'inclinaison du spectre doit donc être de 45 degrés (\*).

801. **Recomposition de la lumière blanche.** — Pour montrer que la coloration du spectre n'est pas due à une altération que le

(\*) On peut disposer cette expérience de manière à obtenir à la fois quatre images sur l'écran : il suffit de placer les deux prismes, comme les représente la figure 655, de telle sorte que leurs arêtes réfringentes soient tangentes au faisceau incident; ce faisceau est alors partagé en quatre parties 1, 2, 3, 4, dont la première donne l'image directe S (fig. 654); la seconde donne le spectre horizontal ru; la troisième, le spectre incliné r'u'; la quatrième, un spectre vertical r'u'', produit par le seul prisme P'.

prisme aurait fait subir à la lumière, Newton a vérifié, par diverses expériences, qu'en superposant de nouveau les rayons séparés par le prisme, on reconstitue de la lumière blanche.

1° *Recomposition par un second prisme.* — Soit RI (fig. 635) un faisceau de lumière blanche, traversant un premier prisme P :

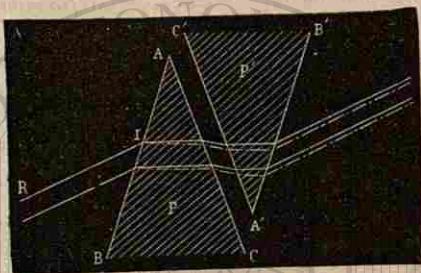


Fig. 635. — Recomposition de la lumière par un second prisme.

recevoir le faisceau réfracté sur un écran, où il formerait un spectre, faisons-le passer au travers d'un second prisme P', identique au premier, et dont les faces soient parallèles à celles de P, mais dirigées en sens contraire. En recevant les rayons sur un écran, à leur sortie du prisme P', on a une image blanche. — On voit en effet que, à la sortie du second prisme, le faisceau de lumière rouge (représenté en traits pleins) est redevenu parallèle au faisceau de lumière violette (représenté en traits discontinus) : ces faisceaux se confondent alors dans la plus grande partie de leur largeur, et il en est de même des faisceaux formés par les couleurs intermédiaires; c'est la superposition de tous ces faisceaux, de diverses couleurs, qui produit l'image blanche. — Cette image présente seulement quelques irisations sur son bord supérieur et sur son bord inférieur, où les faisceaux extrêmes débordent un peu les faisceaux voisins.

2° *Recomposition par les lentilles convergentes, ou par les miroirs concaves.* — Recevons les rayons réfractés par le prisme BAC (fig. 636) sur une lentille convergente L. Le faisceau rouge émergent, représenté en lignes pleines, ira, après avoir été réfracté par la lentille, converger en un point  $f$  de l'axe secondaire parallèle à sa direction primitive (789); de même, le faisceau violet émergent, représenté en lignes discontinues, ira converger, après avoir traversé la lentille, en un point  $f'$  de l'axe secondaire parallèle à sa direction primitive; au delà de ces points, les rayons de l'une et de l'autre couleur formeront deux faisceaux divergents, qui se traverseront en  $ab$ . Or, la partie commune aux deux faisceaux appartient évidemment aussi aux faisceaux formés par les rayons de réfrangibilités intermédiaires : si donc la superposition de tous les rayons du spectre reproduit la lumière blanche, on devra obtenir une image blanche, sur un écran placé en  $ab$ . C'est ce que l'expérience vérifie. — La construction montre que si l'on place l'écran en avant de  $ab$ , en  $a'b'$  par exemple, on doit avoir une image blanche, bordée de rouge en haut et de violet en bas; au contraire, au delà de

$ab$ , en  $a'b'$  par exemple, on doit avoir une image blanche, bordée de violet en haut et de rouge en bas; c'est ce que l'expérience vérifie.

En employant un miroir concave au lieu de la lentille convergente L, on opère la reconstitution des couleurs d'une manière semblable.

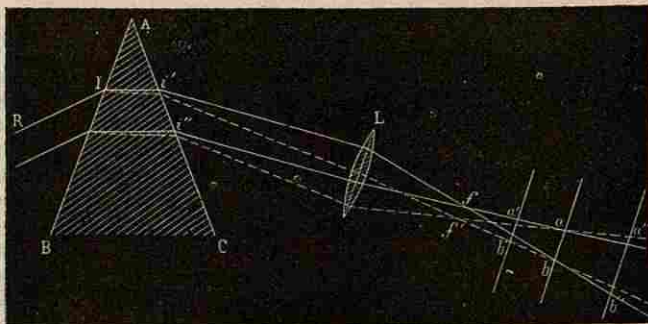


Fig. 636. — Recomposition de la lumière par une lentille convergente

1802. *Expérience du disque de Newton.* — Pour démontrer, autrement encore, que la sensation simultanée de toutes les couleurs du spectre produit sur notre œil la sensation de la lumière blanche, on peut faire usage du *disque de Newton*.

Pour comprendre le principe sur lequel est fondée cette expérience, prenons un disque de carton noir (fig. 637) sur lequel on aura collé

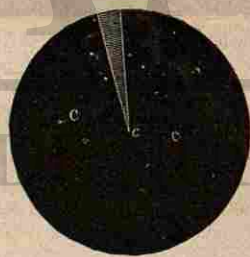


Fig. 637.

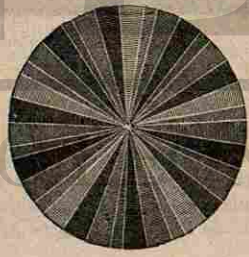


Fig. 638.

Disque de Newton.

une bande de papier rouge  $c$ , en forme de secteur circulaire. Faisons passer au travers du carton, par son centre, une tige de bois ou de métal, de manière à pouvoir faire tourner rapidement le disque autour de ce point. Pendant la rotation, toute la surface du disque nous paraîtra colorée en rouge. — Cela tient à ce que la sensation produite sur notre œil par la bande rouge, dans chacune de ces positions, dure

un certain temps, en sorte que, pendant la rotation, nous la voyons à la fois dans toutes ses positions successives.

Or, le *disque de Newton* (fig. 638) est un disque semblable, sur lequel on a collé, à la suite les uns des autres, des bandes de papier de toutes les couleurs du spectre. Si on le fait tourner rapidement, sa surface doit présenter toutes ces colorations à la fois, en chacun de ses points. — On constate, en effet, que la surface du disque paraît blanche.

**803. Aberrations de réfrangibilité des lentilles. — Achromatisme.** — Un rayon de lumière blanche, en traversant une lentille, se trouve dans les mêmes conditions que s'il traversait un prisme dont les faces seraient tangentes à la lentille aux points d'incidence et d'émergence. Ce rayon est donc à la fois dévié et décomposé. — Considérons, par exemple, un faisceau de lumière blanche tombant sur une lentille convergente LL' de faible ouverture (fig. 639), parallèlement à l'axe principal X'X. Les rayons

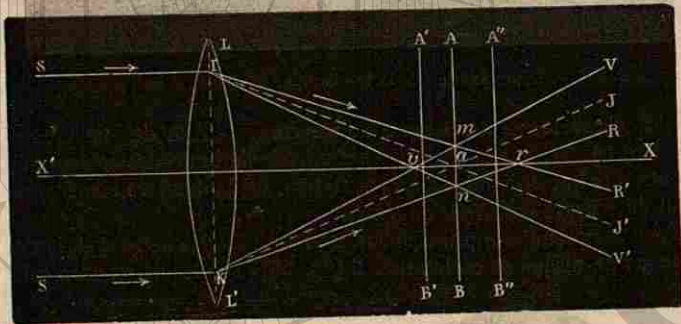


Fig. 639. — Aberrations de réfrangibilité des lentilles.

rouges, qui sont les moins réfrangibles, iront, après réfraction, couper l'axe principal en un point  $r$ ; les rayons violets, qui sont les plus réfrangibles, couperont ce même axe en un point  $v$ , plus voisin de la lentille; les foyers principaux des autres couleurs seront situés entre  $r$  et  $v$ . — Dès lors, il est facile de voir que, quel que soit le point où l'on place un écran, perpendiculairement à l'axe principal, il est impossible que la région éclairée présente de la lumière blanche dans tous ses points (\*).

(\*) Supposons que l'écran occupe la position AB (fig. 639), qui passe par l'intersection  $mn$  de la première nappe  $lrk$  du cône des rayons rouges avec la seconde nappe  $lvv'$  du cône des rayons violets. Tous les points éclairés recevront à la fois des rayons rouges et des rayons violets. Mais il y aura une couleur, le jaune, par exemple, dont le foyer sera en  $a$ : les génératrices extrêmes du cône des rayons jaunes seront  $ka$  et  $la'$ : aucun des points de la surface  $mn$ , autre que  $a$ , ne recevra de jaune. Si maintenant on remarque que les foyers des couleurs intermédiaires entre le rouge et le jaune correspondent aux points situés entre  $r$  et  $a$ ; que les foyers des couleurs intermédiaires entre le jaune et le violet correspondent aux points situés entre  $a$  et  $v$ , on voit que la surface  $mn$  ira en s'irisant successivement, du centre vers les bords. — Il est facile de voir que, pour toute position A'B' située en deçà de AB, les

Des considérations analogues sont applicables aux faisceaux émanés de points situés à des distances finies de la lentille: de là résulte que, même avec une lentille de très petite ouverture, il est impossible d'obtenir des images ne présentant pas, au moins sur leurs bords, des irisations de diverses couleurs. — Ce sont ces effets qui ont reçu le nom d'*aberrations de réfrangibilité*.

Pour diminuer autant que possible ces aberrations, qui nuisent à la netteté des images, on réunit ensemble deux ou plusieurs lentilles, formées de verres différents, et constituant ce qu'on appelle des systèmes *achromatiques*. — Si l'on assemble deux lentilles, l'une convergente et l'autre divergente (fig. 640), la première en crown et la seconde en flint, et si l'on donne à ces lentilles des courbures convenablement calculées, la théorie montre que l'on peut obtenir un système qui fonctionne comme une lentille convergente, mais dans lequel deux couleurs émanées d'un même point, le rouge et le violet par exemple, forment toujours leurs foyers exactement en un même point. — Cependant, avec deux lentilles, les images présentent encore de légères irisations, parce que les couleurs intermédiaires entre le rouge et le violet ont encore des foyers un peu différents. Avec trois lentilles assemblées, on peut achromatiser rigoureusement trois couleurs, le rouge, le jaune et le violet, par exemple; les autres couleurs ont alors leurs foyers sensiblement aux mêmes points, et l'on fait disparaître à peu près complètement toute irisation (\*).



Fig. 640. — Lentilles achromatiques.

**804. Couleurs complémentaires. — Couleurs des corps éclairés par la lumière blanche.** — On dit que deux couleurs sont complémentaires, lorsque ces couleurs superposées produisent du blanc.

Si l'on fait tomber un spectre solaire sur un écran percé d'ouvertures qui laissent passer seulement certaines couleurs, et si, à l'aide d'une lentille, on fait converger ces couleurs en un point, on obtient une teinte complémentaire de celle qu'on obtiendrait en superposant les autres couleurs. — Par exemple, en arrêtant le rouge et superposant les autres couleurs, on obtient une sorte de vert bleuâtre, qui est une couleur composée, *complémentaire du rouge*.

Les couleurs que nous présentent les divers corps, quand ils sont éclairés par la lumière blanche, résultent de la manière inégale dont ils agissent sur les diverses couleurs qui constituent cette lumière. — Ainsi, quand une étoffe, éclairée par la lumière du jour, nous apparaît avec la couleur *rouge*, c'est que les rayons rouges sont les seuls qu'elle

bords de l'image contiendront toujours uniquement de la lumière rouge. Pour toute position A'B' située au delà de AB, les bords de l'image contiendront uniquement de la lumière violette.

(\*) Newton avait regardé comme insoluble le problème de l'achromatisme, c'est-à-dire la construction d'un système réfringent capable de dévier les rayons sans les décomposer. C'est à l'opticien anglais Dollond qu'on doit la solution de cette question: la découverte de l'achromatisme date de 1758.

*diffuse* dans toutes les directions : elle absorbe toutes les autres couleurs, dont le mélange formerait la teinte complémentaire du rouge. — Quand une étoffe nous paraît *verte*, c'est qu'elle ne diffuse que les rayons verts et absorbe toutes les autres couleurs, etc.

Les corps *blancs*, comme le papier, sont des corps qui diffusent en égale proportion les rayons de *toutes les couleurs*. La lumière qu'ils renvoient présente la même composition que celle qu'ils reçoivent.

Les corps *noirs* sont ceux qui absorbent toutes les couleurs, sans en diffuser aucune. — Quand un corps est absolument noir, on ne peut le distinguer que par contraste avec les corps voisins, qui diffusent de la lumière blanche ou de la lumière colorée.

Des remarques semblables sont applicables aux *corps transparents*. — Un *verre rouge* est un verre qui, recevant de la lumière blanche, ne laisse passer que les rayons rouges, et absorbe toutes les autres couleurs. — Le *verre à vitres ordinaire* laisse passer également toutes les couleurs, en sorte que la lumière transmise présente la même composition qu'avant son passage au travers du verre.

D'après cela, il est facile d'expliquer, par exemple, l'aspect que nous présente un paysage, quand nous le regardons au travers d'un *verre rouge*. Les corps blancs qui s'y trouvent nous paraissent rouges, parce que, des diverses couleurs qu'ils émettent, le verre rouge ne laisse passer que la couleur rouge. Pour la même raison, les corps rouges nous apparaissent, dans ce cas, avec leur couleur réelle. Mais les corps bleus, verts ou jaunes, nous paraissent noirs, parce que le verre rouge ne laisse passer aucune de ces couleurs.

**805. Propriétés calorifiques et propriétés chimiques du spectre. — Rayons infra-rouges et rayons ultra-violet.** — Lorsqu'on décompose les rayons solaires au moyen d'un prisme de sel gemme, on constate, ainsi que nous l'indiquerons dans l'étude de la chaleur rayonnante, que ce spectre possède des propriétés calorifiques croissantes, du violet au rouge. Si l'on continue à explorer l'espace situé au delà du rouge, on constate l'existence d'un spectre calorifique, se prolongeant encore dans une étendue à peu près égale à celle du spectre lumineux. — Ces rayons *calorifiques obscurs*, dont la réfrangibilité est moindre que celle des rayons qui sont à la fois calorifiques et lumineux, ont reçu le nom de rayons *infra-rouges*.

Si maintenant on reçoit le spectre solaire sur quelques-unes de ces substances dans lesquelles la lumière peut effectuer des décompositions chimiques, et qui sont en usage dans la photographie, on constate que les actions chimiques sont très inégales dans les diverses régions du spectre. A l'inverse des propriétés calorifiques, les propriétés chimiques se manifestent surtout dans les régions qui correspondent aux rayons voisins du violet; en outre, elles dépassent, du côté du violet, les limites du spectre visible. Le soleil nous envoie donc, outre les rayons qui

sont à la fois chimiques et lumineux, des rayons *chimiques obscurs*, d'une réfrangibilité plus grande que les premiers : on leur donne le nom de rayons *ultra-violet* (\*).

**806. Propriétés phosphorogéniques.** — C'est particulièrement aux rayons doués de propriétés chimiques que paraît appartenir la propriété de déterminer la *phosphorescence*.

Certaines substances, placées dans la partie la plus déviée du spectre visible, ou même dans les rayons ultra-violet, répandent une lueur phosphorescente, dont la teinte dépend de la nature même de ces substances. — Quelques-unes conservent quelque temps la propriété de luire ainsi, lorsqu'on les transporte dans l'obscurité : tels sont le spath-fluor, le sulfate de baryte calciné avec du soufre ou des matières organiques, les écailles d'huître calcinées, etc. : ce sont ces corps qu'on appelle spécialement *phosphorescents*. — D'autres substances cessent d'être lumineuses dès qu'on intercepte les rayons qu'elles recevaient : telles sont la solution de sulfate de quinine, l'infusion d'écorce de marronnier d'Inde, le verre coloré par l'oxyde d'uranium, etc. ; on les désigne sous le nom de substances *fluorescentes*.

Pour constater la propriété que possèdent les radiations ultra-violettes, de développer la phosphorescence ou la fluorescence, on fait, dans les cours, l'expérience suivante. Avec un pinceau imprégné d'une solution de sulfate de quinine dans l'acide tartrique, on trace une longue bande sur un carton blanc, et l'on fait tomber le spectre solaire sur ce carton, de manière qu'il couvre une partie de sa longueur; on aperçoit alors, non seulement la portion du carton qui était visible avant l'addition du sulfate de quinine, mais encore une certaine longueur de la bande au delà du violet. Le sulfate de quinine n'étant que fluorescent, le phénomène disparaît dès qu'on intercepte la lumière incidente.

**807. Les diverses couleurs se distinguent entre elles, comme les sons de diverses hauteurs, par la rapidité du mouvement vibratoire, ou par la longueur d'onde.** — Des expériences délicates, dans le détail desquelles il nous serait impossible d'entrer, ont permis, non seulement de vérifier les diverses conséquences qui se déduisent de l'hypothèse des ondulations, mais encore de mesurer les *longueurs d'ondes lumineuses* dans l'air, pour chacune des couleurs simples qui constituent la lumière blanche : ces longueurs d'onde vont en décroissant du rouge au violet, c'est-à-dire qu'elles ont une valeur d'autant plus petite qu'elles se rapportent à une couleur plus réfrangible. — Or, on a vu (676) que, dans un mouvement vibratoire en général, si l'on désigne par  $v$  la vitesse de propagation du mouvement, par  $\lambda$  la longueur d'onde, et par  $n$  le nombre de vibrations par seconde, on a

$$v = n\lambda.$$

(\*) Pour étudier les propriétés chimiques des diverses radiations, il convient d'employer un prisme et une lentille formés de *crystal de roche* : le verre arrêterait une grande partie des rayons plus réfrangibles que les rayons violets extrêmes.



On connaît la vitesse de propagation de la lumière dans l'air, égale à environ 300 000 kilomètres par seconde (855); cette formule permet donc de calculer le nombre de vibrations  $n$  pour une couleur déterminée, étant donnée la longueur d'onde  $\lambda$ .

Pour le jaune, par exemple, la valeur de la longueur d'onde  $\lambda$  est d'environ 6 dix-millièmes de millimètre : on a donc

$$n = \frac{500\,000\,000}{0,000\,006} = \frac{500}{0,6} \times 10^{12} = 500 \times 10^{12};$$

c'est-à-dire que la lumière jaune correspond à environ 500 trillions de vibrations par seconde. — Pour les autres couleurs, on trouve que le nombre de vibrations par seconde varie entre 400 trillions et environ 700 trillions, en allant du rouge au violet.

On voit que les vibrations lumineuses sont beaucoup plus rapides que les vibrations sonores, puisque les vibrations des sons les plus aigus, perceptibles à l'oreille, ne dépassent guère une vingtaine de mille par seconde (685). — Mais le caractère qui distingue entre elles les lumières de diverses couleurs est le même que celui qui distingue les sons de diverses hauteurs : c'est la rapidité plus ou moins grande du mouvement vibratoire.

## II. — ÉTUDE DES SPECTRES DE DIVERSES ORIGINES. ANALYSE SPECTRALE.

**808. Méthode de Newton pour obtenir un spectre pur.** — Lorsqu'on fait pénétrer un faisceau de lumière solaire dans une chambre obscure, par une petite ouverture, on obtient, sur un écran placé à une certaine distance de l'ouverture, sans interposition de prisme, une image blanche, sensiblement circulaire (750). Par suite, lorsqu'on place un prisme sur le trajet du faisceau, on obtient, sur l'écran, un spectre dans lequel les nuances sont plus ou moins mélangées, en raison de l'empiètement des couleurs voisines les unes sur les autres. — Pour obtenir un spectre *pur*, c'est-à-dire dans lequel la séparation des rayons de nuances différentes se fasse aussi complètement que possible, Newton a employé la méthode suivante.

On introduit la lumière, dans la chambre obscure, par une fente très étroite. Le faisceau est reçu sur une lentille convergente, placée à une distance de l'ouverture égale au double de sa distance focale principale. Cette lentille donne, sur un écran placé à la même distance, de l'autre côté, une image brillante de la fente lumineuse, et les dimensions de cette image sont égales à celles de la fente (794, 2°). Enfin, on place le prisme au voisinage de la lentille, de manière que son arête réfringente soit parallèle à la longueur de la fente; on l'oriente dans une position correspondant à peu près au minimum de déviation (782), et l'on dirige l'écran de façon qu'il soit perpendiculaire à la direction

moyenne des rayons réfractés. — Le spectre résulte alors de la juxtaposition d'une infinité de rectangles très déliés, empiétant peu les uns sur les autres. Le mélange des couleurs est d'autant moindre que la largeur de la fente est plus petite.

**809. Raies du spectre solaire.** — Dans le spectre solaire, obtenu par la méthode qui vient d'être indiquée, on observe un grand nombre de *raies obscures*, parallèles à l'arête du prisme. L'apparition de ces raies prouve que, dans la lumière du soleil, il n'y a pas continuité parfaite entre les réfrangibilités des radiations qui la constituent : on peut dire qu'il y manque un grand nombre de couleurs simples, dont le degré de réfrangibilité serait déterminé par la place qu'occupent les raies obscures.

La production de ces lignes obscures avait échappé à Newton, probablement à cause du peu d'homogénéité des lentilles dont il pouvait

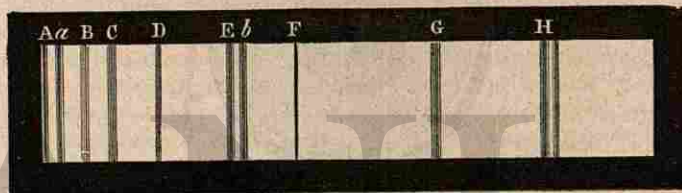


Fig. 641. — Raies du spectre solaire.

faire usage. Le phénomène a été signalé par Wollaston, en 1802. Quinze ans après, un physicien de Munich, Fraunhofer, en fit une étude attentive, et parvint à compter environ six cents de ces lignes; c'est pourquoi on les désigne souvent sous le nom de *raies de Fraunhofer*. — Plus tard, Brewster, M. Kirchhoff et d'autres expérimentateurs en ont encore signalé de nouvelles, en même temps qu'ils ont indiqué d'une manière plus précise la position de celles qui étaient déjà connues.

Ces raies ne sont pas distribuées uniformément dans l'étendue du spectre solaire : on en a distingué d'abord sept groupes principaux, qui ont été désignés par les lettres B, C, D, E, F, G, H, et dont la figure 641 représente la distribution dans les diverses couleurs; on a indiqué, en outre, sur cette figure, quelques autres groupes A, a, b, qu'il est facile d'apercevoir; dans l'intervalle, on découvre encore une multitude de lignes plus fines, distribuées irrégulièrement dans le spectre (\*).

(\*) Les raies obscures forment, dans le spectre solaire, des lignes de repère fixes; aussi les a-t-on utilisées pour la détermination précise des indices de réfraction. — Pour la construction des instruments d'optique dans lesquels on veut obtenir un achromatisme aussi parfait que possible, il est utile de connaître, pour les différentes sortes de verre, les indices de réfraction qui correspondent aux rayons voisins des raies principales.

810. **Spectroscope.** — Le spectre que l'on obtient sur un écran, en employant la méthode de Newton (808), est la succession d'une série d'images réelles de la fente, formées chacune par les rayons d'une nuance déterminée. Or, supposons qu'on supprime l'écran et qu'on place, au delà de la position qu'il occupait et sur le trajet des faisceaux lumineux, une loupe; l'œil placé derrière cette loupe verra l'image

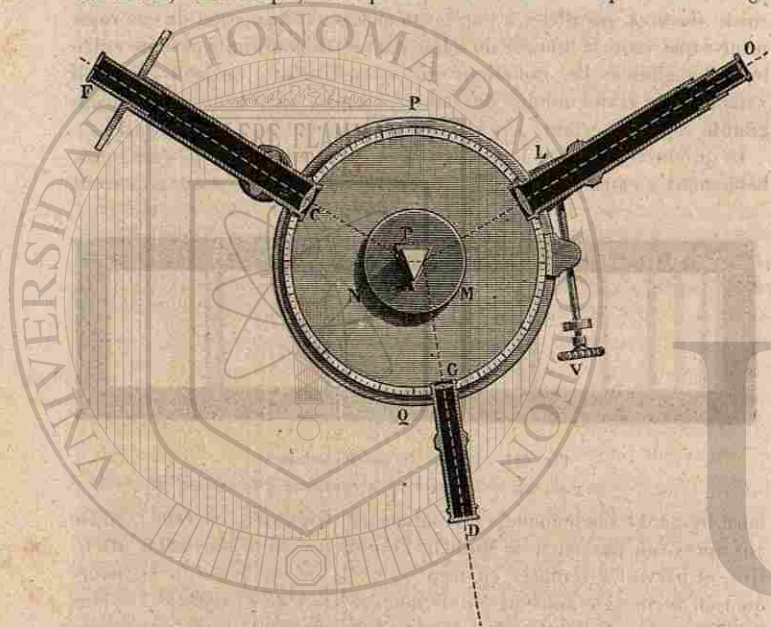


Fig. 642. — Spectroscope.

aérienne du spectre, comme il verrait un objet occupant la même position (761) : le grossissement produit par la loupe permettra, en outre, de mieux distinguer les détails. — Mais la succession de la lentille qui, dans la méthode de Newton, reçoit le faisceau lumineux à sa sortie du prisme, et de la lentille qui constitue la loupe au moyen de laquelle on regarde le spectre, constitue précisément le système que nous étudierons plus loin sous le nom de *lunette astronomique*. Ce mode d'observation revient donc, en réalité, à placer au delà du prisme P (fig. 642), sur la direction du faisceau réfracté, une lunette LO convenablement ajustée.

On place ordinairement la fente F, par laquelle arrivent les rayons, à l'extrémité d'un tube noirci intérieurement, et l'on fixe dans ce tube une lentille C, dont la fente F occupe le foyer principal : les rayons qui

viennent de la fente sortent alors de la lentille *parallèlement à son axe principal*, et arrivent sur le prisme comme s'ils venaient d'un objet placé à l'infini. — Le système formé d'une lentille et d'une fente ainsi disposées porte le nom général de *collimateur*.

L'appareil dont nous venons d'indiquer les éléments essentiels a été désigné sous le nom de *spectroscope*. — Pour rendre les observations plus précises, on place le prisme P au centre d'un limbe circulaire, et le collimateur FC en un point du contour de ce cercle, de manière que son axe aille rencontrer l'une des faces du prisme; la lunette OL est mobile dans le plan du limbe, de manière à permettre d'explorer le faisceau réfracté par le prisme. — Enfin, pour comparer entre elles les positions des diverses raies, on fixe sur le limbe un *tube micrométrique* DG. A l'extrémité D est une plaque de verre bien éclairée, sur laquelle on a gravé une petite échelle formée de traits fins, parallèles à l'arête du prisme; à l'autre extrémité G est une lentille qui fonctionne encore comme un collimateur, envoyant sur la deuxième face du prisme, en faisceaux parallèles, les rayons émis par les traits du micromètre : ces rayons sont réfléchis par cette face, et viennent former dans la lunette l'image aérienne du micromètre, laquelle se superpose à celle du spectre et est vue en même temps. Chacune des raies du spectre peut alors être caractérisée par la division du micromètre à laquelle elle correspond.

Nous allons montrer maintenant comment l'étude des spectres fournis par les sources lumineuses artificielles a conduit à expliquer la formation des raies obscures dans le spectre solaire.

811. **Spectres des lumières artificielles.** — L'étude des spectres fournis par les sources artificielles, entreprise d'abord par divers observateurs, a été reprise par MM. Kirchhoff et Bunsen, dont les recherches sont venues donner à l'ensemble de ces phénomènes une importance inattendue.

Quand on chauffe progressivement un corps *solide* ou *liquide*, en observant en même temps au spectroscopie la lumière qu'il émet, on constate que, à la température du rouge naissant, le spectre se compose presque uniquement de rayons rouges, c'est-à-dire des rayons les moins réfrangibles; puis, à mesure que la température s'élève, on voit apparaître dans le spectre, à la suite du rouge, des rayons orangés, puis des rayons jaunes, verts, etc., par ordre de réfrangibilité croissante; les rayons violets apparaissent seulement à la *température blanche*. — En d'autres termes, le spectre s'étend d'une manière progressive, à mesure que l'incandescence du corps devient plus vive; mais le spectre de ces corps *solides* ou *liquides* est toujours un *spectre continu*, sans intervalles obscurs.

Au contraire, les corps *gazeux*, amenés à l'incandescence, émettent une lumière qui est caractérisée par un *spectre discontinu*. On constate

bien encore que des rayons de réfrangibilités croissantes apparaissent à mesure que la température s'élève ; mais chaque corps n'émet que certaines espèces de rayons, de réfrangibilités déterminées, en sorte que le spectre des gaz reste toujours formé de *lignes brillantes, séparées par de larges intervalles obscurs*. — Ces lignes brillantes ont une couleur et une position *caractéristiques* pour chaque gaz en particulier.

Pour constater ces propriétés, qui distinguent les corps gazeux des corps solides ou liquides, il est indispensable d'opérer avec des corps *complètement gazeux*. Les résultats offrent une netteté remarquable quand on emploie, par exemple, les gaz raréfiés contenus dans les tubes de Geissler (641), et rendus incandescents par le passage de courants d'induction. — Au contraire, quand on observe au spectroscopie les flammes de gaz tenant en suspension des particules solides, on obtient des spectres continus, parce que l'éclat des particules solides incandescentes l'emporte sur l'éclat du gaz lui-même. Ainsi, les flammes de nos bougies, de nos lampes, qui doivent leur propriété éclairante aux parcelles de charbon mise en liberté pendant la combustion, donnent toujours des spectres continus, dans lesquelles certaines parties ont seulement une intensité prédominante.

L'arc électrique, lorsqu'on a soin d'éloigner les extrémités des corps solides entre lesquels il jaillit, de manière que leur éclat propre ne vienne pas compliquer le phénomène (565), fournit un spectre caractérisé par des bandes extrêmement brillantes, variables avec la nature des corps qui terminent les conducteurs, et caractéristiques de ces corps. — Cette remarque confirme l'idée que nous avons émise précédemment, à savoir, que l'arc est formé par des particules matérielles, vaporisées et transportées d'un pôle à l'autre (565).

**812. Analyse spectrale.** — Les différences qui distinguent les spectres produits par les divers corps, à l'état de gaz ou de vapeurs incandescentes, ont conduit à une méthode d'analyse d'une extrême sensibilité. — Plaçons, devant la fente F du spectroscopie, un de ces becs de gaz qui sont connus sous le nom de *brûleurs de Bunsen*, et dans lesquels l'arrivée d'un courant d'air au milieu de la flamme a pour effet de brûler complètement le charbon et de rendre la flamme à peine visible. Si nous introduisons, à la base de la flamme, un fil de platine humecté avec un sel métallique volatil, nous verrons apparaître, dans le spectre, des lignes brillantes, caractéristiques de la nature du métal. C'est ainsi que la présence du sodium est accusée par une double raie jaune, très brillante; celle du lithium, par une raie rouge et par une raie jaune différente de la raie du sodium; celle du strontium, par des raies rouges et orangées, et par une raie bleue, etc.

Enfin, l'apparition de raies particulières, n'appartenant à aucun des métaux déjà connus, a conduit presque immédiatement MM. Kirchhoff

et Bunsen à la découverte de deux nouveaux métaux, le cæsium et le rubidium, qui ont ensuite été isolés par eux, au moyen de procédés chimiques. — Bientôt après, un troisième métal, le thallium, signalé en Angleterre par M. Crookes, sur la simple apparition d'une raie verte spéciale, a été isolé en France par M. Lamy. — Plus récemment encore, un nouveau métal, le gallium, a été découvert d'une manière semblable par M. Lecoq de Boisbaudran.

**815. Expérience du renversement des raies.** — Voici maintenant une expérience qui est devenue, pour M. Kirchhoff, le point de départ de la théorie qui l'a conduit à l'explication des raies obscures du spectre solaire.

L'analyse spectrale avait montré que la flamme de l'alcool salé, et en général toutes les flammes qui doivent leur couleur à un sel de sodium, produisent une lumière dont le spectre se réduit à une bande jaune *brillante*, occupant dans le spectroscopie exactement la place de la raie *obscur* du spectre solaire, que Fraunhofer avait désignée par la lettre D. D'autre part, on savait également, ainsi qu'il a été dit (811), que si l'on fait arriver dans le spectroscopie un faisceau de lumière émis par un corps solide porté à une haute température, comme le bâton de chaux de la lumière de Drummond, on observe un spectre très brillant et absolument *continu*. — Or, M. Kirchhoff a montré que si l'on place, sur le trajet de ce faisceau lumineux, la flamme de l'alcool salé, on voit apparaître, dans ce spectre continu, une bande *obscur* occupant exactement la place D.

De cette expérience il résulte qu'une flamme contenant un sel de sodium, en même temps qu'elle a la propriété d'*émettre* exclusivement des rayons jaunes, possède aussi la propriété d'*absorber* la lumière jaune émise par une source lumineuse plus intense, sans absorber les autres couleurs que contient cette lumière. — De même, le chlorure de lithium, placé dans une flamme non éclairante, donne un spectre remarquable par une ligne rouge *brillante*, qui correspond à peu près au milieu de l'intervalle compris entre les raies B et C de Fraunhofer. Cette flamme, placée sur le trajet du faisceau lumineux produit par la lumière de Drummond, fait apparaître, dans le spectre de cette lumière, une raie *obscur* correspondante.

Ces résultats ont été rattachés par M. Kirchhoff à un principe qui avait été établi par l'expérience, pour la chaleur rayonnante en particulier (880), le principe de *l'égalité du pouvoir émissif et du pouvoir absorbant* d'un même corps, pour des rayons d'une espèce déterminée. — En généralisant ce principe, on devra raisonner comme il suit. Puisque la flamme de l'alcool salé donne, à la température de sa combustion, un spectre qui se réduit à une bande jaune, cette flamme n'a de pouvoir émissif, à cette température, que pour les radiations jaunes : elle doit donc avoir un pouvoir absorbant considérable pour les radiations jaunes émanées d'une autre source, et un pouvoir absorbant sen-

siblement nul pour toutes les radiations d'une autre couleur. Dès lors, lorsque le faisceau de la lumière de Drummond traverse cette flamme, les rayons jaunes de ce faisceau perdent une partie considérable de leur intensité; d'autre part, les rayons jaunes émis par la flamme elle-même, qui est à une température plus basse, n'ont pas une intensité qui compense la perte d'éclat du faisceau transmis. On doit donc bien obtenir, dans la région du spectre qui correspond aux rayons de cette couleur, une bande obscure tranchant sur les autres couleurs dont l'éclat n'est pas amoindri.

Cette explication s'étend à toutes les expériences semblables, c'est-à-dire à toutes celles dans lesquelles on produit le phénomène qui est aujourd'hui désigné sous le nom de *renversement des raies* (\*).

814. **Explication de la production des raies du spectre solaire, d'après M. Kirchhoff.** — Pour expliquer la production des raies obscures dans le spectre de la lumière solaire, il suffit d'admettre, avec M. Kirchhoff, que le noyau solide ou liquide de l'astre est enveloppé d'une *photosphère gazeuse*, dont l'éclat est notablement inférieur au sien. Sans la présence de cette photosphère, le noyau enverrait une lumière qui produirait un spectre continu (811); mais la photosphère se comporte, par rapport à la lumière émise par le noyau, comme la flamme d'alcool salé par rapport à la lumière émise par la chaux incandescente, c'est-à-dire que la lumière du noyau perd, en traversant la photosphère, la plus grande partie des rayons dont la réfrangibilité correspond à ceux que la photosphère émet elle-même.

M. Kirchhoff a déterminé, avec le plus grand soin, la position des raies obscures du spectre solaire, pour la comparer à celle des raies brillantes des corps connus : on voit, en effet, que si l'on constate une coïncidence exacte entre certaines raies *obscures* du spectre solaire et les lignes *brillantes* fournies par un corps à l'état gazeux, on en pourra conclure la présence de ce corps dans la photosphère du soleil. De là la possibilité d'une véritable *analyse de l'atmosphère solaire*, analyse qui a déjà fourni les résultats les plus remarquables. — L'hydrogène, le sodium, le calcium, le magnésium, le fer, le chrome, le zinc, font partie de l'atmosphère du soleil : pour le fer, en particulier, cette asser-

(\*) Léon Foucault, en éclairant une fente dans une moitié de sa longueur par la lumière solaire, et dans l'autre moitié par l'arc voltaïque, avait constaté la coïncidence entre la bande obscure D de la lumière solaire et la bande jaune brillante signalée par tous les observateurs dans la lumière électrique et dans la plupart des lumières artificielles. De plus, en faisant passer la lumière solaire au travers d'un arc voltaïque, dont l'éclat est moindre, il avait observé que la bande obscure D du spectre devenait beaucoup mieux accusée que dans le spectre solaire ordinaire. — Swann avait montré également que la présence de la bande jaune brillante, dans les spectres de la plupart des lumières artificielles, tient à ce qu'il suffit de traces presque imperceptibles de chlorure de sodium dans une flamme, pour faire apparaître cette bande brillante. — Jusqu'à M. Kirchhoff, ces diverses observations étaient restées à peu près isolées.

tion est fondée sur la concordance entre un nombre considérable de raies brillantes du spectre fourni par le métal en vapeur, et des raies obscures observées dans le spectre solaire.

815. **Raies telluriques.** — Certaines bandes obscures, observées dans le spectre solaire, doivent être considérées comme ayant pour origine l'absorption de certains rayons lumineux par l'atmosphère de la terre : elles augmentent d'intensité quand le soleil s'approche de l'horizon, parce que la couche d'air traversée par les rayons solaires est alors plus épaisse : ces bandes ont reçu le nom de *raies telluriques*.

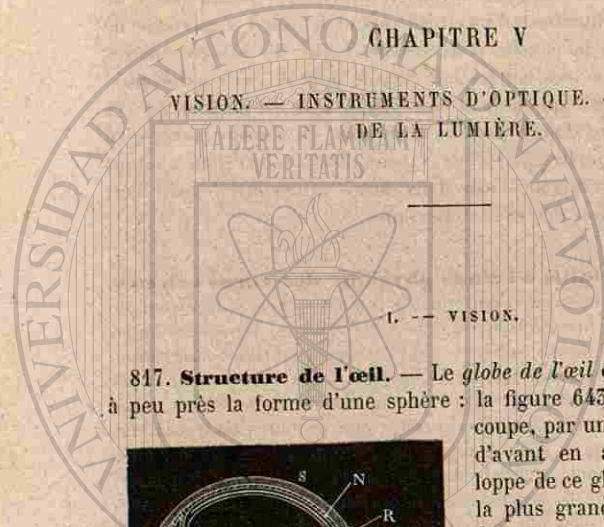
M. Jansen a montré qu'on peut faire apparaître la plupart de ces raies, dans le spectre d'une lumière artificielle, en faisant traverser à cette lumière une couche épaisse de vapeur d'eau : c'est donc surtout à la présence de la vapeur d'eau dans notre atmosphère, qu'il faut attribuer la production des raies telluriques.

#### 816. Résultats relatifs à l'étude physique des corps célestes.

— Les *planètes* ne nous renvoyant que la lumière qu'elles reçoivent du soleil, on devait s'attendre à retrouver, dans leurs spectres, les mêmes lignes obscures que dans le spectre solaire : c'est ce que confirme l'observation. Mais une étude attentive a montré que les spectres fournis par Jupiter et par Saturne présentent, même quand ces astres sont bien au-dessus de notre horizon, des raies obscures, analogues à celles que produit l'absorption due à la présence de la vapeur d'eau dans l'atmosphère terrestre. On est ainsi conduit à admettre, comme d'autres observations l'avaient déjà fait penser, qu'il existe, à la surface de ces planètes, de grandes nappes d'eau, entretenant leur atmosphère dans un état d'humidité continue. — Quant à la lune, l'analyse spectrale, aussi bien que les autres modes d'observation, indique qu'elle n'a pas d'atmosphère gazeuse.

Les *étoiles* émettant une lumière propre, l'étude des spectres qu'elles fournissent présente un intérêt tout particulier. — Pour toutes les étoiles proprement dites, on obtient des spectres *continus*, sillonnés de raies obscures : ces astres sont donc constitués, comme le soleil, par un noyau solide ou liquide, entouré d'une atmosphère absorbante. La nature chimique de cette atmosphère pourra être révélée par la position des lignes obscures, dans le spectre de chacune d'elles.

Quant aux *nébuleuses non résolubles*, c'est-à-dire dans lesquelles les instruments les plus puissants ne distinguent qu'une sorte de nuage lumineux, elles fournissent, en général, un spectre formé de quatre lignes brillantes se détachant sur un fond obscur. Cette apparence est celle qui caractérise les corps entièrement gazeux : deux des raies brillantes appartiennent à l'hydrogène ; les deux autres peuvent être attribuées à l'azote et au baryum.



CHAPITRE V

VISION. — INSTRUMENTS D'OPTIQUE. — VITESSE DE LA LUMIÈRE.



817. **Structure de l'œil.** — Le globe de l'œil offre, chez l'homme, à peu près la forme d'une sphère : la figure 645 en représente une coupe, par un plan vertical dirigé d'avant en arrière. — L'enveloppe de ce globe est formée, pour la plus grande partie de sa surface, par une membrane blanche et opaque SS, à laquelle sa consistance a fait donner le nom de *sclérotique* (σκληρός, dur). — A la partie antérieure, la sclérotique est remplacée par une membrane incolore et transparente C, dont la surface a la forme d'une portion de sphère, d'un rayon plus petit que celui de la sclérotique :

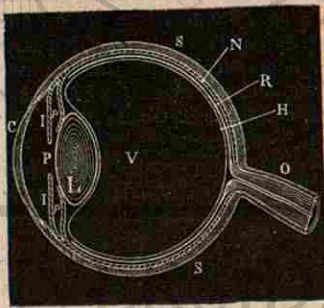


Fig. 645. — Coupe du globe de l'œil.

on lui donne le nom de *cornée transparente*, pour la distinguer de la sclérotique qu'on nomme aussi quelquefois *cornée opaque*.

A l'intérieur du globe, derrière la cornée et à une petite distance, se trouve une cloison membraneuse verticale, perpendiculaire à l'axe de l'œil : c'est l'*iris* I, I, percé en son centre d'une ouverture circulaire, la *pupille* P. La membrane de l'iris offre, chez les divers individus, des colorations différentes, variant du bleu au brun le plus foncé. — Derrière la pupille, à une très petite distance, se trouve une lentille convergente, le *crystallin* L : cette lentille est formée de couches

superposées, dont les indices de réfraction vont en croissant des parties superficielles aux parties profondes; elle est contenue dans une poche membraneuse et diaphane, qu'on nomme la *capsule du cristallin*, et maintenue en avant par les *procès ciliaires* p, p.

La cavité du globe est ainsi séparée, par le cristallin et les procès ciliaires, en deux cavités n'offrant entre elles aucune communication. — La première, située en avant du cristallin, est remplie d'une humeur limpide et incolore, l'*humeur aqueuse*. — La seconde, qui occupe les deux tiers postérieurs de l'œil, renferme un liquide plus consistant : c'est l'*humeur vitrée*, entourée par la *membrane hyaloïde* H.

Enfin, par la partie postérieure de l'œil, pénètre un nerf remarquable par sa grosseur, le *nerf optique* O. Ce nerf, après avoir traversé la sclérotique, s'épanouit en une membrane mince, la *rétine* R : celle-ci est séparée de la sclérotique, dont elle suit le contour, par une couche de matière noire ou *pigment*, supportée par une membrane intermédiaire, la *choroïde* N.

818. **Actions exercées par les diverses parties de l'œil sur les rayons lumineux.** — Considérons des rayons lumineux émis par un point extérieur. La cornée transparente C, ayant partout une épaisseur sensiblement constante, se comporte comme une lame à faces parallèles, et tout se passe comme si les rayons pénétraient de l'air dans l'humeur aqueuse : chacun de ces rayons est dévié vers l'axe de l'œil. — Les rayons qui ont ainsi pénétré n'arrivent pas tous au cristallin; l'iris remplit le rôle d'un diaphragme (786), et intercepte ceux qui seraient trop distants de l'axe : c'est la diffusion de ces rayons sur l'iris qui rend cette membrane visible à l'extérieur, avec la coloration qui lui est propre (\*).

Le cristallin, placé entre deux milieux dont les indices de réfraction sont peu différents, agit comme une lentille convergente sur les rayons qui ont traversé la pupille, c'est-à-dire qu'elle les fait converger davantage (\*\*). — Enfin ces rayons vont rencontrer la rétine : l'impression produite sur cette membrane nerveuse est transmise par le nerf optique, et donne naissance à la sensation lumineuse.

819. **Formation des images au fond de l'œil.** — Si l'on prend

(\*) L'ouverture de la pupille éprouve des variations de grandeur qui sont surtout en rapport avec l'éclat de la lumière qui arrive à l'œil. Lorsque l'on considère avec attention un œil fixé sur un objet peu lumineux, on constate que l'ouverture de la pupille s'agrandit, de manière à laisser arriver sur le cristallin le plus grand nombre possible de rayons. Au contraire, quand l'œil regarde un objet très brillant, la pupille se resserre, afin de diminuer la quantité de lumière qui, en arrivant sur la rétine, produirait sur elle une impression pénible.

(\*\*) Le cristallin étant formé de couches successives, dont l'indice de réfraction va en décroissant à mesure qu'elles s'éloignent du centre, les rayons les plus distants de l'axe sont moins déviés que si la lentille présentait partout le même indice de réfraction qu'au centre. On conçoit donc que les rayons émanés d'un même point puissent concourir en un foyer, sans aberration de sphéricité appréciable.

un œil de bœuf et que, après avoir aminci la sclérotique jusqu'à la rendre transparente à sa partie postérieure, on place une bougie à 50 ou 40 centimètres en avant de la cornée; on voit, en regardant par derrière, se peindre sur le fond de l'œil une petite image *renversée* de la bougie.

L'ensemble des milieux de l'œil se comporte donc comme un *système convergent*, qui concentre, sur les divers points de l'écran formé par la rétine, les rayons lumineux émanés des divers points d'un objet placé en avant. Les rayons émis par un point P, placé sur l'axe même de l'œil (*fig. 646*), viennent faire leur foyer en un point P' situé sur ce même axe; les rayons émanés d'un point A, placé à une petite distance de l'axe, viennent converger en un point A', situé sur un axe secondaire passant par le point A; il en est de même des rayons émis par le point B, ou par les autres points d'un objet AB. Quant au centre optique C, par lequel passent ces axes secondaires, on est conduit à admettre qu'il est situé un peu au delà de la seconde surface du cristallin.

La construction géométrique s'accorde avec l'expérience pour montrer que l'image est *renversée*, et plus petite que l'objet. Malgré ce *renversement de l'image*, nous voyons les objets dans leur situation véritable. Il en faut simplement conclure que les éléments nerveux de la rétine et du nerf optique possèdent des propriétés physiologiques telles, que si un point A' de la rétine se trouve au point de concours d'un faisceau lumineux convergent, nous *rapportons* la position du point extérieur, d'où émane le faisceau divergent qui lui a donné naissance, en l'un des points de l'axe secondaire A'CA : il en est de même de B' et de tous les autres points de la rétine (\*).

**820. Vision à différentes distances. — Distance minimum de la vision distincte.** — L'expérience de chaque jour montre que, pour les vues ordinaires, la vision peut être nette, pour des objets placés à des distances très diverses. — Nous voyons nettement des objets placés à une distance qu'on peut considérer comme infinie : c'est ainsi que, si l'atmosphère est bien transparente, la lune nous apparaît avec des contours arrêtés. Il en est encore de même pour les objets terrestres, placés à des distances de plus en plus petites. — Cependant la vision ne conserve sa netteté que si la distance ne devient pas inférieure à une limite déterminée, qui est de 15 à 20 centimètres pour les vues ordinaires, et qui varie avec les individus : c'est ce qu'on peut appeler la *distance minimum de la vision distincte*. — Quand la distance des

(\*) Si quelques personnes croient trouver une difficulté dans la position renversée de l'image, c'est qu'elles tendent toujours à assimiler l'image formée sur la rétine aux images que nous obtenons sur des écrans extérieurs, et que nous percevons comme nous percevrions des objets. Cette assimilation n'a évidemment aucune raison d'être.

objets descend au-dessous de cette limite, leurs contours nous paraissent troubles et estompés, et tous les détails se confondent.

Or, les physiiciens et les physiologistes s'accordent à admettre que la vision ne peut avoir de netteté, qu'autant que les rayons lumineux forment, sur la rétine, *une image ayant elle-même une netteté parfaite*. Il reste donc à expliquer comment ces images peuvent continuer d'être nettes, pour des objets placés à des distances très différentes. Il est aujourd'hui démontré que, pour les vues ordinaires, l'œil est construit de façon à concentrer sur la rétine, naturellement et *sans effort*, les rayons émanés des objets *très éloignés*; mais que le même résultat est obtenu, pour des distances successivement décroissantes, par une *accommodation* particulière, dont le mécanisme réside principalement dans un changement de courbure des faces du cristallin, s'effectuant sous l'influence de contractions musculaires (\*).

D'après cela, les diverses particularités de la vision à différentes distances sont faciles à concevoir : — Pour les objets très éloignés, la vision est nette, parce que l'image formée sur la rétine l'est elle-même, et cela, sans qu'il soit besoin d'aucun effort. Quant aux petits *détails* des objets, ils ne sont pas perceptibles, parce que l'image rétinienne totale est extrêmement petite par rapport à l'objet, et que les points de l'objet qui sont rapprochés les uns des autres forment leurs foyers en des points extrêmement voisins. Or, la rétine est constituée par des éléments nerveux qui ont des diamètres appréciables (0,003 de millimètre environ) : si un même élément correspond aux foyers de plusieurs points de l'objet, il ne peut transmettre qu'une impression unique et mixte. — L'objet se rapprochant jusqu'à la distance à laquelle on place des caractères d'imprimerie de dimension ordinaire pour lire sans fatigue, l'image peut encore conserver sa netteté, avec des modi-

(\*) Ces changements de courbure peuvent être manifestés de la manière suivante. Lorsqu'on présente une bougie à l'œil d'une personne placée dans une chambre obscure, on distingue facilement, en regardant l'œil au moyen d'une loupe fixée au fond d'un tube, trois images de la bougie. — Celle de ces trois images qui est la plus rapprochée du spectateur est *droite et virtuelle* : c'est celle qui a été observée par tout le monde, et qui est formée par la réflexion des rayons sur la convexité de la cornée (764). Celle qui est la plus éloignée est également *droite et virtuelle*; elle est due à la réflexion sur la face antérieure du cristallin. Enfin, on aperçoit, entre les deux précédentes, une image *renversée et réelle* qui est produite par la réflexion sur la concavité de la face postérieure du cristallin (758, 1<sup>re</sup>). — Or si, laissant toujours la bougie en présence de l'œil, on fait regarder successivement, à la personne en expérience, d'abord un objet très éloigné, puis un objet situé à 15 ou 20 centimètres, on voit la première image de la bougie rester fixe, ce qui indique que la cornée ne change pas de forme. Mais, au moment où l'œil se fixe sur l'objet rapproché, on voit la seconde image droite s'avancer vers le spectateur, ce qui prouve que la face antérieure du cristallin devient *plus convexe*; l'image renversée éprouve aussi un petit déplacement, accusant une faible variation de courbure de la face postérieure. — L'anatomie a démontré, dans les membranes qui assujettissent le cristallin, la présence de fibres musculaires, à la contraction desquelles peuvent être attribués ces changements de courbures.

le nom de *diamètre apparent* d'un objet linéaire AB (fig. 646), dans une position déterminée, l'angle ACB formé par les droites menées du centre optique de l'œil aux extrémités de l'objet.

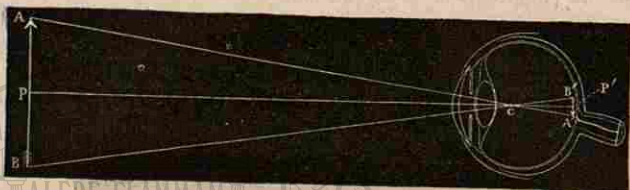


Fig. 646. — Diamètre apparent d'un objet.

Pour rendre compte de cette dénomination, concevons plusieurs objets tels que AB, placés à une même distance CP, et assez petits par rapport à CP pour que l'angle ACB soit toujours très petit lui-même. Pour chacun de ces objets, la dimension de l'image A'B' sur la rétine, dimension à laquelle il est naturel de donner le nom de *diamètre apparent*, est telle que l'on ait  $\frac{A'B'}{CP'} = \frac{AB}{CP}$ ; or,  $\frac{AB}{CP}$  n'est autre chose que le double de la tangente de l'angle ACP, ou sensiblement, eu égard à la petitesse des angles, la mesure de l'angle ACB lui-même. On peut donc écrire

$$A'B' = CP' \times \text{angle ACB};$$

on voit donc que, si la distance CP' reste constante, la dimension A'B' est proportionnelle à l'angle ACB (\*). — Quand l'œil compare deux objets situés à une même distance, c'est par le rapport des diamètres apparents qu'il juge du rapport des grandeurs des objets eux-mêmes.

Remarquons enfin que, si un même objet est placé successivement à différentes distances, son diamètre apparent diminue à mesure qu'il s'éloigne. Il est donc impossible que l'œil apprécie, par la seule comparaison des diamètres apparents, les rapports de grandeurs de plusieurs objets situés à des distances différentes; avec cette notion seule, et sans la notion des *distances*, il serait exposé aux erreurs les plus grossières.

**825. Angle optique. — Estimation des distances.** — On nomme *angle optique*, l'angle formé par les axes des deux yeux, lorsqu'ils sont dirigés simultanément vers un même point.

Si l'on compare deux points placés à des distances différentes, l'angle optique correspondant au point le plus éloigné est le plus petit. — Or, pour chacun de nous, le sens du toucher a donné au sens de la vue une

(\*) Cet angle reçoit encore quelquefois le nom d'*angle visuel*.

sorte d'éducation, d'après laquelle nous avons conscience de la valeur de l'angle que font les axes de nos deux yeux quand ils sont fixés, par exemple, sur un point situé à 50 ou 40 centimètres; à mesure que cet angle devient plus petit, nous jugeons que la distance du point augmente.

Mais ces évaluations deviennent tout à fait incertaines quand il s'agit de points très éloignés; l'angle optique est alors très petit, et ne varie plus que de quantités insensibles avec la distance. — C'est ainsi que nous ne pouvons nous faire aucune idée de la distance d'une étoile, ni même d'un phare placé sur une côte un peu éloignée.

**824. Évaluation des grandeurs absolues des objets.** — C'est en combinant les données qui nous sont fournies, d'une part sur les *diamètres apparents* des objets, d'autre part sur les *distances* qui nous en séparent, que nous jugeons de leur grandeur. — Ce jugement présente, en général, une certaine précision, lorsque le faible éloignement des objets nous permet d'en évaluer la distance avec assez d'exactitude. Aussi, apprécions-nous assez bien les dimensions des corps placés à quelques mètres de nous.

Lorsque les objets sont très éloignés, nous ne pouvons en apprécier la distance que d'une manière approximative: l'œil juge alors de la distance plus ou moins grande des objets par leur éclat relatif, la lumière qui arrive à l'œil, éprouvant dans l'atmosphère une absorption progressive qui en diminue l'intensité. Chaque observateur, selon l'expérience qu'il a pu acquérir, arrive ainsi à une sûreté de jugement plus ou moins grande. Ce jugement peut cependant être mis en défaut s'il a à s'exercer dans des contrées où l'atmosphère présente une transparence beaucoup plus grande ou beaucoup plus faible que celle de la contrée où l'éducation de l'œil s'est faite: on peut être amené à des erreurs d'évaluation considérables. — Lorsque, parmi les objets observés, il s'en trouve un de dimension connue, un homme, un cheval, etc., l'évaluation de la distance acquiert immédiatement une précision plus grande par la perception du diamètre apparent de cet objet lui-même. — C'est ce qui justifie l'emploi des objets animés dans la peinture de paysages, pour contribuer, avec les dégradations de teintes, à rendre plus complètes les illusions de perspective.

**825. Unité de l'impression produite dans les deux yeux.** — Lorsque nos deux yeux sont fixés simultanément sur un même point lumineux, nous ne voyons, en général, malgré la formation des deux images, qu'un seul point.

L'observation a montré que cette *unité d'impression* exige la réunion de deux conditions physiques: 1° que les axes des deux yeux convergent vers le point lumineux; 2° que les images produites sur les deux rétines occupent des positions rigoureusement correspondantes. — Si ces conditions ne sont pas simultanément réalisées, la sensation est double.

C'est ainsi, par exemple, que si l'on vient à déranger l'axe de l'un des yeux, en exerçant sur lui une légère pression, les objets paraissent doubles. C'est ainsi encore que, si nos deux yeux sont dirigés vers un point situé à une distance déterminée, dans le plan de symétrie de notre corps, tout point situé dans ce même plan, à une distance plus grande ou plus petite, nous paraît double.

826. **Appréciation du relief. — Stéréoscope.** — Les corps qui présentent des reliefs, lorsqu'ils sont placés à une petite distance, ne produisent pas dans les deux yeux des images identiques : les deux yeux n'ayant pas la même position par rapport à l'objet, l'un d'eux peut découvrir certains points qui sont masqués pour l'autre, et réciproquement. — Ce sont ces deux sensations, produites *simultanément* par deux images un peu différentes, qui donnent lieu à la perception des reliefs.

La meilleure preuve qu'on en puisse fournir est l'illusion qu'on éprouve, quand on a laissé quelques instants les yeux fixés sur les images du *stéréoscope*. — Les deux images que l'on place dans l'instrument, en face des verres grossissants, ne sont pas identiques : elles reproduisent les deux aspects sous lesquels on aurait vu les objets, placés à une distance convenable, en les fixant *successivement* avec chacun des deux yeux. L'effet de l'instrument est de diriger les rayons provenant de ces deux images, comme s'ils partaient d'un objet unique situé entre elles, et à une distance telle que la vision soit distincte. On sait que l'illusion du relief est complète, quand les images sont bien construites et quand l'instrument est adapté à la vue de l'observateur

II. — INSTRUMENTS D'OPTIQUE.

827. **Microscope solaire.** — Le microscope solaire est destiné à donner des images réelles et considérablement agrandies d'objets très petits.

La partie essentielle de l'appareil est une lentille convergente LL' (fig. 647) ayant une très petite distance focale principale;  $f$  et  $f'$  sont ses deux foyers. L'objet AB est placé en face de cette lentille, à une distance CP un peu supérieure à la distance focale principale Cf' : il se forme une image réelle et renversée A'B', beaucoup plus grande que l'objet : on la reçoit sur un écran, dans la chambre obscure où sont placés les spectateurs (\*).

La lentille PQ et le miroir MN constituent un *système éclairant*. En

(\*) La figure 647 représente la marche des rayons lumineux. Parmi les rayons émanés du point A, on a figuré, en particulier, celui qui est parallèle à l'axe principal; après réfraction, il passe au foyer  $f$ , et rencontre l'axe secondaire ACA' au point A', où se fait l'image du point A. L'image du point B a été déterminée de la même manière.

effet, l'image A'B' étant beaucoup plus grande que l'objet, et n'étant formée que par le concours des rayons émis par l'objet sur la lentille LL', il est indispensable d'éclairer fortement l'objet, pour que l'image ait un éclat suffisant. — Les rayons du soleil, reçus sur le miroir plan MN qui est placé à l'extérieur de la pièce où se fait l'observation, sont réfléchis sur la lentille PQ, qui les concentre dans une très petite

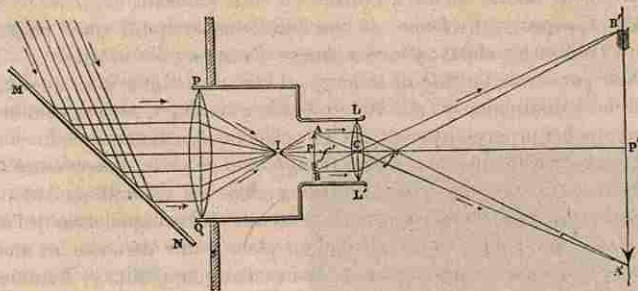


Fig. 647. — Microscope solaire.

région I. On place l'objet AB un peu au delà de cette région ; les rayons transmis ou diffusés par l'objet viennent alors tomber sur la lentille LL' (\*). L'objet est fixé entre deux lames de verre, maintenues par un *porte-objet* dont on fait varier la distance à la lentille LL' de manière à *mettre au point*, c'est-à-dire à obtenir, sur l'écran placé dans une position déterminée, une image aussi nette que possible.

On appelle *grossissement linéaire* le rapport de deux dimensions homologues de l'image et de l'objet. — Pour le mesurer, on introduit dans l'appareil, à la place de l'objet AB, un *micromètre* consistant en une petite lame de verre sur laquelle le constructeur a tracé, à l'aide d'une machine spéciale, des traits distants entre eux d'un centième de millimètre. Si l'on trouve que la distance des images de deux traits consécutifs, sur l'écran, est de 2 millimètres, on en conclura que le grossissement linéaire est représenté par 200.

Si l'on veut en déduire le *grossissement superficiel*, c'est-à-dire le rapport entre la surface de l'image et celle de l'objet, on remarquera que, l'image et l'objet étant des figures semblables, le rapport de leurs surfaces est égal au rapport des carrés de leurs dimensions homologues; en d'autres termes, le grossissement superficiel est exprimé par le *carré du grossissement linéaire*. Ainsi, dans l'exemple précédent, le grossissement superficiel serait représenté par 40 000.

La *lanterne magique*, dont l'invention, due au P. Kircher, remonte au

(\*) A défaut de la lumière solaire, on peut employer des lumières artificielles d'une grande intensité, comme la lumière de Drummond ou la lumière électrique.



dix-septième siècle, repose sur les mêmes principes que le microscope solaire; elle donne des images réelles et amplifiées de divers objets, peints ou photographiés sur des lames de verre. — L'éclaircissement est produit par une lampe ordinaire, munie d'un réflecteur, et par une lentille convergente qui concentre la lumière sur la lame de verre. Le grossissement étant beaucoup moindre que celui du microscope solaire, cet éclaircissement donne encore à l'image un éclat suffisant.

828. **Loupe.** — La loupe est une lentille convergente que l'on place entre l'œil et les objets, pour en mieux distinguer les détails.

Pour concevoir l'utilité de la loupe, il faut remarquer que, lorsqu'on cherche à distinguer à l'œil nu les détails d'un objet, on est conduit à le rapprocher progressivement de l'œil: chacune des dimensions linéaires de l'image rétinienne, ou le *diamètre apparent* de cette dimension (822), grandit en raison inverse de la distance, mais cet agrandissement progressif a une limite, déterminée par la faculté d'accommodation de l'œil, qui exige que l'objet vu à l'œil nu soit placé à une distance au moins égale à la distance minimum de la vision distincte (820). — L'interposition de la loupe a pour effet de substituer à l'objet une image virtuelle dont le diamètre apparent est supérieur à celui qu'aurait l'objet s'il était placé à la même distance.

Soient LL' une lentille convergente (fig. 648), C son centre optique, F

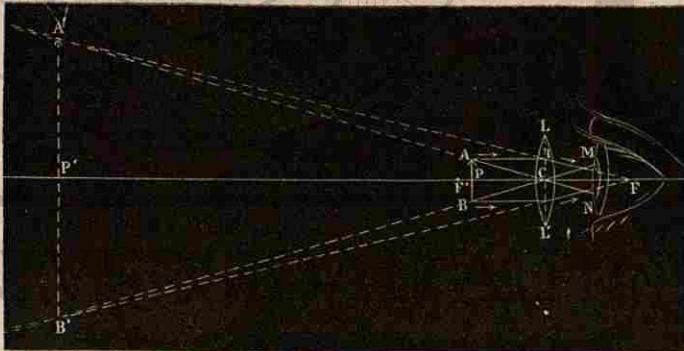


Fig. 648. — Formation des images dans la loupe.

et F' ses foyers principaux. D'après ce qu'on a vu (794, 5°), pour qu'un objet AB donne une image virtuelle, il faut que la distance CP soit moindre que la distance focale principale CF'. La figure 648 indique la construction géométrique des deux extrémités de cette image. L'œil, étant placé le plus près possible de la loupe, reçoit la plus grande partie des faisceaux lumineux émis par les divers points de AB, et transmis par la lentille, comme s'ils émanaient des points correspondants

de A'B'. — Or, en se reportant à la figure 628, on voit que, si l'on fait varier CP depuis CF' jusqu'à zéro, la distance CP' varie depuis l'infini jusqu'à zéro. On peut donc toujours, par tâtonnements, régler la distance CP de l'objet à la lentille, jusqu'à ce que la distance de l'œil à l'image A'B' soit égale à la distance minimum de la vision distincte. C'est ce que l'on appelle *mettre l'image au point*. — La figure 648 suppose cette condition réalisée.

829. **Grossissement de la loupe.** — Nous appellerons *grossissement linéaire* de la loupe, le rapport des *diamètres apparents* de deux dimensions homologues de l'image et de l'objet, en supposant que l'image soit placée à la distance minimum de la vision distincte, et que l'objet soit vu à l'œil nu à la même distance.

Pour calculer le grossissement, nous supposons que l'œil est placé très près de la loupe, de manière que le centre optique de l'œil et celui de la lentille se confondent sensiblement.

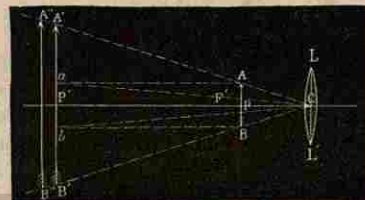


Fig. 649.

Soient AB (fig. 649) une dimension de l'objet, A'B' la dimension homologue de l'image virtuelle, placée à une distance CP' égale à la distance minimum de la vision distincte. Reportons AB à la même distance, en ab; le grossissement, tel que nous venons de le définir, aura pour expression  $\frac{A'CB'}{aCb}$ , ou  $\frac{A'CP'}{aCP'}$ . Mais, les angles A'CP' et aCP' étant assez petits, on peut remplacer leur rapport par celui de leurs tangentes  $\frac{A'P'}{P'C}$  et  $\frac{aP'}{P'C}$ ; en supprimant alors le diviseur commun P'C, il vient

$$G = \frac{A'P'}{aP'} = \frac{A'P'}{AP} = \frac{A'B'}{AB}$$

Le grossissement peut donc, dans ce cas, s'estimer par le rapport entre les *grandeurs* de deux dimensions homologues de l'image et de l'objet. Or, les triangles semblables ACB et A'CB' donnent  $\frac{A'B}{AB} = \frac{CP'}{CP}$ ; si donc on désigne par D la distance minimum de la vision distincte, et par p la distance CP, on a exactement  $G = \frac{D}{p}$ ; enfin, si l'on remarque que p diffère peu de la distance focale principale f, on pourra prendre, comme mesure approchée du grossissement linéaire,

$$G = \frac{D}{f}$$

On voit que le grossissement est d'autant plus grand, pour une même personne, que la distance focale  $f$  est plus petite, ou, comme on dit vulgairement, que la loupe est à *plus court foyer*.

— Mais on ne peut diminuer la distance focale d'une lentille mince, qu'en augmentant la courbure de ses faces, et en diminuant son diamètre (le plus ordinairement, le diamètre de la loupe est à peu près égal à la moitié de sa distance focale). Dès lors, les loupes qui présentent un grand diamètre, comme B (fig. 650), sont des loupes peu grossissantes; celles qui ont un petit diamètre, comme A, donnent un grossissement plus grand.

Quand on emploie des loupes très grossissantes, comme celles qui servent à certaines observations d'histoire naturelle, on les fixe ordinairement à un support, au-dessus d'un *porte-objet* dont on peut régler la distance à la loupe au moyen d'une crémaillère. L'appareil ainsi construit reçoit quelquefois le nom de *microscope simple*.

Fig. 650. — Loupes.

850. **Puissance de la loupe.** — L'expression exacte du grossissement est, comme on vient de le voir,  $G = \frac{D}{p}$ . Si l'on remarque que les points P et P' (fig. 649), sont conjugués, on a :

$$\frac{1}{p} - \frac{1}{D} = \frac{1}{f}, \quad \text{d'où} \quad \frac{D}{p} = \frac{D}{f} + 1.$$

La valeur exacte du grossissement,  $G = \frac{D}{f} + 1$ , montre que, avec une même loupe, le grossissement augmente à mesure que D augmente; il semble, alors que chaque observateur devrait faire en sorte que l'image se formât à la plus grande distance compatible avec sa vue. — La pratique montre, au contraire, que chaque observateur, une fois l'œil placé derrière la loupe, tend à placer l'objet de manière à rapprocher l'image à la distance minimum de sa vision distincte.

Cela tient à ce que chaque observateur cherche, en réalité, à voir une dimension déterminée de l'objet sous le plus grand angle possible; la *puissance* d'une loupe, pour chaque observateur, peut donc être définie par le *plus grand diamètre apparent* sous lequel elle lui permet de voir l'unité de longueur prise sur l'objet. — Or l'unité de longueur prise sur l'objet, acquiert dans l'image une grandeur égale à G; par suite, son diamètre apparent a pour mesure  $\frac{G}{D}$ . — En remplaçant D par sa valeur  $\frac{D}{f} + 1$ , on est ainsi conduit à représenter la puissance P de la loupe par l'expression

$$P = \frac{1}{f} + \frac{1}{D}.$$

Cette expression, bien mieux que le grossissement G, est propre à faire juger du degré d'utilité d'une loupe. — On comprend ainsi que, pour un même observateur, il y a avantage à donner à D la plus petite valeur possible. On voit également que les vues myopes sont plus avantageuses que les vues presbytes, pour les observations à la loupe.

851. **Défaut d'achromatisme de la loupe simple.** — **Loupes composées.** — La marche des rayons lumineux qui traversent une loupe semble indiquer, au premier abord, que l'achromatisme doit se produire de lui-même, et que jamais les images ne doivent paraître irisées. Si, en effet, l'image formée par les rayons rouges partis du point A (fig. 649) vient se faire en un point A' de l'axe secondaire AC, l'image formée par les rayons violets partis du même point devra se produire en un point A'' du même axe secondaire. Le centre optique de l'œil étant supposé très près du point C, les deux images du point A seront vues dans la même direction CAA'' et paraîtront se superposer. — Cependant, l'expérience montre que les contours des images données par la loupe sont toujours irisés. Or, ces irisations sont d'autant plus marquées que les courbures des deux faces sont plus prononcées; cette dernière observation montre que le défaut d'achromatisme est dû à l'aberration de sphéricité (786), laquelle n'est pas la même pour les rayons rouges que pour les rayons violets.

En employant, au lieu d'une lentille unique, une *loupe composée*, c'est-à-dire un système de deux lentilles présentant des courbures moindres, et fixées à peu de distance l'une de l'autre, on peut obtenir, avec un même grossissement, des images bien moins irisées.

### 852. Microscope composé.

— Le *microscope composé* est formé par la réunion d'un *objectif* convergent, disposé de manière à donner une image réelle, plus grande que l'objet, et d'un *oculaire* fonctionnant par rapport à cette image comme une loupe, c'est-à-dire lui substituant une image virtuelle qui est encore agrandie (\*).

(\*) L'invention du microscope composé remonterait, suivant certains auteurs, à la fin du seizième siècle, et serait due au lunettier Zacharias Jansen, de Middlebourg; d'autres l'attribuent au naturaliste Leuwenhoek, dont les travaux datent de la fin du dix-septième siècle.

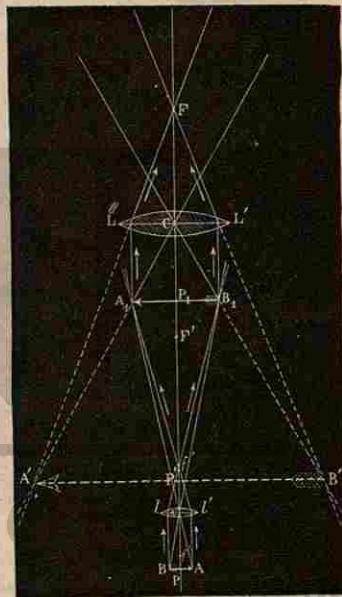


Fig. 651. — Formation des images dans le microscope composé.

La figure 651 indique la marche des rayons :  $U$  est l'objectif, dont les foyers sont en  $f$  et en  $f'$ ;  $LL'$  est l'oculaire, dont les foyers sont en  $F$  et  $F'$ . — L'objet  $AB$ , placé à une distance  $Pc$  de l'objectif un peu supérieure à la distance focale principale  $f'$ , donne une image réelle  $A_1B_1$ , renversée et agrandie. L'oculaire  $LL'$  est placé à une distance  $P_1C$  de l'image  $A_1B_1$ , inférieure à sa distance focale principale  $F_1C$ ; les rayons

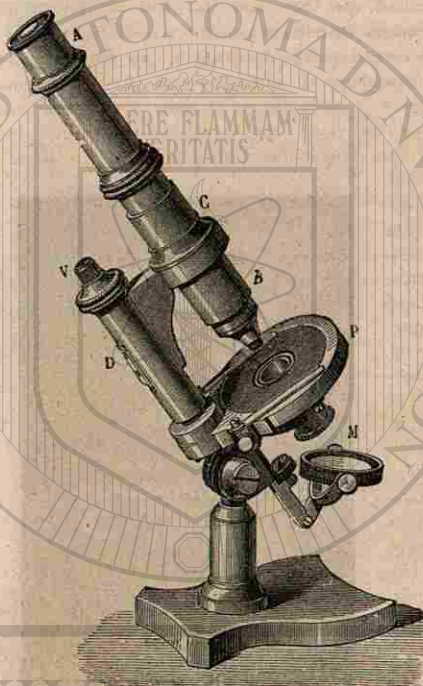


Fig. 652. — Microscope composé.

qui se sont croisés aux différents points de l'image aérienne  $A_1B_1$ , se comportent par rapport à l'oculaire comme s'ils émanaient d'un objet placé en  $A_1B_1$  : il se forme une image virtuelle  $A'B'$ , visible pour l'œil placé au delà de l'oculaire (\*). — En réglant convenablement les diverses distances, on amène cette image virtuelle à se former, pour chaque observateur, à la distance minimum de la vision distincte.

#### 855. Pièces accessoires du microscope.

— L'oculaire et l'objectif sont assujettis dans un tube métallique  $AB$ , supporté par un collier  $C$  (fig. 652), les objets, placés entre deux lames de verre mince, sont déposés sur la plaque  $P$  ou porte-objet, au-dessus de l'ou-

(\*) Dans la figure 651, on a effectué d'abord, pour déterminer les extrémités de l'image réelle  $A_1B_1$ , les constructions qui ont été indiquées pour le microscope solaire (827); ensuite, pour déterminer les extrémités de l'image virtuelle  $A'B'$ , les constructions indiquées à propos de la loupe (828).

soutient le tube du microscope, est fixé à la colonne creuse  $D$ ; une vis  $V$ , placée dans l'axe de cette colonne, permet de faire monter ou descendre la colonne elle-même, de manière à éloigner ou à rapprocher le tube  $AB$  du porte-objet, pour mettre au point.

L'objectif  $B$  est, en général, formé de deux ou trois lentilles à très court foyer, montées dans des garnitures métalliques qui s'adaptent les unes aux autres. L'oculaire  $A$  est également formé de deux lentilles convergentes, formant une loupe composée. — On a, pour un même instrument, plusieurs systèmes d'objectifs et d'oculaires, que l'on peut substituer les uns aux autres pour obtenir des grossissements variables.

854. **Grossissement du microscope.** — Le grossissement linéaire du microscope composé se définit, comme celui de la loupe, par le rapport entre les diamètres apparents de deux dimensions homologues de l'image virtuelle et de l'objet, l'image et l'objet étant supposés l'une et l'autre à la distance minimum de la vision distincte. On peut voir, par un raisonnement semblable à celui qui a été fait pour la loupe (829), que ce grossissement est égal au rapport des grandeurs de ces deux dimensions homologues, en sorte que, en se reportant à la figure 651, on a :  $G = \frac{A'B'}{AB}$ . Cette expression peut s'écrire :

$$G = \frac{A'B'}{A_1B_1} \times \frac{A_1B_1}{AB}$$

Or  $\frac{A'B'}{A_1B_1}$  représente le grossissement de l'oculaire (829);  $\frac{A_1B_1}{AB}$  mesure celui de l'objectif; donc le grossissement d'un microscope composé est exprimé par le produit des grossissements de l'objectif et de l'oculaire.

855. **Mesure expérimentale du grossissement du microscope, au moyen de la chambre claire.** — La figure 653 représente une chambre claire que l'on peut adapter aux microscopes, et qui permet d'obtenir une mesure directe du grossissement. Un petit miroir métallique  $mn$ , percé d'une ouverture, se fixe, au moyen d'une bague métallique, au-dessus de l'oculaire  $L$ , de manière à être incliné d'environ 45 degrés sur l'axe du tube : un prisme à réflexion totale  $abc$  est disposé latéralement, de façon que sa face hypoténuse soit sensiblement parallèle à  $mn$ . L'œil placé en  $O$  reçoit, au travers de l'ouverture du miroir  $mn$ , les rayons émis par l'objet  $AB$  et transmis par l'instrument. D'autre part, si l'on dispose une feuille

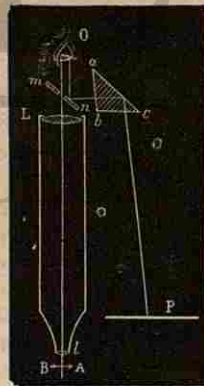


Fig. 653. — Chambre claire adaptée au microscope.

de papier P au-dessous du prisme  $abc$ , les rayons envoyés par cette feuille, se réfléchissant sur la face hypoténuse  $ac$ , puis sur le miroir  $mn$ , arrivent à l'œil suivant les mêmes directions que les rayons venus de l'objet. Pour l'observateur, l'image virtuelle de l'objet semble donc se peindre sur la feuille de papier elle-même. — Pour mesurer le grossissement, on place sur le porte-objet un micromètre tracé sur verre, comme celui qui nous a servi à mesurer le grossissement du microscope solaire (827), et l'on dispose sur la feuille de papier une règle divisée en millimètres, de manière que l'image des divisions du micromètre se projette sur la règle. Supposons que 5 divisions de la règle soient couvertes par 1 division grossie du micromètre : chacune des divisions du micromètre étant égale à 1 centième de millimètre, le grossissement linéaire sera exprimé par  $\frac{5}{0,01}$ , ou 500.

La chambre claire permet aussi de suivre avec la pointe d'un crayon, sur le papier, le contour des images données par le microscope, et d'obtenir ainsi un dessin fidèle de ces images.

**856. Champ du microscope. — Point oculaire.** — Le champ d'un microscope est l'espace dans lequel doit être compris un point extérieur, pour que son image puisse être vue par l'œil placé à l'oculaire.

Soient  $W$  (fig. 651) l'objectif,  $LL'$  l'oculaire,  $A$  un point de l'objet et  $A_1$  son foyer conjugué par rapport à l'objectif. Les rayons qui concourent à la production de l'image  $A_1$  forment, avant la réfraction, un faisceau divergent qui a pour sommet  $A$  et pour base  $W$ ; après la réfraction, un faisceau convergent qui a pour base  $W$  et pour sommet  $A_1$ . Pour que le point  $A$  soit compris dans le champ, il suffira donc que ce dernier faisceau rencontre l'oculaire. Or le faisceau  $LA_1L'$  est toujours formé de rayons qui s'écartent très peu de son axe  $cA$ ; on peut donc dire que la condition, au moins approximative, pour que le point  $A$  soit compris dans le champ, c'est que la droite  $Ac$ , menée du point  $A$  au centre optique de l'objectif, aille rencontrer l'oculaire. — De là résulte enfin que, si l'on imagine un cône ayant son sommet au centre optique  $c$  de l'objectif et s'appuyant sur les bords de l'oculaire  $LL'$ , la nappe inférieure de ce cône sera la limite du champ.

Si maintenant on considère les rayons qui forment les axes des faisceaux lumineux correspondant aux divers points du champ, ces rayons, passant tous au centre optique  $c$  de l'objectif, se comportent comme s'ils émanaient du point  $c$  lui-même, et viennent ensuite, après avoir été réfractés par l'oculaire, passer par le foyer conjugué de  $c$  par rapport à  $LL'$ ; et comme la distance  $cC$  de l'objectif à l'oculaire est toujours assez grande par rapport à la longueur focale  $CF$  de l'oculaire, le foyer conjugué de  $c$ , est situé très peu au delà du foyer  $F$ . — C'est donc en ce point que l'œil doit être placé, pour embrasser le champ tout entier. — Pour cette raison, ce point a reçu le nom de *point oculaire*.

**857. Lunette astronomique.** — La lunette astronomique comprend, comme le microscope composé, un *objectif* convergent, donnant une image réelle de l'objet, et un *oculaire* convergent, faisant fonction de loupe, et donnant une image virtuelle qui est contemplée par l'œil (\*).

Quand la lunette astronomique est destinée à l'observation d'un point lumineux très éloigné, tel qu'une étoile, l'objectif doit avoir une *surface* aussi grande que possible, afin d'admettre la plus grande quantité possible de lumière, contribuant à la formation de l'image réelle. Or, une lentille ne peut avoir une grande surface qu'à la condition d'avoir de grands rayons de courbure et, par suite, une *distance focale* considérable. — Quand on observe un objet éloigné, de diamètre apparent sensible (une planète ou un objet terrestre), le diamètre apparent de l'image virtuelle, vue dans l'instrument, est d'autant plus grand que la distance focale de l'objectif est plus grande (858). De là, la longueur qu'on est obligé de donner aux lunettes astronomiques, longueur d'autant plus grande que l'instrument est plus puissant.

La figure 654 rend compte de la formation des images. Soient  $L$  l'objectif et  $L'$  l'oculaire; l'objet est supposé à gauche de  $L$  et très éloigné.

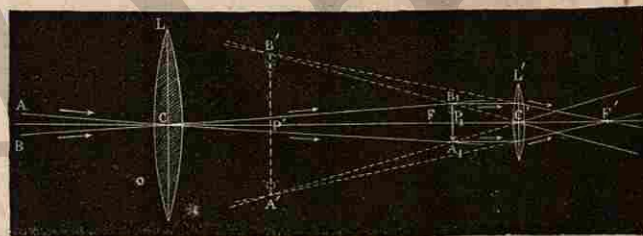


Fig. 654. — Formation des images dans la lunette astronomique.

Un peu au delà du foyer  $F$  de  $L$ , mais très près de ce foyer, se forme une image réelle, renversée et très petite, de l'objet; elle a été représentée en  $A_1B_1$ , et l'on s'est borné à tracer les axes secondaires  $ACA_1$  et  $BCB_1$  de ses extrémités. L'oculaire  $L'$ , à travers lequel on regarde l'image aérienne  $A_1B_1$ , a son foyer principal un peu à gauche de cette image, dans le voisinage du foyer  $F$ ; il substitue à cette image une image virtuelle  $A'B'$ , droite par rapport à  $A_1B_1$ , mais renversée par rapport à l'objet.

L'impossibilité où l'on est de changer la distance de l'objet à l'instrument, comme on le faisait pour le microscope, oblige ici à faire mouvoir l'oculaire, pour *mettre au point*. — L'objectif, formé par un système de lentilles achromatique, est assujéti en  $A$  à l'extrémité d'un gros tube

(\*) L'invention de la *lunette astronomique* paraît due à Zacharias Jansen, et remonte aux dernières années du seizième siècle.

de métal AB (fig. 655) : dans l'autre extrémité B, s'engagent deux tirages CD et EF, c'est-à-dire deux tubes de diamètres plus petits, dont le dernier porte l'oculaire F. Cet oculaire est toujours, comme dans le microscope, un *oculaire composé*. — Pour obtenir une image aussi parfaite que possible, on commence par faire mouvoir à la main le tube EF dans le tube CD, jusqu'à ce que l'image apparaisse avec une certaine netteté :

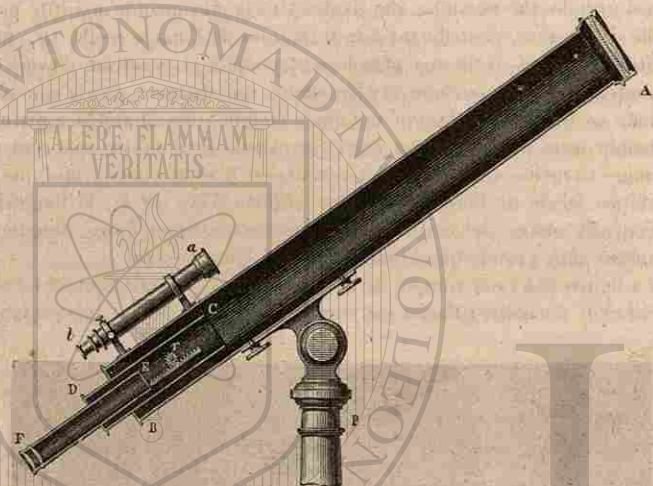


Fig. 655. — Lunette astronomique.

on achève ensuite de mettre au point, en imprimant au tube CD de petits déplacements, au moyen de l'engrenage  $r$  qui correspond à un bouton extérieur.

**858. Grossissement de la lunette astronomique.** — Dans la lunette astronomique, comme dans tous les instruments d'optique, on doit appeler *grossissement* le rapport du diamètre apparent de l'une des dimensions de l'image, vue dans l'instrument, au diamètre apparent de la dimension correspondante de l'objet vu à l'œil nu. Mais ici, la distance de l'objet ne pouvant pas varier au gré de l'observateur, il est nécessaire de considérer le diamètre apparent de l'objet tel qu'il est vu, sans instrument, dans sa position réelle.

Supposons toujours que le centre optique de l'œil et celui de l'oculaire  $L'$  (fig. 654) se confondent : le diamètre apparent de  $A'B'$  est l'angle  $A'CB'$ . Pour évaluer celui de la dimension homologue  $AB$  de l'objet, nous supposons, eu égard à la grande distance de cet objet, que l'œil soit transporté au centre optique  $C$  de l'objectif : il voit alors la dimension  $AB$  sous l'angle  $ACB$ . Le grossissement linéaire  $G$  est donc égal à  $\frac{A'CB'}{ACB}$ . Ce

rapport est égal à celui des angles  $A_1C'P_1$ , et  $A_1CP_1$ , ou à celui de leurs tangentes trigonométriques, c'est-à-dire au rapport de  $\frac{A_1P_1}{C'P_1}$  à  $\frac{A_1P_1}{CP_1}$  ; on a donc, en supprimant le facteur commun  $A_1P_1$  :

$$G = \frac{CP_1}{C'P_1}.$$

Or, l'image réelle  $A_1B_1$  se fait sensiblement au foyer  $F$  de l'objectif, lequel se confond à peu près avec le foyer de l'oculaire ; si donc on désigne par  $F$  la distance focale principale de l'objectif, et par  $f$  la distance focale principale de l'oculaire, on aura pour expression approchée du grossissement :

$$G = \frac{F}{f} (*).$$

Cette expression montre que le grossissement est d'autant plus grand que  $F$  est lui-même plus grand par rapport à  $f$  ; c'est là une remarque importante, sur laquelle nous reviendrons plus loin.

**859. Mesure expérimentale du grossissement.** — Pour déterminer par expérience le grossissement d'une lunette, on peut employer une sorte de chambre claire (fig. 656), disposée comme celle qui nous a servi pour le microscope composé (855). On dispose, à une grande distance de l'instrument, une échelle divisée ; l'œil placé comme l'indique la figure 656, voit l'échelle à travers la lunette, par l'ouverture du miroir  $m$  ; tandis que les rayons réfléchis par les deux miroirs  $m'$  et  $m$  la font voir telle qu'elle apparaîtrait à l'œil nu. Le grossissement est donné par le nombre  $n$  de divisions vues à l'œil nu qui correspondent à une seule division vue à travers la lunette.

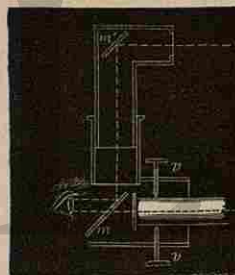


Fig. 656.

**840. Réticule. — Fixation de l'axe optique.** — Dans les recherches astronomiques, les lunettes servent surtout à déterminer exactement les *directions* dans lesquelles se trouvent les astres, par rapport à l'observateur, à un moment donné. Il est donc indispensable de fixer, dans l'instrument lui-même, une *ligne de visée*.

Pour arriver à ce résultat, on place à l'intérieur du tube, dans le

(\*) Cette approximation n'est complètement légitime que si l'on suppose l'œil adapté pour la vision à une très grande distance, puisque c'est alors seulement que l'image  $A_1B_1$  doit, pour être vue distinctement dans l'oculaire, être placée très près de son foyer. — C'est ce qu'on exprime quelquefois en disant que l'expression précédente indique la valeur du grossissement pour un œil infiniment presbyte.

plan même où se forme l'image réelle fournie par l'objectif, un *réticule* (fig. 657), c'est-à-dire un diaphragme présentant une ouverture circulaire dans laquelle sont tendus deux fils très fins, perpendiculaires entre eux : ce sont ordinairement des fils d'araignée. — Pour viser un astre, on dirige la lunette de façon que l'œil, placé derrière l'oculaire,



Fig. 657.  
Réticule.

voit l'image de cet astre coïncider avec le point de croisement des fils. Il ne peut en être ainsi que si l'astre lui-même est situé dans le prolongement de la droite qui passe par le point de croisement des fils et par le centre optique de l'objectif (789). — On voit donc que le point de croisement des fils détermine, avec le centre optique de l'objectif, une droite qui doit être considérée comme liée à la lunette elle-même, et qui sert à définir la ligne de visée. — C'est cette droite qu'on nomme l'*axe optique* de la lunette (\*).

Des cercles gradués, sur lesquels se meuvent les lunettes, servent à mesurer les angles dont on doit déplacer leur axe optique pour passer d'un astre à un autre.

**841. Champ de la lunette. — Point oculaire.** — En raisonnant comme on l'a fait pour le microscope (856), on verra encore que le *champ* est limité par la nappe antérieure d'un cône ayant son sommet au centre optique de l'objectif, et s'appuyant sur les bords de l'oculaire.

Il en résulte que, avec un même oculaire, le champ est d'autant plus petit que la distance focale principale de l'objectif est plus grande, c'est-à-dire que le grossissement de la lunette est plus considérable (858). Aussi est-il toujours difficile, avec les lunettes très grossissantes, de trouver, sur la voûte céleste, un astre déterminé, faute de pouvoir amener simultanément dans le champ les autres astres qui serviraient de repères. C'est pourquoi on adjoint, aux instruments un peu puissants, une *lunette chercheur* ab (fig. 655), ayant un grossissement beaucoup moindre et un champ beaucoup plus grand. L'axe optique du chercheur est rendu sensiblement parallèle à celui de la grande lunette, en sorte que, lorsqu'il est pointé sur un astre déterminé, celui de la grande lunette l'est au moins approximativement, et cet astre apparaît dans le champ de la vision.

Il y a, dans la lunette astronomique comme dans le microscope, un *point oculaire*, c'est-à-dire un point par lequel passent les rayons de tous les points du champ : c'est encore le foyer conjugué, par rapport à l'oculaire, du centre optique de l'objectif (856); il se confond sensi-

(\*) La *lunette du cathétomètre* (fig. 20) n'est autre chose qu'une lunette astronomique, disposée pour la vision d'objets rapprochés; c'est, en quelque sorte, un instrument intermédiaire entre la lunette astronomique et le microscope composé. L'axe optique y est déterminé, comme dans la lunette astronomique, par un réticule placé dans le plan où se fait l'image réelle donnée par l'objectif.

blement avec le deuxième foyer  $F'$  de l'oculaire (fig. 654). L'œil, placé au point oculaire, voit le champ tout entier (\*).

**842. Divers systèmes d'oculaires composés adaptés au microscope et à la lunette astronomique.** — Les oculaires des microscopes et des lunettes sont toujours formés par un système de deux lentilles, constituant un *oculaire composé*.

— Selon la position de ces lentilles par rapport à l'image réelle fournie par l'objectif, le système prend le nom d'*oculaire négatif* ou d'*oculaire positif*.

1° *L'oculaire négatif*, ou *oculaire d'Huyghens*, peut être considéré comme différent d'un oculaire simple  $LL'$  (fig. 658) par l'addition d'une seconde lentille  $L_1L_1'$ , placée entre l'objectif  $U$  et le plan où viendraient se former les images réelles : de là résulte que l'image réelle d'un point tel que  $m$  n'est plus au point  $m'$  où l'objectif tendait à la former, mais en un point  $m_1$ , situé entre le point  $m'$  et le centre optique  $C_1$ ; c'est ce point  $m_1$  que l'on regarde au travers de la lentille  $LL'$  (\*\*).

Il est facile de voir que, si les courbures de ces lentilles sont convenablement calculées, l'*achromatisme* de l'image virtuelle peut être obtenu au moyen de cet oculaire composé, lors même que l'objectif ne serait pas achromatique. — En effet, soient  $a'b'$  et  $a''b''$  (fig. 659) l'image rouge et l'image violette que formeraient les rayons de ces deux couleurs, après avoir été réfractés par l'objectif  $U$ ; l'interposition de la lentille  $L_1L_1'$  transporterait les points  $a'$  et  $a''$  en leurs foyers conjugués  $a_1$  et  $a_2$ , situés sur les axes secondaires  $C_1a_1'$  et  $C_1a_2'$ ; on conçoit donc qu'on puisse choisir les distances focales des deux verres de l'oculaire, de façon que les points  $a_1$  et  $a_2$  soient en ligne droite avec le centre optique  $C$  de  $LL'$ , en sorte que

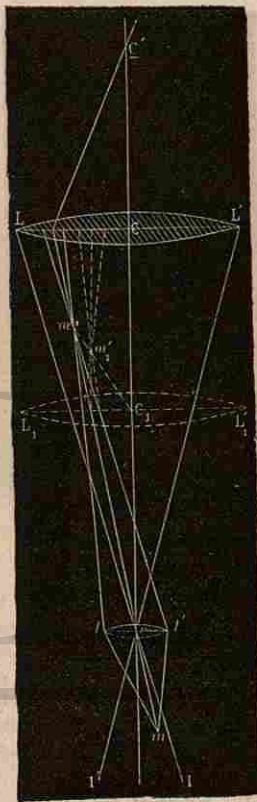


Fig. 658. — Oculaire négatif.

(\*) Pour calculer le grossissement linéaire (858), nous avons supposé le centre optique de l'œil au point  $C'$ ; en réalité, l'œil est placé au point oculaire, et le centre optique de l'œil se confond sensiblement avec le point  $F'$ . Mais alors la distance  $F'P$  étant au moins égale à la distance minima de la vision distincte, qui est très grande par rapport à la longueur focale de l'oculaire  $C'F'$ , on peut considérer les angles  $A'F'B'$  et  $A'CB'$  comme sensiblement égaux; ce qui, pour le calcul, revient à supposer le centre optique de l'œil au point  $C'$ .

(\*\*) Cette lentille  $L_1L_1'$  est quelquefois désignée sous le nom de *verre de champ* ou de *lentille collective*. On voit, en effet, que l'interposition de cette lentille ramène

ces deux points étant vus par l'œil dans la même direction, les images de diverses couleurs se superposent.

2° L'oculaire positif, ou oculaire de Ramsden, n'est autre chose qu'une loupe composée, formée de deux lentilles convergentes, qui sont situées l'une et

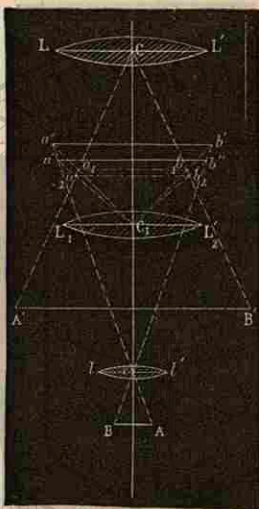


Fig. 659. — Achromatisme de l'oculaire négatif.

l'autre au delà de l'image réelle donnée par l'objet. Cette image réelle peut donc ici se former; on la regarde au travers du système des deux verres.

Dans le microscope, on emploie toujours l'oculaire négatif de Huyghens, dans lequel la distance des deux lentilles est égale au double de la longueur focale de la lentille la plus rapprochée de l'œil, et aux deux tiers de celle de l'autre lentille. Cet oculaire est, en effet, celui qui donne le champ le plus vaste, pour un grossissement déterminé. — On l'emploie aussi dans la lunette astronomique, mais seulement quand celle-ci ne doit pas être pourvue d'un réticule.

Lorsque la lunette astronomique doit servir à viser dans une direction bien définie, il est indispensable que l'axe optique ait toujours la même direction, par rapport à l'instrument lui-même; par suite, le point de croisement des fils du réticule doit être invariable. Cette condition serait difficilement réalisée avec un oculaire négatif; le réticule devrait alors être placé dans le plan où se forme la deuxième image réelle  $m'$  (fig. 658).

afin que l'œil, situé derrière la lentille  $LL'$ , pût voir dans le même plan l'image virtuelle de  $m'$  et l'image virtuelle du réticule; par suite, à chaque observation, les déplacements que l'on imprimerait à l'oculaire tout entier, pour mettre au point, auraient pour effet, de modifier la direction de l'axe optique.

Le plus souvent, dans la lunette astronomique, on emploie l'oculaire positif de Ramsden, dans lequel la distance des deux lentilles est égale aux deux tiers de leur longueur focale commune.

845. **Lunette terrestre.** — Le renversement des images, qui n'a aucun inconvénient dans les observations astronomiques, serait peu commode pour l'observation des objets terrestres. — On désigne sous le nom de *lunettes terrestres*, ou *longues-vues*, des lunettes qui diffèrent de la lunette astronomique par l'interposition, entre l'objectif et l'oculaire, d'un système de lentilles ayant pour but de substituer, à l'image

vers le centre  $C$  l'axe du faisceau provenant du point  $m$  qui vient rencontrer cette lentille. Il peut donc arriver que ce faisceau rencontre alors la lentille  $LL'$ , lors même que la droite  $cm'$  ne la rencontrerait pas. Donc la présence de la lentille  $L_1L'$ , augmente le champ de l'instrument. — En revanche, elle diminue le grossissement, puisque chacun des points de l'image réelle est ainsi rapproché de l'axe de l'appareil.

réelle et renversée qui est fournie par l'objectif, une autre image redressée, par rapport à laquelle l'oculaire fonctionne toujours comme une loupe. — Voici la disposition qui est le plus souvent adoptée.

Au delà de l'image réelle et renversée  $A_1B_1$  (fig. 660) qui est fournie par l'objectif (l'objectif est supposé à gauche, bien en dehors des limites de la figure), on place une première lentille  $C_1$ , à une distance de  $A_1B_1$  moindre que sa distance focale principale  $C_1f_1$ ; cette lentille substitue, à l'image réelle  $A_1B_1$ , une image virtuelle  $A_2B_2$ , qui est encore renversée par rapport à l'objet, et qui est plus grande que  $A_1B_1$ . Au delà de  $C_1$  est une seconde lentille  $C_2$ , placée à une distance de  $A_2B_2$  qui diffère peu du double de sa distance focale principale; l'image  $A_2B_2$  se comporte

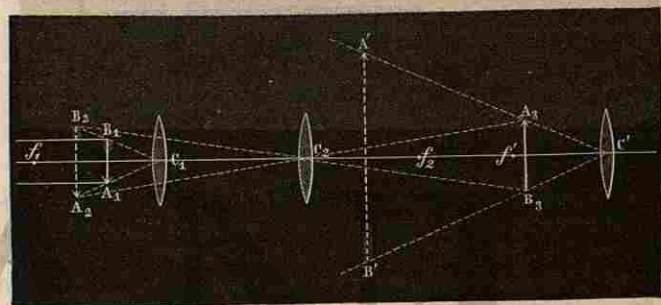


Fig. 660. — Oculaire terrestre.

alors par rapport à cette lentille comme un objet, en sorte qu'elle donne en  $A_3B_3$  une image réelle, renversée par rapport à  $A_2B_2$ , c'est-à-dire redressée par rapport à l'objet, et dont la grandeur diffère peu de celle de  $A_2B_2$ . — C'est cette image redressée qu'on regarde au travers de la lentille oculaire  $C'$ : le foyer principal  $f'$  de cette lentille est placé de manière qu'elle fonctionne comme une loupe, substituant à l'image  $A_3B_3$  une image virtuelle et grossie  $A_5B_5$ , droite par rapport à l'objet.

On donne le nom d'*oculaire terrestre* au système des trois lentilles  $C_1, C_2, C'$ , qui sont fixées dans un même tube, mobile à tirage, de manière à permettre la mise au point. — L'ensemble des deux lentilles  $C_1$  et  $C_2$  a reçu le nom de *véhicule* (\*).

(\*) Le redressement de l'image pourrait être produit par l'emploi d'une seule lentille complémentaire  $C_3$ , qui substituerait alors, à l'image réelle  $A_1B_1$  fournie par l'objectif, une image réelle placée dans une position analogue à celle de  $A_3B_3$  dans la figure 660. Mais il est facile de voir qu'il en résulterait une diminution considérable du champ. En effet, avec le système des deux lentilles  $C_1$  et  $C_2$ , le champ est mesuré par l'angle d'un cône ayant pour sommet le centre optique de l'objectif (supposé à gauche de la figure 660), et pour base la surface de la lentille  $C_1$ ; si, pour redresser l'image, on n'employait que la lentille  $C_3$ , la base du cône, dont l'angle mesure le champ, serait la surface de la lentille  $C_2$ ; la base s'éloignant ainsi du sommet du cône, l'angle du cône serait notablement moindre. — Donc, en opérant le redressement au

844. **Lunette de Galilée.** — **Lorgnettes jumelles.** — La lunette de Galilée permet d'obtenir une image droite, sans l'interposition de verres supplémentaires, en employant simplement comme oculaire une lentille *divergente*. — Cette disposition a, en outre, comme nous allons le voir, l'avantage de donner à l'instrument une longueur bien moindre.

La figure 661 indique la marche des rayons lumineux. Soit  $A_1B_1$  l'image réelle et renversée que donnerait l'objectif L, un peu au delà

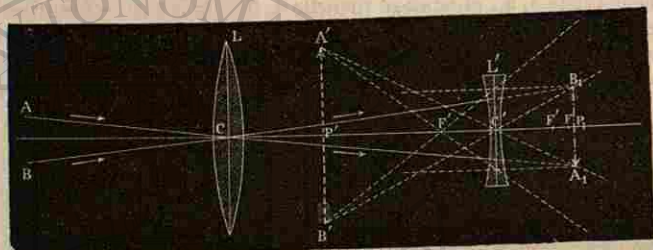


Fig. 661. — Lunette de Galilée.

de son foyer principal F. Plaçons l'oculaire divergent  $L'$  entre cette image et l'objectif, de manière que sa distance  $CP_1$  à l'image  $A_1B_1$  soit un peu supérieure à sa distance focale principale  $CF'$ , et cherchons ce que deviennent alors les rayons qui seraient venus concourir au point  $A_1$ . Parmi ces rayons, nous considérerons celui qui se propageait parallèlement à l'axe principal : en traversant l'oculaire divergent, ce rayon est réfracté de manière que son prolongement géométrique passe par le foyer principal virtuel situé en  $F'$ , à gauche de la lentille (796) ; il rencontre en  $A'$  l'axe secondaire  $A_1C'A'$  ; c'est donc en  $A'$  que passent les prolongements de tous les rayons qui, sans l'interposition de l'oculaire, viendraient se croiser en  $A_1$ . On détermine le point B' par une construction semblable. — De là résulte que l'œil, placé au delà de l'oculaire, voit en  $A'B'$  une image virtuelle, agrandie et renversée par rapport à  $A_1B_1$ , c'est-à-dire *droite* par rapport à l'objet lui-même (\*).

moyen d'un véhicule formé de deux lentilles, au lieu d'une seule, on a l'avantage d'augmenter le champ, ce qui est un point capital pour l'observation des objets terrestres.

Au lieu d'une seule lentille oculaire  $C'$  (fig. 660), on emploie le plus ordinairement un système de deux lentilles fonctionnant comme un *oculaire négatif* (842, 1°). — Le système connu sous le nom d'*oculaire terrestre* comprend alors, en définitive, quatre lentilles, portées dans un même tube à tirage.

(\*) Dans la lunette de Galilée, l'image de l'objectif formée par l'oculaire est virtuelle ; il n'existe donc pas, comme dans la lunette astronomique (841), une position de l'œil permettant de recevoir tous les rayons transmis par l'instrument. On a intérêt à placer l'œil le plus près possible de l'oculaire, afin de recevoir le plus grand nombre possible des rayons divergents qui en sortent. — Pour une position déterminée de l'œil, le *champ* est limité par un cône ayant pour sommet le centre optique de l'objectif, et pour base l'ouverture de la pupille ; la grandeur du champ de la lunette de Galilée varie donc avec la position de la pupille.

Les lorgnettes de spectacle, ou *jumelles*, se composent de deux lunettes de Galilée, assujetties parallèlement. Les tubes qui portent les objectifs  $AB, A'B'$  (fig. 662), sont réunis par des traverses, à leurs deux extrémités. Les tubes à tirage

qui portent les oculaires  $CD, C'D'$  sont réunis également par une traverse  $DC'$ , de manière qu'on puisse faire mouvoir ensemble ces deux tubes à tirage, et les mettre simultanément au point pour les deux yeux. Il suffit, pour cela, de faire tourner sur lui-même

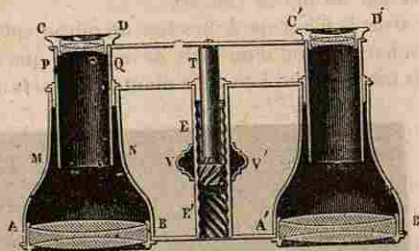


Fig. 662. — Lorgnettes jumelles.

le tube  $EE'$ , au moyen de la molette saillante  $VV'$  que l'on tient entre les doigts : le pas de vis pratiqué intérieurement sur la paroi de ce tube fait alors monter ou descendre la tige  $T$ , qui est fixée à la traverse  $DC'$  (\*).

845. **Avantages relatifs des divers systèmes de lunettes.** — Pour l'observation des corps célestes, la lunette astronomique est préférable à la lunette terrestre, parce qu'elle est composée d'un moins grand nombre de verres : de là résulte une moindre perte de lumière, par les absorptions auxquelles donnent toujours lieu les lentilles, ou par les réflexions partielles qui se produisent à leur surface. — On a vu en outre que, dans la lunette astronomique, on peut fixer exactement la ligne de visée au moyen d'un réticule (840) : ce résultat ne peut être obtenu avec la lunette de Galilée, dans laquelle il ne se forme pas d'image réelle.

Pour l'observation des objets terrestres, on tient généralement à obtenir des images droites : on emploie alors la lunette terrestre ou celle de Galilée. — La lunette de Galilée a l'avantage d'offrir, à égalité de grossissement, une longueur moindre, puisque sa longueur est sensiblement égale à la différence des distances focales principales de ses deux verres (fig. 661), tandis que la longueur de la lunette terrestre est supérieure à la somme de ces mêmes distances (843). Aussi est-ce toujours d'après le système de la lunette de Galilée que l'on construit les instruments qu'on cherche à rendre très portatifs. — Lorsqu'on se propose de distinguer des objets dont la grande distance rend difficile l'observation des détails, c'est à la lunette terrestre ou *longue-vue* que l'on a recours ; on obtient en général un grossissement d'autant plus grand que l'instrument présente une plus grande longueur.

(\*) Dans les bonnes lorgnettes, chacun des objectifs et des oculaires est ordinairement composé de trois lentilles, formant un système *achromatique*.



846. **Principe du télescope de Newton.** — On comprend généralement, sous le nom de *télescopes*, des instruments où la lentille objective, qui, dans les lunettes, recevait la lumière des objets, est remplacée par un miroir concave.

Dans le télescope de Newton, un miroir sphérique concave MN (fig. 665) est fixé au fond d'un tube, de manière que son centre C soit sur l'axe du tube. — L'axe du tube étant dirigé vers un objet, le miroir tendrait

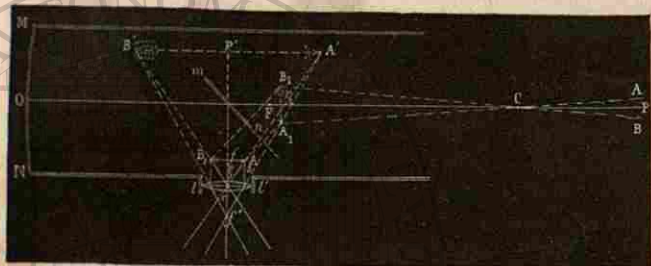


Fig. 665. — Télescope de Newton.

à produire, un peu au delà de son foyer principal F, une image  $A_1B_1$  réelle et renversée (\*); mais les faisceaux lumineux réfléchis, avant d'atteindre leurs points de concours respectifs, sont reçus sur un petit miroir plan  $mn$ , incliné à 45 degrés sur l'axe du tube; ils sont réfléchis par ce miroir, en sorte que l'image se trouve rejetée dans une position  $A_2B_2$  symétrique de  $A_1B_1$  par rapport à  $mn$ . C'est cette image réelle  $A_2B_2$  qu'on observe à travers l'oculaire  $W$ , fonctionnant comme loupe, et fixé dans un tube à tirage: en réglant le tirage, on amène l'image virtuelle  $A'B'$  à apparaître nettement, pour la vue de l'observateur.

847. **Grossissement du télescope.** — Dans le télescope, le grossissement est défini, comme dans la lunette astronomique, par le rapport des angles  $A'cB'$  et  $ACB$ , sous lesquels on voit une dimension  $A'B'$  de l'image virtuelle et la dimension homologue  $AB$  de l'objet. — Ces deux angles étant très petits, on peut substituer à leur rapport celui de leurs tangentes, ou des tangentes de leurs moitiés, c'est-à-dire le rapport  $\frac{\text{tg } A'cP'}{\text{tg } ACP}$ ; or,  $A'cP'$  a pour tangente  $\frac{A_2P'}{P_2c}$  ou  $\frac{A_2P_2}{P_2c}$ ;  $ACP$  ou son égal  $A_1CP_1$  a pour tangente  $\frac{A_1P_1}{P_1C}$ ; et comme  $A_2P_2 = A_1P_1$ , on a :

$$G = \frac{P_1C}{P_2c}$$

(\*) Ici encore, pour ne pas rendre la figure invraisemblable, on n'a pas indiqué les constructions à l'aide desquelles on détermine la position de l'image  $A_2B_2$ ; on s'est contenté de tracer les axes secondaires des points A et B, sur lesquels se trouvent les points correspondants  $A_1$  et  $B_1$  de l'image.

Mais  $P_1C$  est sensiblement égal à  $FC$  ou à  $OF$ , c'est-à-dire à la distance focale principale F du miroir sphérique:  $P_2c$  diffère peu de la distance focale principale  $f$  de l'oculaire; le grossissement s'exprime donc, d'une manière approximative, par

$$G = \frac{F}{f}$$

c'est-à-dire par le rapport des distances focales principales du miroir et de l'oculaire, résultat analogue à celui que nous avons obtenu pour les différentes espèces de lunettes.

On peut déterminer le grossissement par une expérience directe, au moyen d'une chambre claire convenablement disposée: on opérera comme il a été indiqué pour la lunette astronomique (839).

848. **Télescope de Foucault.** — Le télescope de Newton a été

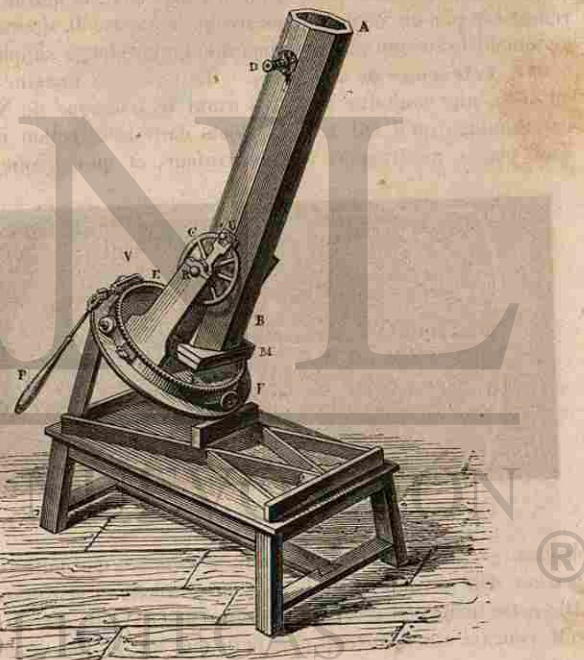


Fig. 664. — Télescope de Foucault.

perfectionné, dans sa construction, par Foucault. — Les miroirs sphériques de bronze, qu'on employait depuis Newton, sont très pesants; ils sont difficiles à travailler; enfin ils offrent surtout cet inconvénient

que, si l'air humide vient à en oxyder la surface, il faut recommencer un travail de polissage très long et très dispendieux. A ces miroirs de bronze, Foucault a substitué des miroirs de verre, dont la surface *concave* est couverte d'une couche mince d'argent, déposée chimiquement. — Avant d'effectuer l'argenture, on donne à la surface du verre la forme convenable, par une série d'essais et de retouches permettant d'apprécier les progrès que fait l'opération : cette surface, ainsi travaillée, présente déjà des qualités supérieures à celles des miroirs qu'on avait construits jusque-là. L'opération de l'argenture chimique, en augmentant le pouvoir réflecteur, donne au miroir des qualités plus remarquables encore. — Lorsque la couche d'argent vient à se ternir, on peut l'enlever au moyen d'un liquide qui la dissout, et déposer sur le verre une nouvelle couche d'argent, qui rend au miroir son éclat primitif.

Enfin dans le télescope de Foucault (*fig. 664*), la lentille oculaire est remplacée par un véritable microscope composé D, donnant un grossissement beaucoup plus considérable qu'une loupe simple (\*).

849. **Télescope de Grégory.** — Le télescope imaginé par Grégory en 1665, une vingtaine d'années avant le télescope de Newton, offre cet avantage qu'il fait voir les objets dans la direction même où ils sont placés par rapport à l'observateur, et qu'il donne des images

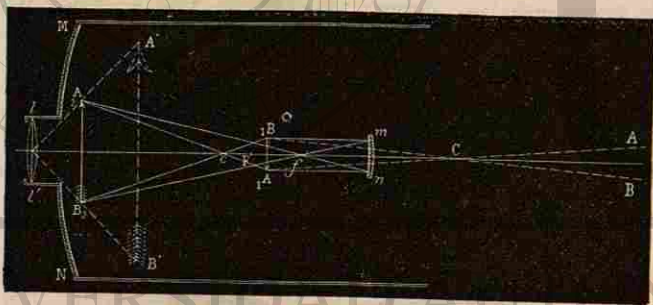


Fig. 665. — Formation des images dans le télescope de Grégory.

droites. — MN (*fig. 665*) est un miroir concave qui donne en  $A_1B_1$ , un peu au delà de son foyer F, une image réelle et renversée de l'objet AB : cette image est redressée et amplifiée en  $A_2B_2$  par un second miroir concave mn, beaucoup plus petit que MN, et tourné en sens con-

(\*) Le plus grand télescope qu'ait achevé Foucault lui-même est un instrument dont le miroir a 80 centimètres de diamètre. Il est installé aujourd'hui à l'observatoire de Marseille.

L'observatoire de Paris en possède un autre, qui avait été seulement commencé par Foucault, et dont le miroir a un diamètre de 1<sup>m</sup>,20. — Le tube de ce puissant instrument a plus de 7 mètres de longueur.

traire; enfin, on observe l'image  $A_2B_2$  au moyen d'une lentille oculaire  $W$ , qui est adaptée à une ouverture centrale du miroir MN, et qui donne une image virtuelle  $A'B'$  à la distance de la vision distincte.

Pour régler la distance à laquelle on voit  $A'B'$ , au lieu de déplacer l'oculaire par rapport à l'image  $A_2B_2$ , on déplace celle-ci par rapport à l'oculaire, en éloignant ou en rapprochant le miroir mn de l'image  $A_1B_1$ . La figure 666 montre le mécanisme à l'aide duquel on produit ce mou-



Fig. 666. — Télescope de Grégory.

vement; la vis extérieure V peut faire mouvoir dans un sens ou dans l'autre un petit écrou e, qui traverse une fente pratiquée dans la paroi du tube et se fixe à la tige c, laquelle porte le miroir antérieur m. L'oculaire est formé de deux lentilles A et B, fixées dans le tube t : c'est un oculaire positif (842).

850. **Avantages relatifs des lunettes et des télescopes.** — La découverte des lunettes est antérieure à celle des télescopes; mais, dans les premières lunettes employées, l'aberration de réfrangibilité des lentilles employées comme objectifs nuisait à la netteté des images. — Après la découverte des télescopes, ces instruments, perfectionnés d'abord par Grégory, puis modifiés par Newton, furent préférés pour l'observation des astres offrant des dimensions sensibles.

Depuis cette époque, la réalisation de l'achromatisme des lentilles a permis d'obtenir, avec les lunettes, des images d'une netteté dont les premiers observateurs n'avaient pas l'idée; cependant, la difficulté d'obtenir de grands objectifs parfaitement purs continue à restreindre les dimensions que l'on peut donner à ces instruments. — D'autre part,

les perfectionnements apportés par Foucault à la construction des grands télescopes ont permis d'obtenir, avec ces instruments, des images dont la grandeur et la netteté surpassent ce que peuvent fournir les lunettes.

En résumé, les *lunettes* paraissent devoir surtout servir à l'étude des mouvements des astres, en raison de la précision avec laquelle elles donnent les directions dans lesquelles les astres sont placés. — Les *télescopes* semblent être appelés principalement à révéler la constitution des corps célestes ayant un diamètre apparent sensible, grâce à la netteté qu'ils permettent d'obtenir dans les images grossies.

**851. Phares. — Lentilles annulaires, ou à échelons.** — Les phares que l'on construit sur les côtes sont destinés à produire des signaux lumineux, visibles à une grande distance, pour la sûreté de la navigation en mer.

Or, une source lumineuse émet toujours des rayons *divergents*; dès lors, si l'on n'employait aucun artifice particulier, il résulterait de ce que nous avons vu (751) que, quelle que fût l'intensité propre de la source, l'intensité de la lumière reçue à une distance un peu considérable deviendrait à peu près insensible. — En plaçant un point lumineux au foyer principal d'une lentille convergente, on peut obtenir, à la sortie de la lentille, un faisceau de rayons *parallèles*, la lumière suivant alors une marche inverse de celle qui est indiquée dans la figure 618. L'éclaircissement produit par un pareil faisceau, sur une surface constante, comme l'œil de l'observateur, deviendra alors *indépendant de la distance*. Mais, pour que ce parallélisme des rayons émergents soit réalisé, il faut toujours que les faces courbes de la lentille ne comprennent qu'une *petite portion* de la surface sphérique dont elles font partie. Si l'on employait une simple lentille, on ne pourrait donc lui donner qu'une surface peu étendue : par suite, le faisceau réfracté ne contiendrait qu'une petite quantité de lumière.

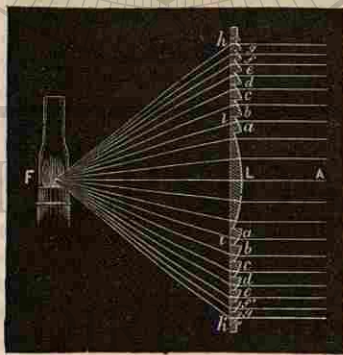


Fig. 667.  
Lentilles à échelons, pour les phares

Fresnel a imaginé la disposition indiquée par la figure 667. — Une source lumineuse très intense est placée au foyer principal F d'une lentille convergente L : c'est une lentille plan-convexe, dont la face courbe remplit la condition de ne comprendre qu'une petite portion de la surface sphérique dont elle fait partie. Cette lentille est environnée d'une série de lentilles en forme d'anneaux *aa, bb, cc, dd...*, dont les surfaces convexes ont des courbures différentes calculées de façon que le foyer principal de chacune d'elles soit au même point F. — Toute la lumière émise par le point F de la source,

dans le cône *AFH*, forme donc, à l'émergence, un faisceau parallèle à l'axe principal du système des lentilles. Les rayons émis par les autres points de la source forment, à l'émergence, des faisceaux semblables, parallèles à des axes secondaires qui sont toujours très peu inclinés sur l'axe principal. Le faisceau total est donc très lumineux : il est assez peu divergent pour n'éprouver qu'une faible diminution d'intensité avec la distance; mais il est cependant assez divergent pour que sa section puisse présenter, vers les limites de l'horizon, des dimensions assez considérables.

Les sources de lumière employées ont été d'abord des lampes à huile, à plusieurs mèches, et à flamme très intense. On leur substitue aujourd'hui la lumière électrique, du moins pour les phares les plus importants. — Afin que les navigateurs puissent distinguer les divers phares les uns des autres, on détermine, dans chacun d'eux, des *éclipses* de lumière, d'une durée déterminée. Pour cela, on dispose, autour de la source lumineuse, plusieurs systèmes de lentilles à échelons : la lanterne qui les porte tourne, d'un mouvement uniforme, autour d'un axe vertical. Chaque système de lentilles ne projette alors la lumière, dans une direction déterminée, que pendant un temps assez court : le navigateur, placé dans cette direction, cesse donc d'apercevoir le feu jusqu'au moment où le système suivant vient prendre la position du premier. — Parfois aussi, on place, devant un ou plusieurs de ces systèmes de lentilles, des verres colorés. — Les colorations et les intervalles d'alternance des feux sont réglés pour chaque phare et connus des marins.

### III. — DÉTERMINATION DE LA VITESSE DE LA LUMIÈRE.

#### 852. Déterminations anciennes de la vitesse de la lumière.

— La lumière se propage avec une vitesse considérable. Aussi, est-ce en opérant d'abord sur des distances énormes, comme celles qui nous séparent des astres, qu'on a cherché à mesurer cette vitesse.

On sait, par exemple, que les planètes ne sont pas lumineuses par elles-mêmes : elles ne sont visibles que par la lumière qu'elles reçoivent du Soleil, et qu'elles nous renvoient. On sait, d'autre part, que certaines planètes, et en particulier la planète Jupiter, sont accompagnées de planètes plus petites, ou *satellites*, qui tournent autour d'elles, pendant qu'elles tournent elles-mêmes autour du Soleil. — Or, pendant le mouvement de Jupiter autour du Soleil, il arrive que, à certaines époques, tel ou tel de ses satellites entre dans le cône d'ombre que Jupiter produit derrière lui, et alors ce satellite *s'éclipse*, c'est-à-dire qu'il cesse d'être lumineux, pour redevenir lumineux à l'instant où il sortira du cône d'ombre : ces divers instants peuvent être calculés avec exactitude, au moyen des lois des mouvements des astres. — Mais nous ne commençons pas à voir le satellite à l'instant même où il redevient lumineux : l'intervalle de temps qui s'écoule, entre l'instant où l'éclipse cesse réellement et l'instant où nous voyons l'astre reparaitre, correspond au temps que met la lumière pour parcourir l'espace qui

\* nous sépare de lui. Ce temps lui-même est variable aux diverses époques

de l'année, selon que la Terre est plus ou moins éloignée de l'astre.

C'est par des observations de ce genre que l'astronome danois Rømer détermina le premier, en 1672, la vitesse de propagation de la lumière. Il lui assigna une valeur de 77 000 lieues, ou 508 000 kilomètres, par seconde. — En admettant ce résultat, la lumière mettrait environ 8 minutes 13 secondes pour franchir la distance du Soleil à la Terre.

Une cinquantaine d'années après, Bradley parvint à un résultat sensiblement égal, par une méthode tout à fait différente, mais fondée toujours sur des observations astronomiques.

1855. **Expériences modernes.**

— **Méthode de M. Fizeau.** — La méthode employée par M. Fizeau a permis de mesurer la vitesse de la lumière en opérant sur des distances de quelques kilomètres seulement.

Les premières expériences de M. Fizeau, publiées en 1849, ont été effectuées entre Montmartre et Suresnes : la distance des deux stations était de 8635 mètres. Voici quelle était la disposition de l'appareil. — A Montmartre était placé un tube de lunette  $T'$  (fig. 668), dont l'objectif  $L'$  avait son axe principal dirigé vers la station de Suresnes : au foyer principal  $f'$  de cet objectif, était un petit miroir plan  $mn$ , qui fermait le tube. D'autre part, à Suresnes était placé un tube semblable  $T$ , disposé de manière que l'axe principal de son objectif  $L$  fût

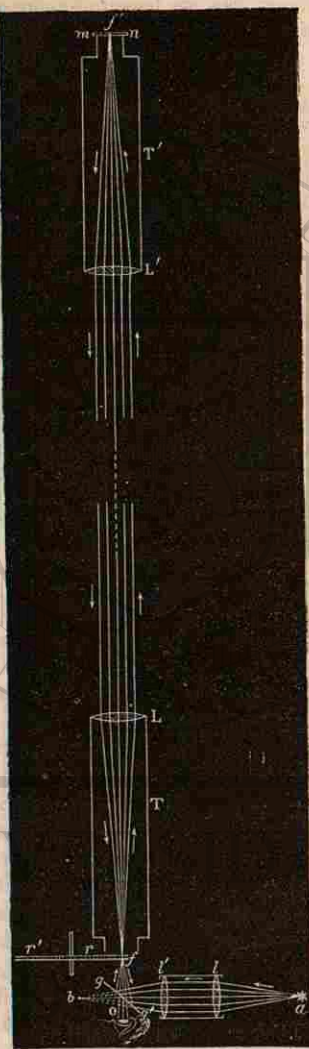


Fig. 668.

Appareil de M. Fizeau, pour la mesure de la vitesse de la lumière.

dans le prolongement de celui de l'autre; soit  $f$  le foyer principal de cet

objectif. A droite du tube  $T$  était placée la flamme d'une lampe  $a$ , au foyer principal d'une lentille  $l$  qui transmettait les rayons parallèlement à son axe; une seconde lentille  $l'$  tendait à faire converger les rayons vers son foyer  $b$ , mais ces rayons rencontraient alors une petite lame de verre inclinée  $gg'$ , qui les réfléchissait en partie, et amenait les rayons réfléchis à venir converger au point symétrique de  $b$  par rapport à la surface réfléchissante : la disposition était telle, que ce point de concours fût précisément le foyer principal  $f$  de la lentille objective  $L$ . Après s'être croisés en ce point  $f$ , les rayons venaient tomber sur la lentille  $L$ , qui les transmettait, parallèlement à son axe, à la lentille  $L'$  de Montmartre : celle-ci les faisait converger en son foyer  $f'$ , sur le miroir  $mn$ , en sorte que chacun de ces rayons reprenait, en sens inverse, le chemin qu'avait suivi son symétrique. Les rayons, après avoir traversé l'objectif  $L'$  et l'objectif  $L$ , revenaient donc se croiser en  $f$ , et rencontraient de nouveau la lame de verre  $gg'$  : celle-ci ne renvoyait qu'une partie de la lumière vers la lampe, et transmettait l'autre partie à l'œil de l'observateur, placé en  $O$ . — En résumé, donc, l'observateur placé à Suresnes apercevait ainsi, dans la direction de Montmartre, la lumière de la lampe qui était placée à côté de lui. Mais l'appareil comprenait en outre, à Suresnes, une roue dentée verticale  $rr'$ , dont le bord correspondait précisément au point  $f$ . Cette roue étant mise en mouvement par un mécanisme d'horlogerie, la lumière ne pouvait franchir le point  $f$  qu'aux instants où la roue présentait, en ce point, l'espace creux compris entre deux dents : le passage de la lumière était intercepté, aux instants où la roue présentait, en ce même point, le plein de l'une de ses dents.

Il est facile, dès lors de comprendre la marche de l'expérience. — Supposons que, la roue ayant reçu une certaine vitesse de rotation, un rayon venant de la lampe franchisse le point  $f$ , au moment où se présente un creux de la roue dentée. Si, pendant le temps que met ensuite ce rayon pour se propager de Suresnes à Montmartre et revenir à Suresnes, le plein de la dent suivante est venu prendre la place du creux, ce rayon sera intercepté au retour. Il en sera de même pour tous les autres rayons qui lui succéderont, les dimensions des intervalles creux étant égales à celles des parties pleines. Dès lors, l'œil placé en  $O$  ne recevra aucune lumière : il y aura éclipse complète. — On n'a donc, en commençant l'expérience, qu'à augmenter progressivement la vitesse de rotation : on observe d'abord un affaiblissement progressif de la lumière; puis, à un moment donné, l'éclipse devient complète. Le mécanisme est disposé de manière qu'il permet de connaître le nombre de tours effectués par la roue en une seconde; comme on connaît d'ailleurs le nombre des dents de la roue, on en déduit la valeur de la fraction de seconde qui représente, pour cette vitesse de rotation, le temps  $t$  nécessaire à la substitution d'un plein, au creux

qui le précède. Ce temps est celui que met la lumière pour franchir l'espace  $e$  qui sépare les deux stations, aller et retour. Le quotient  $\frac{c}{l}$  représente l'espace parcouru par la lumière en une seconde, c'est-à-dire *la vitesse de la lumière* (\*).

Les expériences de M. Fizeau ont donné, pour valeur de la vitesse de la lumière, environ 300 000 kilomètres par seconde : c'est un nombre très voisin de celui qui avait été obtenu par Rømer (852). — De nouvelles expériences, faites par M. A. Cornu au moyen de la même méthode, et avec quelques modifications destinées à en augmenter la précision, ont donné 300 550 kilomètres.

Des expériences toutes différentes, effectuées par Foucault, à l'aide d'un procédé qui permettait d'opérer sur une distance de quelques mètres seulement, avaient fourni, à peu près à la même époque que les expériences de M. Fizeau, un résultat très voisin du sien (\*\*).

(\*) Au moment où la roue dentée acquiert une vitesse double de la précédente, les rayons transmis, à l'aller, par les *creux*, viennent rencontrer au retour les *creux suivants*, et la lumière *reparaît*, avec toute son intensité, pour l'œil de l'observateur. — Au moment où la roue acquiert une vitesse triple de la première, il se produit une nouvelle *éclipse*; et ainsi de suite. — Chacune de ces observations permet de calculer la valeur de la vitesse de la lumière, en sorte qu'on peut, en prenant la moyenne des résultats, obtenir finalement cette valeur avec une grande précision.

(\*\*) Voir le principe de la méthode de Foucault dans les problèmes qui sont à la fin du volume.

## CHAPITRE VI

### NOTIONS SOMMAIRES SUR LA PHOTOGRAPHIE.

**854. Photographie. — Production des images dans la chambre noire.** — On désigne sous le nom général de *photographie* l'art de fixer les images lumineuses sur l'écran qui les reçoit.

Nicéphore Niepce est le premier qui soit parvenu à faire servir la lumière pour peindre des images persistantes, soit sur le bitume de Judée, soit sur l'iodure d'argent. Daguerre, après s'être associé à ses travaux, découvrit l'influence des vapeurs de mercure pour faire apparaître l'image, encore latente, que produit la lumière lorsqu'elle a frappé l'iodure d'argent pendant quelques secondes : il trouva, en outre, le moyen de fixer cette image. — C'est seulement alors que la découverte de Niepce put entrer dans la pratique. Les procédés ont subi depuis tant de transformations diverses, que nous devons nous contenter de quelques indications générales, suffisantes pour faire concevoir les principes des méthodes les plus usitées.

L'appareil qui sert à produire l'image est une *chambre noire*, plus ou moins semblable à celle que représente la figure 669 : c'est une caisse rectangulaire formée de deux parties B, E, qui peuvent glisser l'une dans l'autre. A la face antérieure est fixé le tube T qui porte l'objectif; dans la face postérieure EE' est enchâssée une glace dépolie sur laquelle viennent se peindre les images renversées des objets placés en face de l'objectif (794, 1°). Pour amener la glace au foyer conjugué de l'objet par rapport à la lentille, le photographe se place derrière cette glace, et la fait avancer ou reculer jusqu'à ce que l'image paraisse nette; il achève de *mettre au point*, en imprimant, au tube qui porte l'objectif T, de petits déplacements à l'aide de la vis Y.

La marche des rayons lumineux est indiquée dans la figure 670, qui représente la coupé d'une chambre noire : l'objet lumineux AB est placé à une distance supérieure au double de la distance focale princi-

qui le précède. Ce temps est celui que met la lumière pour franchir l'espace  $e$  qui sépare les deux stations, aller et retour. Le quotient  $\frac{e}{t}$  représente l'espace parcouru par la lumière en une seconde, c'est-à-dire *la vitesse de la lumière* (\*).

Les expériences de M. Fizeau ont donné, pour valeur de la vitesse de la lumière, environ 300 000 kilomètres par seconde : c'est un nombre très voisin de celui qui avait été obtenu par Rømer (852). — De nouvelles expériences, faites par M. A. Cornu au moyen de la même méthode, et avec quelques modifications destinées à en augmenter la précision, ont donné 300 550 kilomètres.

Des expériences toutes différentes, effectuées par Foucault, à l'aide d'un procédé qui permettait d'opérer sur une distance de quelques mètres seulement, avaient fourni, à peu près à la même époque que les expériences de M. Fizeau, un résultat très voisin du sien (\*\*).

(\*) Au moment où la roue dentée acquiert une vitesse double de la précédente, les rayons transmis, à l'aller, par les *creux*, viennent rencontrer au retour les *creux suivants*, et la lumière *reparaît*, avec toute son intensité, pour l'œil de l'observateur. — Au moment où la roue acquiert une vitesse triple de la première, il se produit une nouvelle *éclipse*; et ainsi de suite. — Chacune de ces observations permet de calculer la valeur de la vitesse de la lumière, en sorte qu'on peut, en prenant la moyenne des résultats, obtenir finalement cette valeur avec une grande précision.

(\*\*) Voir le principe de la méthode de Foucault dans les problèmes qui sont à la fin du volume.

## CHAPITRE VI

### NOTIONS SOMMAIRES SUR LA PHOTOGRAPHIE.

**854. Photographie. — Production des images dans la chambre noire.** — On désigne sous le nom général de *photographie* l'art de fixer les images lumineuses sur l'écran qui les reçoit.

Nicéphore Niepce est le premier qui soit parvenu à faire servir la lumière pour peindre des images persistantes, soit sur le bitume de Judée, soit sur l'iodure d'argent. Daguerre, après s'être associé à ses travaux, découvrit l'influence des vapeurs de mercure pour faire apparaître l'image, encore latente, que produit la lumière lorsqu'elle a frappé l'iodure d'argent pendant quelques secondes : il trouva, en outre, le moyen de fixer cette image. — C'est seulement alors que la découverte de Niepce put entrer dans la pratique. Les procédés ont subi depuis tant de transformations diverses, que nous devons nous contenter de quelques indications générales, suffisantes pour faire concevoir les principes des méthodes les plus usitées.

L'appareil qui sert à produire l'image est une *chambre noire*, plus ou moins semblable à celle que représente la figure 669 : c'est une caisse rectangulaire formée de deux parties B, E, qui peuvent glisser l'une dans l'autre. A la face antérieure est fixé le tube T qui porte l'objectif; dans la face postérieure EE' est enchâssée une glace dépolie sur laquelle viennent se peindre les images renversées des objets placés en face de l'objectif (794, 1<sup>o</sup>). Pour amener la glace au foyer conjugué de l'objet par rapport à la lentille, le photographe se place derrière cette glace, et la fait avancer ou reculer jusqu'à ce que l'image paraisse nette; il achève de *mettre au point*, en imprimant, au tube qui porte l'objectif T, de petits déplacements à l'aide de la vis Y.

La marche des rayons lumineux est indiquée dans la figure 670, qui représente la coupé d'une chambre noire : l'objet lumineux AB est placé à une distance supérieure au double de la distance focale princi-

pale  $CH$  de la lentille  $LL'$  : l'image  $A'B'$  se fait alors entre le foyer  $F$  et le point dont la distance à l'objectif serait double de  $CF$  (\*).

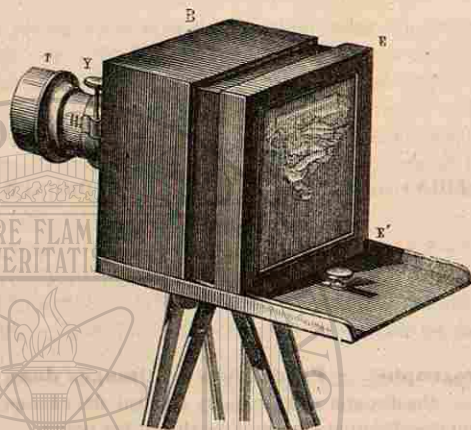


Fig. 669. — Chambre noire pour la photographie.

Il est clair qu'un même point de l'objet reçoit, toutes choses égales d'ailleurs, une quantité de lumière d'autant plus grande que la lentille

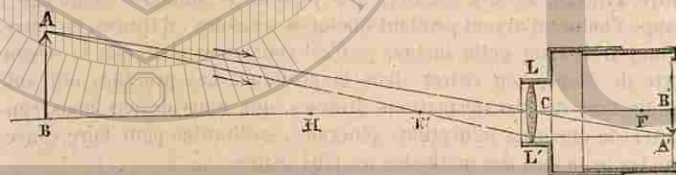


Fig. 670

offre une plus grande surface : en d'autres termes, l'image  $A'B'$  est d'autant plus vive que le diamètre de l'objectif est plus considérable.

**855. Photographie sur plaque, ou Daguerriotypie.** — L'image peut être fixée sur une plaque de cuivre argenté, en suivant le procédé qui a conservé le nom de *daguerriotypie*.

Après avoir soigneusement poli la couche d'argent, on la *sensibilise*, en l'exposant, dans un laboratoire obscur, à la vapeur d'iode et à la vapeur du bromure de chaux. La plaque se couvre d'une pellicule d'io-

(\*) Pour déterminer le foyer conjugué du point  $A$ , on a construit le rayon  $AF'$  qui passe au foyer principal de gauche, et se réfracte en devenant parallèle à l'axe principal; ce rayon rencontre l'axe secondaire  $AC$  au point  $A'$ , qui est l'image du point  $A$ .

de et de bromure d'argent, substances qui sont décomposables par la lumière. — On substitue alors cette plaque à la glace dépolie  $EE'$  de la chambre noire (fig. 669), en ayant soin de la garantir de la lumière pendant le transport. Sous l'influence des rayons lumineux qui forment l'image et qui viennent frapper la couche sensible, l'iode et le bromure d'argent éprouvent une décomposition partielle, qui met de l'argent en liberté; mais cette décomposition est généralement trop incomplète pour laisser une trace appréciable à l'œil : c'est ce qu'on nomme une image *latente*.

On rapporte la plaque dans le laboratoire, et on l'expose à la vapeur de mercure; sur tous les points de la plaque où se trouve de l'argent métallique, la vapeur de mercure se fixe, en gouttelettes imperceptibles, qui produisent une sorte de buée, d'un blanc mat. On voit alors *apparaître* l'image : les clairs s'y détachent en blanc sur les parties ombrées, qui conservent l'aspect miroitant de l'iodure d'argent. — Mais cette image s'effacerait, si on la transportait au jour, parce que l'iodure restant s'y décomposerait à son tour. Pour *fixer* l'image, on lave la plaque dans une solution d'hyposulfite de soude, qui dissout le bromure et l'iodure d'argent. — Enfin, pour donner à l'image plus de solidité, et en modifier la teinte, on la revêt d'une pellicule d'or métallique, en répandant, sur la plaque légèrement chauffée, une solution de chlorure d'or et d'hyposulfite de soude. — Il ne reste plus qu'à laver à l'eau distillée, et à sécher.

**856. Production des clichés.** — A l'époque même où Niepce et Daguerre terminaient leurs recherches, Fox Talbot faisait connaître, en Angleterre, un procédé qui doit être considéré comme l'origine de tous les progrès actuels de la photographie. L'idée fondamentale de ce procédé consiste à préparer d'abord un *cliché*, au moyen duquel on obtiendra ensuite des épreuves de l'image, en nombre aussi grand qu'on voudra. — Le cliché se fait le plus ordinairement *sur verre*, comme nous allons l'indiquer.

Pour les portraits, et en général pour les opérations qui peuvent se faire à proximité du laboratoire, on emploie le *collodion humide* (solution de coton-poudre dans un mélange d'alcool et d'éther). — Après avoir nettoyé avec soin la plaque de verre, on verse, sur sa surface, du collodion contenant des proportions déterminées de certains bromures et iodures solubles; le liquide, en s'écoulant, laisse sur le verre une mince couche adhérente, qui se prend très vite en une pellicule consistante en raison de la grande volatilité de l'éther. On plonge ensuite la plaque, pendant deux minutes environ, dans une cuvette contenant une solution d'azotate d'argent; cette opération, qui doit être faite à l'abri de la lumière, transforme en iode et en bromure d'argent les iodures et bromures employés; enfin, on transporte la plaque dans la chambre noire, à la place de la glace dépolie  $EE'$

(fig. 669). — Lorsqu'elle a reçu l'impression de la lumière, on la reporte dans le laboratoire obscur, et on fait *apparaître* l'image, en versant rapidement sur toute la surface de la plaque, soit une solution de sulfate de protoxyde de fer, soit une solution d'acide pyrogallique; ces corps ont la propriété de *continuer la réduction* du bromure et de l'iodure d'argent aux points qui ont été impressionnés par la lumière. — Enfin, on *fixe* l'image, c'est-à-dire qu'on enlève l'iodure et le bromure d'argent non altérés, au moyen d'une solution d'hyposulfite de soude; on lave à l'eau pure, et on laisse sécher.

Pour les paysages, et en général pour la reproduction des objets situés loin du laboratoire, on a longtemps employé l'un des nombreux procédés dits au *collodion sec*, qui permettent de préparer les plaques de verre longtemps avant de s'en servir, et de ne développer les images que plusieurs jours après la pose dans la chambre noire. — Depuis quelques années, on tend à substituer à ces procédés les procédés dits aux *gélantino-bromures*, qui ont l'avantage de permettre de réduire le temps de pose, jusqu'à donner parfois des images *instantanées*.

Le cliché constitue une image inverse, ou *negative*, puisque, sur les parties de la plaque qui ont été éclairées, la réduction des sels d'argent a donné naissance à un dépôt noir pulvérulent, tandis que les parties non éclairées ont repris, après le fixage, la transparence du verre. — Il nous reste à indiquer comment ce *cliché négatif* peut servir à tirer des épreuves positives.

**857. Épreuves positives aux sels d'argent.** — Le procédé le plus fréquemment employé est celui qu'avait indiqué Talbot, sauf quelques modifications de détail. — Il consiste à exposer à la lumière, derrière le cliché et en contact avec lui, une feuille de papier, *sensibilisée* au chlorure d'argent. Les rayons lumineux, passant à travers les parties transparentes du cliché, noircissent la couche sensible du papier, dans les parties correspondantes : les parties noires du cliché, en arrêtant la lumière, conservent au papier sa blancheur, dans les points qui leur correspondent. On obtient donc sur le papier une image *positive*, et cette opération peut être répétée indéfiniment, puisqu'elle ne fait subir au cliché aucune altération.

Quant aux détails de l'opération, voici, en peu de mots, en quoi ils consistent. — Le papier est d'abord couvert, sur l'une de ses faces, d'une couche d'albumine contenant du chlorure de sodium. Après avoir laissé sécher la feuille, on l'étend, par la même face, sur une solution d'azotate d'argent, qui transforme le chlorure de sodium en chlorure d'argent, et l'on fait sécher. — Pour obtenir une épreuve, on place la feuille de papier, sous le cliché, dans un cadre qui les maintient l'un et l'autre dans une position fixe : on expose ce cadre à la lumière et on arrête l'opération lorsque la teinte paraît suffisante. — On enlève du cadre la feuille de papier, on fait *virer* la teinte dans une solution

de chlorure d'or, et on la *fixe* à l'hyposulfite de soude, qui dissout les sels non attaqués par la lumière. Enfin, on lave l'épreuve, pendant plusieurs heures, avec de l'eau fréquemment renouvelée.

**858. Épreuves au charbon.** — Quels que soient les perfectionnements apportés à la préparation des épreuves aux sels d'argent, il paraît à peu près impossible de leur assurer une conservation indéfinie. On doit à M. Poitevin la première réalisation de procédés permettant le tirage des épreuves soit au charbon, soit aux encres grasses d'imprimerie, qui sont douées d'une inaltérabilité absolue.

Pour le tirage des épreuves dites *au charbon*, on expose à la lumière, derrière le cliché, une feuille de papier sur laquelle a été déposée une couche de gélatine, imprégnée de bichromate de potasse, et mélangée avec du charbon réduit en poudre impalpable. — La gélatine bichromatée et sèche acquiert, sous l'influence de la lumière, la propriété d'être plus ou moins insoluble dans l'eau chaude, selon que l'action des rayons lumineux a été plus ou moins intense. Il suffira donc, après une pose de quelques secondes, de plonger la feuille de papier dans un bain d'eau à une température convenable : c'est seulement aux points du papier qui auront été préservés de l'action de la lumière par les parties noires du cliché, que l'on verra la gélatine se dissoudre, en entraînant avec elle le charbon qui y avait été incorporé (\*).

**859. Photoglyptie.** — Le procédé que nous venons d'indiquer a conduit M. Woodbury, en Angleterre, à une modification remarquable, désignée en France sous le nom de *photoglyptie*, et qui permet de tirer, à la presse, un nombre quelconque d'épreuves *au charbon*, sans faire intervenir à chaque fois l'action de la lumière.

Ce procédé est fondé sur cette remarque, que la couche de gélatine bichromatée, qui contient l'image obtenue comme il a été dit, présente, après le développement, des *épaisseurs variables* en ses différents points. Or, si l'on prépare, avec toutes les précautions convenables, une feuille de gélatine, isolée de tout support, séchée avec soin, et portant l'image en relief, il suffit de la comprimer fortement, à l'aide d'une presse hydraulique, contre une plaque de plomb (ou d'un alliage de plomb et d'antimoine), pour qu'elle pénètre dans le métal et donne un moule en creux, d'une grande finesse.

Pour tirer une épreuve, on verse, à la surface du moule, de la gélatine intimement mélangée avec du charbon; on couvre le tout d'une feuille de papier satinée, et on comprime légèrement avec une presse ordinaire, pour chasser l'excès de gélatine colorée : la gélatine restante fait prise, et s'attache au papier, avec lequel elle se détache du moule. — On peut ainsi tirer plusieurs centaines d'épreuves dans une journée.

(\*) L'immersion de la feuille dans l'eau a toujours pour premier effet de détacher du papier la pellicule de gélatine : il est donc nécessaire, avant le développement de l'image par l'eau chaude, de plonger l'épreuve dans un bain d'eau froide, où l'on aura disposé à l'avance, soit une autre feuille de papier, soit une lame de verre, sur laquelle on appliquera la feuille impressionnée, par le côté gélatiné, et qui servira de *support* à la pellicule. C'est seulement après cette opération préliminaire qu'on introduit le tout dans un bain d'eau chaude : on enlève la feuille de papier primitive, et on prolonge l'action de l'eau jusqu'à ce que l'on ne voie plus se dégager de l'image aucune parcelle de matière colorante.



Avec l'un ou l'autre des deux procédés que nous venons d'indiquer on peut remplacer le charbon par toute autre poudre colorante, et réaliser ainsi les effets de dessins à la sanguine, à la sépia, etc.

**860. Tirage des épreuves aux encres grasses. — Photographure.** — La gélatine bichromatée, lorsqu'elle a été exposée à la lumière sous un cliché, possède, outre les propriétés que nous avons décrites, une autre propriété non moins remarquable. Quand on se contente de la mouiller légèrement, on constate que l'eau pénètre et gonfle les parties qui ont été préservées de l'action de la lumière, et qu'elle laisse sèches les parties qui ont été éclairées. Si maintenant on passe sur la surface un rouleau chargé d'encre lithographique, ou *encre grasse*, l'encre prend exclusivement sur les parties restées sèches. — Une couche de gélatine bichromatée, déposée sur une pierre bien lisse, et soumise aux opérations que nous venons d'indiquer, présente donc les propriétés d'une véritable surface lithographique, au moyen de laquelle on pourra tirer des épreuves à l'encre grasse, sur papier ordinaire, avec une presse semblable à la presse lithographique.

Enfin, la photographie permet aussi d'obtenir des planches de *cuivre*, pouvant servir au tirage comme les planches gravées en taille-douce. — La première partie de l'opération est absolument semblable à celle de la photoglyptie, c'est-à-dire qu'on prend, sur une lame de plomb, une empreinte de la gélatine bichromatée qui porte l'image en relief. — Mais, comme la feuille de plomb n'offrirait pas une dureté suffisante pour résister à l'action de la presse qui doit servir au tirage, on en fait un moulage et un contre-moulage en cuivre, par la galvanoplastie : c'est la planche de cuivre ainsi obtenue qui sert au tirage à l'encre grasse. On arrive à produire ainsi des gravures dont la finesse dépasse ce que pourrait réaliser l'artiste le plus habile, et qui ont l'avantage de reproduire le modèle avec une fidélité que la main de l'homme ne pourrait atteindre (\*).

(\*) Dans certains autres procédés de gravure photographique, au lieu d'opérer par moulage, on fait usage de planches métalliques couvertes d'un enduit qui sera impressionné par la lumière, de manière à ne permettre ensuite la morsure aux acides qu'en certains points, à l'exclusion des autres. On obtient ainsi des gravures en creux ou en relief, sur plaques d'acier, de bronze, de cuivre ou de zinc, avec une rapidité et avec une économie supérieures à ce que donnerait la galvanoplastie.

## APPENDICE AU LIVRE V

### PROPAGATION DE LA CHALEUR

#### CHAPITRE PREMIER

#### CHALEUR RAYONNANTE

##### I. — PROPAGATION DE LA CHALEUR PAR RAYONNEMENT.

**861. Rayonnement et conductibilité.** — La chaleur peut se transmettre de deux manières différentes : tantôt elle se propage par *conductibilité*, c'est-à-dire en cheminant de proche en proche, dans des corps dont elle élève progressivement la température; tantôt elle se propage par *rayonnement*, c'est-à-dire qu'elle franchit directement des espaces plus ou moins considérables, sans échauffer sensiblement les corps qu'elle rencontre.

Nous étudierons d'abord la propagation par rayonnement, qui offre, avec la propagation de la lumière, les analogies les plus intimes.

**862. La chaleur traverse le vide.** — La chaleur qui nous arrive du soleil, avec sa lumière, ne nous parvient qu'après avoir franchi les espaces célestes, où n'existe aucune matière pondérable : elle a donc traversé le *vide*.

La chaleur émise par des corps qui ne sont pas lumineux traverse également le vide. — Pour le démontrer, il suffit de répéter l'expérience suivante, qui est due à Rumford. Un thermomètre *t* (fig. 674) est soudé dans la paroi d'un ballon de verre, de manière que son réservoir B soit à peu près au centre du ballon. On a préalablement fait le vide dans le ballon :

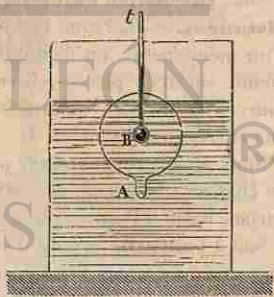


Fig. 674.

pour cela, on l'a soudé à l'extrémité d'un tube d'environ 1 mètre de longueur, on a rempli tout l'appareil de mercure, de manière à faire

Avec l'un ou l'autre des deux procédés que nous venons d'indiquer on peut remplacer le charbon par toute autre poudre colorante, et réaliser ainsi les effets de dessins à la sanguine, à la sépia, etc.

**860. Tirage des épreuves aux encres grasses. — Photographure.** — La gélatine bichromatée, lorsqu'elle a été exposée à la lumière sous un cliché, possède, outre les propriétés que nous avons décrites, une autre propriété non moins remarquable. Quand on se contente de la mouiller légèrement, on constate que l'eau pénètre et gonfle les parties qui ont été préservées de l'action de la lumière, et qu'elle laisse sèches les parties qui ont été éclairées. Si maintenant on passe sur la surface un rouleau chargé d'encre lithographique, ou *encre grasse*, l'encre prend exclusivement sur les parties restées sèches. — Une couche de gélatine bichromatée, déposée sur une pierre bien lisse, et soumise aux opérations que nous venons d'indiquer, présente donc les propriétés d'une véritable surface lithographique, au moyen de laquelle on pourra tirer des épreuves à l'encre grasse, sur papier ordinaire, avec une presse semblable à la presse lithographique.

Enfin, la photographie permet aussi d'obtenir des planches de *cuivre*, pouvant servir au tirage comme les planches gravées en taille-douce. — La première partie de l'opération est absolument semblable à celle de la photoglyptie, c'est-à-dire qu'on prend, sur une lame de plomb, une empreinte de la gélatine bichromatée qui porte l'image en relief. — Mais, comme la feuille de plomb n'offrirait pas une dureté suffisante pour résister à l'action de la presse qui doit servir au tirage, on en fait un moulage et un contre-moulage en cuivre, par la galvanoplastie : c'est la planche de cuivre ainsi obtenue qui sert au tirage à l'encre grasse. On arrive à produire ainsi des gravures dont la finesse dépasse ce que pourrait réaliser l'artiste le plus habile, et qui ont l'avantage de reproduire le modèle avec une fidélité que la main de l'homme ne pourrait atteindre (\*).

(\*) Dans certains autres procédés de gravure photographique, au lieu d'opérer par moulage, on fait usage de planches métalliques couvertes d'un enduit qui sera impressionné par la lumière, de manière à ne permettre ensuite la morsure aux acides qu'en certains points, à l'exclusion des autres. On obtient ainsi des gravures en creux ou en relief, sur plaques d'acier, de bronze, de cuivre ou de zinc, avec une rapidité et avec une économie supérieures à ce que donnerait la galvanoplastie.

## APPENDICE AU LIVRE V

### PROPAGATION DE LA CHALEUR

#### CHAPITRE PREMIER

#### CHALEUR RAYONNANTE

##### I. — PROPAGATION DE LA CHALEUR PAR RAYONNEMENT.

**861. Rayonnement et conductibilité.** — La chaleur peut se transmettre de deux manières différentes : tantôt elle se propage par *conductibilité*, c'est-à-dire en cheminant de proche en proche, dans des corps dont elle élève progressivement la température; tantôt elle se propage par *rayonnement*, c'est-à-dire qu'elle franchit directement des espaces plus ou moins considérables, sans échauffer sensiblement les corps qu'elle rencontre.

Nous étudierons d'abord la propagation par rayonnement, qui offre, avec la propagation de la lumière, les analogies les plus intimes.

**862. La chaleur traverse le vide.** — La chaleur qui nous arrive du soleil, avec sa lumière, ne nous parvient qu'après avoir franchi les espaces célestes, où n'existe aucune matière pondérable : elle a donc traversé le *vide*.

La chaleur émise par des corps qui ne sont pas lumineux traverse également le vide. — Pour le démontrer, il suffit de répéter l'expérience suivante, qui est due à Rumford. Un thermomètre *t* (fig. 674) est soudé dans la paroi d'un ballon de verre, de manière que son réservoir B soit à peu près au centre du ballon. On a préalablement fait le vide dans le ballon :

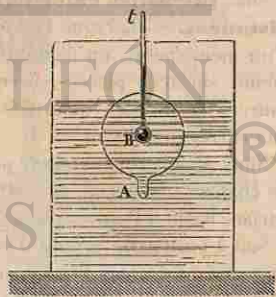


Fig. 674.

pour cela, on l'a soudé à l'extrémité d'un tube d'environ 1 mètre de longueur, on a rempli tout l'appareil de mercure, de manière à faire

du ballon la chambre d'un baromètre; et on l'a renversé sur une cuve à mercure; on a ensuite fermé à la lampe le col A du ballon, et on l'a détaché du tube. Quand on plonge le ballon, ainsi préparé, dans une cuve contenant de l'eau chaude (fig. 671), on voit le thermomètre accuser *instantanément* une élévation de température.

**865. La chaleur traverse certains corps sans les échauffer d'une manière sensible.** — Prevost, de Genève, a montré que la chaleur émise par un boulet rouge peut impressionner un thermomètre, placé de l'autre côté d'une nappe d'eau tombant d'un réservoir. — Avec une lentille taillée dans un bloc de glace, on a pu enflammer de la poudre, du papier, ou d'autres substances combustibles. — Dans ces expériences, il est impossible d'admettre que la chaleur s'est transmise en échauffant d'abord la nappe d'eau, ou la lentille de glace, qui étaient placées sur son trajet: elle les a évidemment traversées sans leur faire éprouver une élévation sensible de température.

**864. Propagation rectiligne de la chaleur. — Rayons calorifiques.** — La chaleur se transmet d'un point à un autre, comme la lumière, en suivant la *ligne droite* qui joint ces deux points. On peut le vérifier, au moins grossièrement, en plaçant le réservoir d'un thermomètre à une certaine distance d'une source calorifique, de dimensions assez petites pour qu'on puisse la supposer réduite à un point; si l'on interpose un petit écran de carton sur un point quelconque de la droite qui joint la source au réservoir du thermomètre, on n'observe plus aucune élévation de température.

Nous appellerons *rayon calorifique* toute direction rectiligne suivant laquelle se propage de la chaleur. — Un corps chaud émettant de la chaleur dans *toutes les directions*, toute droite partant d'un point quelconque de ce corps doit être considérée comme représentant la direction d'un rayon calorifique.

**865. Intensités calorifiques d'une même source à différentes distances.** — Lorsque l'on considère des rayons calorifiques émanant d'un même point, on démontre, comme pour la lumière (751), qu'une même surface, placée successivement à diverses distances de la source, reçoit des quantités de chaleur *inversement proportionnelles aux carrés des distances*.

Nous appellerons *intensité propre* d'une source calorifique, la quantité de chaleur que reçoit de cette source, dans un temps déterminé, une surface égale à l'unité, placée à l'unité de distance.

Soit I l'intensité propre d'une source, ainsi définie. Si l'on considère une surface égale à l'unité, placée à une distance D de la source, elle recevra, dans le même temps, une quantité de chaleur dont la valeur

sera  $\frac{I}{D^2}$ ; cette quantité est ce qu'on nomme l'*intensité de la source à la distance D*

**866. Appareil de Melloni.** — Les premières recherches précises sur la chaleur rayonnante ont été effectuées par Leslie, par Rumford et par Delaroche. Ces recherches ont été reprises et étendues par Melloni, à l'aide d'un appareil qui présente le double avantage de reposer sur des principes très simples et de fournir des mesures très précises. — Nous décrirons d'abord les diverses parties de cet appareil.

Les *sources de chaleur* que Melloni employait, pour les diverses expériences, étaient au nombre de quatre, savoir: — 1° Deux sources de *chaleur obscure*: un cube rempli d'eau qu'on maintenait en ébullition au moyen d'une lampe à alcool (fig. 672); une plaque de cuivre,

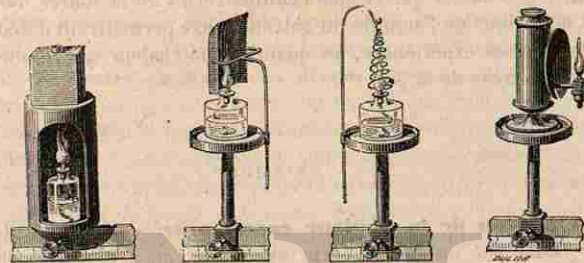


Fig. 672.

Fig. 673.

Fig. 674.

Fig. 675.

Sources de chaleur employées par Melloni.

chauffée de même par une lampe à alcool (fig. 673), et dont la température pouvait atteindre 400 degrés; — 2° deux sources de *chaleur lumineuse*: une spirale de platine, rendue incandescente par la flamme

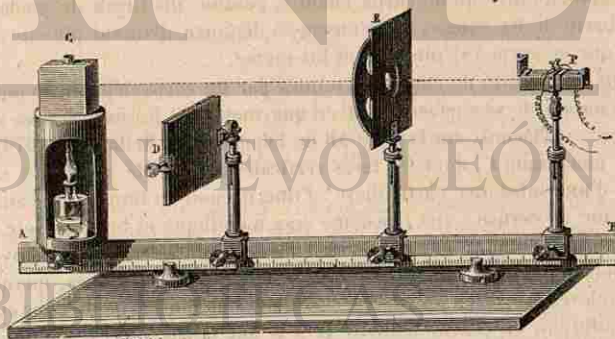


Fig. 676. — Appareil de Melloni.

d'une lampe à alcool (fig. 674); la flamme d'une petite lampe à huile, dite *lampe de Locatelli* (fig. 675), à mèche pleine, et sans cheminée de verre.

L'appareil de mesure, pour les quantités de chaleur, n'est autre que le thermo-multiplicateur décrit précédemment (547), lequel joue le rôle d'un thermomètre d'une extrême sensibilité. La pile thermo-électrique est installée sur un support, placé sur une règle divisée AB (fig. 676). D'autres supports servent à placer, sur cette même règle, les sources de chaleur ou les écrans. — Le galvanomètre est supposé à droite de cette figure.

L'intensité du courant produit par la pile thermo-électrique étant proportionnelle à la différence de température de ses deux faces (580), et cette différence de température étant elle-même proportionnelle à la quantité de chaleur que la face chauffée reçoit de la source, on voit que les déviations de l'aiguille du galvanomètre permettront d'évaluer, dans les diverses expériences, les quantités de chaleur qui tomberont sur l'une des faces de la pile (\*).



H. — ÉMISSION.

867. **Émission de la chaleur rayonnante.** — La quantité de chaleur émise par un même corps augmente, en général, quand la température de ce corps s'élève. — Ainsi, par exemple, si l'on place la plaque de cuivre chauffée (fig. 675) à une certaine distance de la pile de Melloni, en interposant entre elles un écran, on constate que, au moment où l'écran est supprimé, l'aiguille du galvanomètre est d'autant plus déviée que la température de la plaque était plus haute. — Nous n'avons pas d'ailleurs à insister sur ce point : l'expérience de chaque jour nous montre qu'un corps chauffé, comme un tuyau de poêle ou une barre de fer rougie, nous envoie, à distance, d'autant plus de chaleur que ce corps est plus chaud lui-même.

Mais la quantité de chaleur rayonnée par un corps dépend, en outre, de la nature de sa surface. C'est ce que montrent les expériences suivantes. — Plaçons, sur la règle AB de l'appareil de Melloni (fig. 676), le cube métallique C, dont les faces verticales auront été couvertes chacune d'une substance particulière : l'une, de noir de fumée; une autre, de blanc de céruse; une troisième sera métallique et brillante, etc. Un écran E, percé d'une ouverture, servira à limiter le faisceau de rayons qui doit arriver du cube à la pile. Un autre écran D servira, quand il sera relevé, à arrêter les rayons. — Supposons que, l'eau du cube étant en ébullition, on tourne d'abord vers la pile la face qui est enduite de noir de fumée. Dès que l'écran D est abaissé, comme l'indique la figure,

(\*) Lorsque les déviations de l'aiguille dépassent 25 ou 50 degrés, on doit employer, comme le faisait Melloni, une table de graduation, construite pour l'appareil lui-même par une série d'expériences spéciales.

on voit l'aiguille du galvanomètre se mettre en mouvement, et s'arrêter, après quelques oscillations, dans une position faisant un certain angle avec sa direction primitive. On relève alors l'écran D et on laisse l'aiguille revenir au zéro. — On tourne ensuite vers la pile une autre face du cube, une face métallique, par exemple, et on recommence l'expérience : on observe une nouvelle déviation de l'aiguille, beaucoup moindre que la première. — Avec une troisième face, on trouve encore une déviation différente, et ainsi de suite.

Or, dans ces expériences successives, les faces du cube sont toutes à la température de l'eau bouillante : de plus, ce sont toujours des surfaces d'égale étendue qui envoient leurs rayons à la pile. Ces expériences montrent donc que, à égalité de température, les quantités de chaleur émises dépendent de la nature de la surface rayonnante.

868. **Pouvoirs émissifs des divers corps.** — En répétant ces expériences pour les divers corps, on trouve que c'est toujours le noir de fumée qui, à une même température, émet la plus grande quantité de chaleur. — On est convenu de nommer *pouvoir émissif* d'un corps quelconque, le rapport de la quantité de chaleur qu'émet ce corps à celle qu'émet le noir de fumée, à la même température.

Le blanc de céruse paraît être à peu près le seul corps qui, pour la chaleur obscure, émette la même quantité de chaleur que le noir de fumée, à la même température; c'est-à-dire que c'est le seul corps qui ait un pouvoir émissif égal à l'unité. — Pour tous les autres corps, les pouvoirs émissifs sont exprimés par des fractions, que l'on détermine par des expériences semblables à celles que nous venons de décrire. — C'est ainsi qu'ont été obtenus les nombres du tableau suivant :

POUVOIRS ÉMISSIFS POUR LA CHALEUR OBSCURE.

|                            |      |                              |       |
|----------------------------|------|------------------------------|-------|
| Noir de fumée . . . . .    | 1,00 | Argent mat. . . . .          | 0,51  |
| Blanc de céruse . . . . .  | 1,00 | Platine laminé . . . . .     | 0,41  |
| Colle de poisson . . . . . | 0,91 | Cuivre en feuilles . . . . . | 0,55  |
| Encre de Chine . . . . .   | 0,85 | Or en feuilles . . . . .     | 0,04  |
| Gomme laque . . . . .      | 0,72 | Argent poli . . . . .        | 0,025 |

Les métaux ont, en général, comme on le voit, un pouvoir émissif assez faible, et d'autant plus faible que leur surface est mieux polie : le pouvoir émissif de l'argent poli est seulement 0,025. — Ainsi s'explique l'usage que l'on fait de vases d'argent poli, pour conserver les liquides qu'on veut maintenir chauds, comme le thé, le café, etc.

869. **Refroidissement. — Loi de Newton.** — Le refroidissement d'un corps placé dans une enceinte dont la température est inférieure à la sienne est toujours un phénomène complexe. La rapidité avec laquelle la température du corps s'abaisse dépend, non seulement de sa température primitive et de son pouvoir émissif, mais aussi de la tem-

pérature de l'enceinte, de la nature du gaz qu'elle contient, etc. Cependant, dans la plupart des cas, le refroidissement peut être considéré comme s'effectuant d'après la loi suivante, énoncée par Newton :

*Pour un même corps, et lorsque l'excès de sa température sur celle de l'enceinte ne dépasse pas 20 ou 30°, les abaissements de température qui correspondent à des intervalles de temps égaux et très courts sont proportionnels aux excès moyens pendant ces intervalles (\*)*.

### III. — RÉFLEXION, TRANSMISSION ET ABSORPTION.

**870. Réflexion de la chaleur. — Lois de la réflexion.** — Lorsqu'un rayon calorifique rencontre une surface parfaitement polie, il éprouve une *réflexion*, semblable à celle de la lumière (756), et assujettie aux mêmes lois.

Pour le vérifier au moyen de l'appareil de Melloni, on installe verticalement une plaque métallique polie F sur un support (fig. 677), à la

(\*) Cette loi conduit à une conséquence très simple, dont la vérification expérimentale peut être considérée comme une vérification de la loi elle-même.

Imaginons qu'un thermomètre ait été chauffé à une température qui surpasse de  $t$  degrés celle de l'enceinte où il est placé; et soient  $t'$ ,  $t''$ , ... les excès de sa température sur celle de l'enceinte au bout de 1, 2, 3 ... minutes. Pendant la première minute, l'abaissement de température est de  $t - t'$  degrés, et l'excès moyen est  $\frac{t+t'}{2}$  degrés; pendant la deuxième minute, l'abaissement est  $t' - t''$ , et

l'excès moyen est  $\frac{t'+t''}{2}$ ; et ainsi de suite. Si la loi de Newton est exacte, il doit y avoir un rapport constant entre les abaissements de température et les excès moyens correspondants, c'est-à-dire qu'on doit avoir, en désignant par  $k$  un nombre constant :

$$t - t' = k \frac{t+t'}{2},$$

$$t' - t'' = k \frac{t'+t''}{2}, \text{ etc.}$$

De la première de ces équations, on déduit

$$t' = \frac{2-k}{2+k} t.$$

La seconde donne de même :

$$t'' = \frac{2-k}{2+k} t',$$

et ainsi de suite. — Les excès successifs  $t$ ,  $t'$ ,  $t''$ , etc., doivent donc former une suite de nombres tels que chacun d'eux soit égal au précédent multiplié par un facteur constant; en d'autres termes, si la loi de Newton est exacte, les excès successifs de la température du thermomètre sur celle de l'enceinte, à des instants croissant en progression arithmétique, doivent décroître en progression géométrique.

L'expérience confirme cette conséquence de la loi, tant que l'excès initial ne dépasse pas 20 ou 30 degrés. Dans ces limites, on doit donc considérer la loi comme exacte.

même hauteur que la source de chaleur C et que l'ouverture de l'écran E. On place la pile P sur une règle supplémentaire III, mobile autour de la tige K : la partie supérieure du support présente, comme le montre la figure, un cercle divisé qui permet de mesurer l'angle que fait la normale au miroir, soit avec la règle principale IA, soit avec la règle mobile III. — Avant d'abaisser l'écran D, on amène la règle mobile

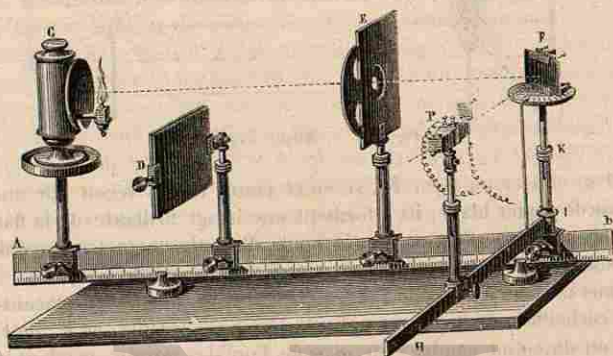


Fig. 677. — Vérification des lois de la réflexion de la chaleur.

dans une position telle que ces deux angles soient égaux. Aussitôt qu'on abaisse l'écran D, on constate que l'aiguille du galvanomètre est déviée; pour toute autre position de la pile, on n'obtient pas de déviation sensible. — Cette expérience montre donc que le rayon réfléchi reste dans le plan d'incidence, et que l'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence.

**871. Miroirs ardents.** — On obtient une nouvelle vérification de ces lois, en constatant que des rayons calorifiques, réfléchis par une surface courbe, se comportent comme les rayons lumineux.

On a vu (751) que, si l'on reçoit sur un miroir sphérique concave, parallèlement à son axe, un faisceau de rayons solaires, les rayons lumineux viennent converger, après réflexion, en un même point de l'axe, qui est le foyer principal (fig. 579), de sorte qu'il y a, en ce point, concentration de lumière. Or, l'expérience montre que, au même point, se concentre aussi la chaleur émise par le Soleil; on y peut enflammer de l'amadou, et, si les dimensions du miroir sont suffisamment grandes, on y peut fondre certains métaux. — Les anciens donnaient à ces miroirs le nom de *miroirs ardents*.

En disposant en regard l'un de l'autre deux miroirs sphériques A et B (fig. 678), de manière que leurs axes coïncident, on peut faire, avec un foyer de chaleur artificielle, une expérience analogue : c'est l'expérience dite des *miroirs conjugués*. — Au foyer E, on place d'abord

la flamme d'une bougie : les rayons lumineux qui viennent tomber sur le miroir A s'y réfléchissent et deviennent parallèles à l'axe commun ; ils rencontrent alors le miroir B, se réfléchissent une seconde fois et

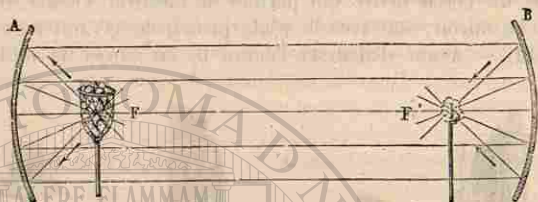


Fig. 678. — Miroirs conjugués.

vont se croiser au foyer F' ; si, en ce point, on les reçoit sur un petit écran de papier blanc, ils y forment une image brillante de la flamme. Si l'on remplace l'écran par la boule d'un thermomètre sensible, on constate immédiatement une élévation de température.

Dans les Cours, on rend l'expérience plus frappante, en plaçant en F une corbeille métallique, remplie de charbons ardents ; en F', de l'amadou ou du coton-poudre. On masque l'un des miroirs pendant qu'on dispose les charbons ; à l'instant où l'on enlève l'écran, l'amadou prend feu, même à plusieurs mètres de distance.

**872. Pouvoirs réflecteurs des divers corps.** — Quelque polie que soit une surface, elle ne réfléchit jamais intégralement toute la chaleur qu'elle reçoit. — On appelle *pouvoir réflecteur* d'une surface déterminée, le rapport de la quantité de chaleur réfléchie à la quantité de chaleur incidente.

L'appareil de Melloni permet de mesurer les pouvoirs réflecteurs de plaques polies de différentes natures, en plaçant successivement en F (fig. 677) ces diverses plaques. On mesure d'abord la quantité de chaleur incidente, en plaçant la pile sur le trajet des rayons qui viennent directement de la source ; puis la quantité de chaleur réfléchie, en procédant comme nous l'avons indiqué (870). — C'est ainsi que MM. de la Provostaye et P. Desains ont obtenu les résultats suivants :

| POUVOIRS RÉFLECTEURS.       |      |                   |      |
|-----------------------------|------|-------------------|------|
| Argent . . . . .            | 0,96 | Acier . . . . .   | 0,85 |
| Or . . . . .                | 0,95 | Platine . . . . . | 0,85 |
| Cuivre . . . . .            | 0,95 | Zinc . . . . .    | 0,81 |
| Laiton . . . . .            | 0,95 | Fer . . . . .     | 0,77 |
| Métal des miroirs . . . . . | 0,85 | Fonte . . . . .   | 0,75 |

On peut étudier de même, pour chaque plaque, les quantités de chaleur réfléchies sous diverses incidences. — L'expérience montre que,

pour les corps *opaques*, comme les métaux, les pouvoirs réflecteurs varient peu avec l'angle d'incidence. Les corps *transparents*, comme le verre, le cristal de roche, etc., réfléchissent une proportion d'autant plus grande de la chaleur incidente, que l'angle d'incidence est plus grand. — Ce résultat est analogue à celui que présente la réflexion de la lumière (744).

**873. Réflexion irrégulière ou diffusion.** — Les substances mates, telles que le blanc de céruse, les métaux dépolis, lorsqu'ils reçoivent de la chaleur dans une direction déterminée, ne la réfléchissent pas dans une direction unique : ils en renvoient une partie dans toutes les directions. Ce résultat, qui est encore analogue à celui que nous avons constaté pour la lumière (745), constitue la *réflexion irrégulière* ou la *diffusion* de la chaleur. — Ainsi, en plaçant en F (fig. 677) une plaque couverte de blanc de céruse, et en donnant successivement à la règle III qui supporte la pile diverses directions, on constate que la pile accuse toujours une certaine quantité de chaleur diffusée.

**874. Transmission de la chaleur rayonnante. — Corps diathermanes et corps athermanes.** — Nous avons constaté (865) que la chaleur peut traverser certains corps, comme la lumière traverse les corps transparents. — On désigne ces corps sous le nom de *corps diathermanes*, c'est-à-dire transparents pour la chaleur. Par opposition, on appelle *corps athermanes*, ceux qui arrêtent complètement la chaleur incidente, c'est-à-dire qui sont opaques pour la chaleur.

Les rayons calorifiques, lorsqu'ils passent d'un milieu dans un autre milieu diathermane, éprouvent d'ailleurs une *réfraction* qui est soumise aux mêmes lois que celle de la lumière (766). On sait, par exemple, qu'en recevant sur une lentille convergente les rayons du soleil, on obtient, au foyer principal où viennent passer les rayons lumineux réfractés, une concentration de chaleur qui permet d'y allumer de l'amadou, du drap, etc.

**875. Décomposition de la chaleur par un prisme. — Radiations lumineuses et radiations obscures.** — Quand on répète, avec un prisme de *sel gemme*, l'expérience de la décomposition de la lumière solaire (799), et qu'on emploie une pile thermo-électrique étroite pour explorer les diverses parties du faisceau dispersé, on constate que la pile accuse des quantités de chaleur croissantes, depuis le violet U (fig. 679) jusqu'au rouge R. En outre, la pile accuse encore des quantités sensibles de chaleur au delà du rouge, dans une étendue RO qui est à peu près égale à UR. Les radiations émises par le soleil comprennent donc, non seulement des rayons qui sont à la fois *calorifiques et lumineux*, mais aussi des rayons de *chaleur obscure*, moins déviés par le prisme que les premiers (\*).

(\*) Un prisme de verre donnerait aussi un spectre calorifique, mais moins étendu

La même expérience, répétée avec une autre source lumineuse comme la lampe de Locatelli (fig. 675) ou la spirale incandescente (fig. 674), fournit encore un spectre dans lequel on trouve des rayons de chaleur obscure, et des rayons qui sont à la fois calorifiques et lu-

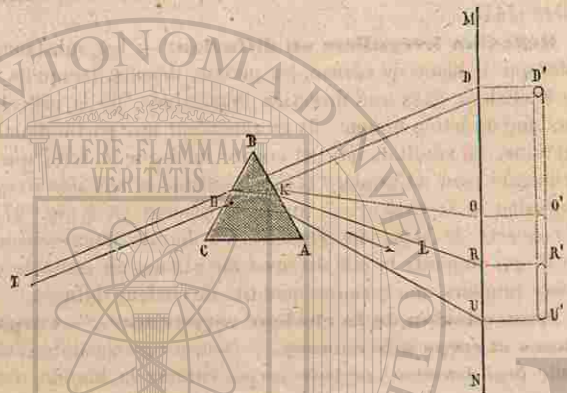


Fig. 679. — Décomposition de la chaleur par un prisme.

mineux : ces derniers sont seulement en proportion moindre que dans la lumière solaire. — Enfin, les sources obscures, comme la plaque chauffée (fig. 675), ou le cube d'eau bouillante (fig. 672), ne donnent plus de spectre lumineux, mais uniquement des rayons de chaleur obscure, moins déviés que ne seraient les rayons rouges.

Il résulte, de l'ensemble de ces expériences, que les rayons calorifiques obscurs, quand on les compare aux rayons calorifiques lumineux, ne présentent, par rapport à ceux-ci, que des différences du même ordre que celles qui distinguent entre eux les rayons lumineux de diverses couleurs. Ces rayons de chaleur se séparent, sous l'action d'un prisme, absolument comme se séparent les rayons des diverses couleurs qui constituent la lumière blanche, en vertu de leurs différences de réfrangibilité. — Nous allons voir que les mêmes analogies se retrouvent dans la transmission des rayons calorifiques au travers de substances de natures diverses.

**876. Pouvoirs diathermanes des diverses substances, pour les diverses espèces de rayons calorifiques.** — Pour étudier le degré de transparence des diverses substances pour la chaleur, ou leur diathermanéité, on les façonne en petites plaques, que l'on place sur

au delà du rouge que le spectre fourni par le prisme de sel gemme. Nous verrons, en effet, que le verre absorbe la plus grande partie des rayons de chaleur obscure et ne laisse guère passer que les rayons de chaleur lumineuse.

un support (fig. 680), entre la source de chaleur et la pile thermo-électrique : la déviation de l'aiguille du galvanomètre fait connaître la quantité de chaleur transmise. On enlève ensuite la plaque, et on laisse arriver directement le faisceau calorifique sur la pile : on obtient une autre déviation, qui fait connaître la quantité de chaleur incidente.

On appelle *pouvoir diathermane* d'une plaque, pour un faisceau calorifique de nature déterminée, le rapport entre la quantité de chaleur transmise et la quantité de chaleur incidente.

L'expérience montre que le pouvoir diathermane d'une même substance présente, en général, des valeurs très diverses, selon la nature de la chaleur incidente. — Voici quelques exemples des résultats obtenus :

1° Si l'on prend, comme sources de chaleur, le cube à eau bouillante ou la plaque de cuivre chauffée, c'est-à-dire des sources obscures, on constate que les plaques de verre ou de cristal de roche ne laissent passer que des quantités de chaleur presque inappréciables. — Ces substances n'ont donc, pour les rayons calorifiques obscurs, qu'un pouvoir diathermane sensiblement nul.

2° Au contraire, si l'on prend, comme sources de chaleur, la lampe de Locatelli ou la spirale incandescente, c'est-à-dire des sources lumineuses, la quantité de chaleur transmise au travers de ces mêmes plaques est une fraction très notable de la quantité de chaleur incidente. — Ce résultat, comparé au précédent, montre que ces substances (verre ou cristal de roche) n'arrêtent, dans les faisceaux émis par ces sources, que les rayons de chaleur obscure; elles laissent passer, avec la lumière, une portion considérable de rayons calorifiques lumineux. On a même constaté directement qu'elles ont, pour ces rayons pris isolément, un pouvoir diathermane voisin de l'unité.

3° Enfin, certaines autres substances, comme le sel gemme, laissent toujours passer la presque totalité de la chaleur incidente, quelle que soit la source de chaleur employée. Le sel gemme a donc un pouvoir diathermane sensiblement égal à l'unité, pour les rayons calorifiques de toutes natures.

Ces résultats offrent une analogie remarquable avec ceux que présente la transmission de la lumière au travers des divers corps. — Ainsi, le verre ou le cristal de roche, recevant le faisceau de chaleur complexe qu'émet la lampe de Locatelli, ne laissent passer que les divers rayons de chaleur lumineuse et arrêtent les rayons de chaleur obscure; absolument comme une vitre rouge, recevant la lumière blanche du soleil, ne laisse passer que les rayons rouges et arrête les rayons des autres couleurs. — Le sel gemme laisse passer aussi bien



Fig. 680. — Plaques pour l'étude des pouvoirs diathermanes.

les rayons obscurs que les rayons lumineux, comme une vitre incolore laisse passer indifféremment les rayons des diverses couleurs qui constituent la lumière blanche.

*En résumé*, le pouvoir diathermane de chaque substance dépend de la nature du faisceau calorifique qu'elle reçoit, comme le degré de transparence d'une substance, pour la lumière, dépend de la composition de la lumière incidente (\*).

**877. Applications.** — Dans les serres vitrées, où l'on conserve les plantes auxquelles l'action du froid serait funeste, l'observation montre que, même pendant l'hiver, la température s'élève rapidement, sous la simple influence des rayons solaires. — Ce résultat s'explique facilement, d'après ce qui précède. La plus grande partie de la chaleur du soleil pénètre, avec la lumière, au travers des vitres, et chauffe les corps que la serre contient. Ceux-ci, à mesure qu'ils s'échauffent, émettent à leur tour des quantités de chaleur de plus en plus grandes; mais c'est de la chaleur *obscur*, qui ne peut traverser le verre, en sorte que la chaleur s'accumule progressivement à l'intérieur de la serre. — Il en est de même dans les cloches dont les maraichers couvrent leurs plantes pour faire mûrir les fruits: il suffit d'introduire la main sous ces cloches, pour constater l'élévation de température qui s'y produit dès qu'elles ont été frappées quelque temps par le soleil.

L'eau jouit, sous ce rapport, de propriétés analogues à celles du verre. De là l'élévation de température qu'éprouve la vase, au fond des étangs peu profonds, sous l'action des rayons solaires (\*\*).

**878. Appareil de M. Mouchot, pour l'utilisation de la chaleur du soleil comme moyen de chauffage.** — C'est par une appli-

(\*) Masson et Jamin ont étudié, non plus la transmissibilité de faisceaux de chaleur *hétérogène*, mais la transmissibilité propre de chacun des faisceaux *homogènes* dans lesquels on peut les décomposer. — Pour cela, ils recevaient le spectre solaire, obtenu au moyen d'un prisme de sel gemme, sur un écran percé d'une petite ouverture. En donnant successivement diverses positions à cette ouverture, ils pouvaient laisser passer des faisceaux appartenant exclusivement à telle ou telle *portion du spectre*, et étudier la transmission de chacun d'eux au travers des diverses lames. Ils ont reconnu ainsi:

1° Que le verre, le cristal de roche, la glace, et en général toutes les substances transparentes pour la lumière, sont aussi diathermanes pour tous les rayons de *chaleur lumineuse*;

2° Que ces mêmes substances laissent passer encore les rayons de *chaleur obscure* voisins du rouge, mais éteignent les rayons de *chaleur obscure extrême*, c'est-à-dire les moins déviés par le prisme;

3° Qu'un verre fortement coloré en rouge, qui ne laisse passer que la *lumière rouge* et éteint les autres couleurs, laisse passer également la *chaleur des rayons rouges* et éteint les autres rayons calorifiques.

(\*\*) La vapeur d'eau dont se charge notre atmosphère jouit également de propriétés semblables, comme l'ont montré les expériences de M. Tyndall. L'atmosphère humide a donc pour effet de ralentir le refroidissement de notre globe: elle laisse passer, en quantité notable, la chaleur lumineuse émise par le Soleil, et arrête, en très grande partie, la chaleur obscure que la Terre échauffée émet en sens contraire.

cation intelligente des principes précédents, que M. Mouchot a pu construire un appareil qui permet d'utiliser la chaleur solaire pour échauffer rapidement les liquides, comme l'eau, l'alcool, etc.

Un grand miroir métallique MM (fig. 681), qui a la forme d'un cône et dont la surface intérieure est argentée, est fixé dans une position telle que son axe soit dirigé vers le soleil. Les rayons solaires S, S, reçus sur sa

surface, sont réfléchis de manière à venir converger aux divers points de l'axe du cône. Un vase cylindrique C, en cuivre mince, noirci à l'extérieur, est placé suivant cet axe et contient le liquide à chauffer: il est entouré d'un cylindre de verre V. — Le verre laisse passer les rayons de *chaleur lumineuse* réfléchis par le miroir, lesquels viennent échauffer le vase C, dont la surface noircie les absorbe à peu près intégralement. A mesure que le vase et le liquide s'échauffent, ils émet-

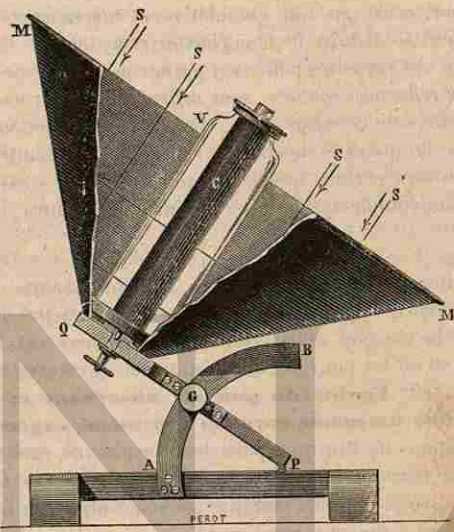


Fig. 681. — Appareil de M. Mouchot, pour l'utilisation de la chaleur du soleil.

tent des quantités de chaleur croissantes, mais cette chaleur *obscur* est arrêtée par le verre: le refroidissement du liquide est donc à peu près nul, et sa température s'élève rapidement.

On peut ainsi amener l'eau à l'ébullition en 15 à 20 minutes, en opérant par un beau soleil. — On conçoit facilement les applications que cet appareil peut recevoir, dans les contrées où le ciel reste découvert pendant de longues périodes.

**879. Absorption de la chaleur. — Pouvoirs absorbants des divers corps.** — La chaleur *absorbée* par un corps est la portion de chaleur incidente qui est retenue par lui, et qui sert, en général, à lui faire éprouver une élévation de température.

On appelle *pouvoir absorbant* d'un corps, pour une chaleur de nature déterminée, le rapport de la quantité de chaleur absorbée à la quantité de chaleur incidente.

Quand on opère sur le *noir de fumée*, l'expérience montre que ce



corps, recevant un faisceau de chaleur de nature quelconque, n'en renvoie aucune partie, soit par réflexion régulière, soit par diffusion, et n'en laisse passer non plus aucune partie par transmission. — Le noir de fumée doit donc être considéré comme absorbant toujours intégralement la chaleur qu'il reçoit, c'est-à-dire comme ayant un *pouvoir absorbant égal à l'unité*.

Pour ce qui concerne les autres corps, si l'on considère, en particulier, ceux qui sont complètement *athermanes*, leur pouvoir absorbant peut se déduire de leur pouvoir réflecteur. — Il suffira de donner à l'un de ces corps un poli assez parfait pour qu'il ne puisse donner lieu qu'à la réflexion régulière, sans diffusion : si l'on mesure le pouvoir réflecteur  $r$  de ce corps (872), c'est-à-dire la fraction qui exprime le rapport de la quantité de chaleur réfléchie à la quantité de chaleur incidente, on sera certain que le pouvoir absorbant  $a$  est représenté par la fraction complémentaire, c'est-à-dire qu'on aura

$$a = 1 - r.$$

Ainsi, pour les métaux polis, la connaissance des pouvoirs réflecteurs fournit, sans nouvelle expérience, les valeurs des pouvoirs absorbants.

Le cas que nous venons de considérer est le plus simple : c'est le seul où les pouvoirs absorbants soient connus avec précision.

**880. Égalité du pouvoir absorbant et du pouvoir émissif, pour un même corps et une même espèce de chaleur.** — Nous venons de voir que, pour toute espèce de chaleur, le pouvoir absorbant du noir de fumée est égal à l'unité. D'après la définition même des pouvoirs émissifs (868), le pouvoir émissif du noir de fumée est également représenté par l'unité.

D'autre part, nous venons de voir (879) que, pour les corps athermanes ayant un pouvoir diffusif négligeable, on peut toujours déterminer le pouvoir absorbant, au moyen du pouvoir réflecteur. — Or, si l'on compare les pouvoirs absorbants ainsi obtenus, avec les pouvoirs émissifs des mêmes corps rapportés à celui du noir de fumée (868), on trouve deux séries de nombres *identiques*, au moins tant qu'il s'agit de rayons calorifiques de même nature.

Enfin, pour les substances qui ont un pouvoir diffusif, et dont les pouvoirs absorbants n'ont pu être déterminés avec la même exactitude, on constate que toutes les circonstances qui font varier le pouvoir émissif, modifient aussi, et dans le même sens, le pouvoir absorbant.

D'après l'ensemble de ces résultats, on est conduit à admettre que le *pouvoir émissif d'un corps est toujours égal à son pouvoir absorbant*, pour la même espèce de chaleur. — Ce principe, dont la théorie démontre la généralité, permet de se dispenser de la détermination directe des pouvoirs absorbants de certaines substances, quand on connaît leurs pouvoirs émissifs pour la même espèce de chaleur.

**881. Hypothèse de l'équilibre mobile de température.** — Quand on met en présence divers corps, à des températures différentes, les plus froids s'échauffent, les plus chauds se refroidissent, et il en est ainsi jusqu'au moment où tous ces corps arrivent à une même température, qu'ils conservent ensuite indéfiniment.

Ce résultat pourrait s'expliquer en admettant que les corps les plus chauds sont les seuls qui rayonnent de la chaleur, et que ce rayonnement cesse dès que leur température est devenue égale à celle que les autres corps ont acquise. — Pour chaque corps, la propriété d'émettre de la chaleur serait alors subordonnée à la température des corps environnants.

Il est plus rationnel d'admettre que *tous les corps* rayonnent de la chaleur, mais que, pour chacun d'eux, la quantité de chaleur émise est d'autant plus grande que la température du corps est plus élevée. — Dès lors, plusieurs corps étant mis en présence, si l'un d'eux se refroidit, c'est qu'il émet plus de chaleur qu'il n'en absorbe; si un autre s'échauffe, c'est qu'il absorbe plus de chaleur qu'il n'en émet. — L'équilibre de température, une fois réalisé, se conserve, parce que, pour chacun des corps, la perte de chaleur due à son rayonnement propre est compensée par la chaleur qu'il absorbe. — C'est ce qu'on a appelé *l'équilibre mobile de température*.

**882. Explication de la réflexion apparente du froid.** — Cette manière d'envisager les phénomènes fournit une explication de l'expérience connue sous le nom de *réflexion apparente du froid*.

Reprenons les miroirs conjugués déjà décrits (871); plaçons au foyer F du miroir A'B' (fig. 682) le réservoir d'un thermomètre sensible, puis

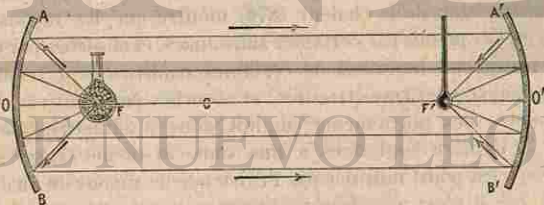


Fig. 682. — Miroirs conjugués, pour la réflexion apparente du froid.

fixons au foyer F du miroir AB un ballon de verre contenant de la glace. Le thermomètre indiquera un abaissement de température. — Cette expérience, célèbre dans la science, semblait conduire à admettre l'existence de *rayons frigorifiques*. La théorie de l'équilibre mobile de température dispense de cette hypothèse.

En effet, supposons d'abord que le ballon *ne soit pas encore placé*, et que l'équilibre de température existe; admettons, pour plus de simpli-

citée dans l'explication, que les parois de l'enceinte et la surface du thermomètre soient *dépourvues de pouvoir réflecteur*, et qu'elles aient des *pouvoirs émissifs égaux*. Le thermomètre F' envoie sur le miroir AB' des rayons divergents qui sont réfléchis par ce miroir, puis par le miroir AB, vont passer par le point F, et parviennent ensuite à divers points de l'enceinte. Dans les mêmes directions, et en sens inverse, se propagent des rayons venant de l'enceinte, passant par F, et renvoyés par les miroirs vers le point F'. Puisque l'enceinte et le thermomètre ont même *pouvoir émissif*, et par suite même *pouvoir absorbant*, la perte de chaleur reste, pour le thermomètre, toujours égale au gain, et sa température reste invariable. — Au contraire, quand on vient à placer en F le ballon plein de glace, les rayons qui venaient de l'enceinte en passant par F, et qui étaient ainsi renvoyés par les miroirs sur le thermomètre F', sont remplacés par les rayons moins chauds qu'émet le ballon. Le thermomètre reçoit donc moins de chaleur que précédemment, c'est-à-dire moins de chaleur qu'il n'en perd : il doit donc éprouver un abaissement de température, comme le montre l'expérience.

**885. Identité de la chaleur et de la lumière.** — Il résulte de tout ce qui précède que la propagation de la chaleur se rapproche, en tous points, de la propagation de la lumière.

Pour la chaleur et pour la lumière, les lois de la réflexion sont identiques (870 et 871). — La décomposition d'un faisceau de rayons solaires par un prisme de sel gemme (875) montre que les rayons *calorifiques obscurs* se séparent des rayons lumineux à cause de leur moindre réfrangibilité, comme les rayons rouges se séparent des rayons violets. — Dans les rayons *calorifiques lumineux*, les propriétés calorifiques sont inséparables des propriétés lumineuses. — Enfin, l'étude de la transmission de la chaleur (876) montre que les rayons obscurs peuvent être transmis par certaines substances, et absorbés par d'autres, comme les rayons lumineux de certaines couleurs sont transmis par certaines substances transparentes, et absorbés par d'autres.

L'ensemble des phénomènes conduit donc à admettre que la chaleur et la lumière sont dues à une seule et même cause. — Cette hypothèse n'est point infirmée par l'existence de rayons de chaleur sans lumière, car il n'est pas absurde de supposer que l'organe de la vue, s'il était constitué d'une manière différente, pourrait être impressionné par ces rayons, comme il l'est par les rayons lumineux (\*).

(\*) Les liquides qui remplissent le globe de l'œil, et que les rayons doivent traverser avant de tomber sur la rétine, sont *diathermanes pour les rayons lumineux*, mais *athermanes pour les rayons obscurs* : c'est ce que l'expérience permet de constater directement, en opérant sur les liquides d'un œil de bœuf. Il en résulte que, en réalité, les rayons calorifiques obscurs n'arrivent pas à la rétine.

## CHAPITRE II

### CONDUCTIBILITÉ

**884. Propagation de la chaleur par conductibilité.** — Les observations journalières suffisent pour montrer que la chaleur peut se transmettre dans les corps solides par *conductibilité*, c'est-à-dire par une élévation graduelle de la température de leurs couches successives.

La méthode suivante permet de comparer entre eux les différents corps solides, au point de vue de leurs propriétés *conductrices*.

**885. Conductibilité des corps solides. — Appareil d'Ingenhousz.** — L'appareil d'Ingenhousz se compose d'une petite cuve rectangulaire de laiton (fig. 685), dans la paroi de laquelle sont assujetties des tiges de diverses substances : argent, cuivre, laiton, zinc, étain, verre, bois, etc. Ces tiges ont été couvertes d'une couche mince de cire (pour cela, on les a plongées dans un bain de cire fondue, et on les a laissées refroidir après les en avoir retirées). — On verse de l'eau bouillante dans la caisse; la chaleur se transmet dans la longueur des tiges; on juge de leur plus ou moins grande conductibilité, par la distance à laquelle se propage la fusion de la cire. — On constate ainsi, par exemple, que la cire fond jusqu'à l'extrémité de la tige d'argent, tandis que la fusion se propage à peine sur une longueur de quelques millimètres sur la tige de bois.

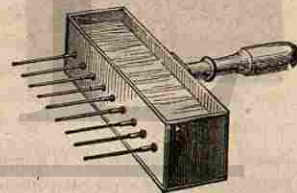


Fig. 685. — Appareil d'Ingenhousz

Les corps solides les plus usuels peuvent être classés comme il suit, par ordre de conductibilité décroissante :

*Argent, Cuivre, Or, Laiton, Zinc, Étain, Fer, Acier, Plomb, Platine, Bismuth;*

*Verre, Marbre, Porcelaine, Charbon, Bois.*

Les métaux sont donc les corps qui conduisent le mieux la chaleur. — Au contraire, le verre, le marbre, la porcelaine, sont des corps *mauvais conducteurs*. — De tous les corps solides, c'est le bois qui pré-

citée dans l'explication, que les parois de l'enceinte et la surface du thermomètre soient *dépourvues de pouvoir réflecteur*, et qu'elles aient des *pouvoirs émissifs égaux*. Le thermomètre F' envoie sur le miroir AB' des rayons divergents qui sont réfléchis par ce miroir, puis par le miroir AB, vont passer par le point F, et parviennent ensuite à divers points de l'enceinte. Dans les mêmes directions, et en sens inverse, se propagent des rayons venant de l'enceinte, passant par F, et renvoyés par les miroirs vers le point F'. Puisque l'enceinte et le thermomètre ont même *pouvoir émissif*, et par suite même *pouvoir absorbant*, la perte de chaleur reste, pour le thermomètre, toujours égale au gain, et sa température reste invariable. — Au contraire, quand on vient à placer en F le ballon plein de glace, les rayons qui venaient de l'enceinte en passant par F, et qui étaient ainsi renvoyés par les miroirs sur le thermomètre F', sont remplacés par les rayons moins chauds qu'émet le ballon. Le thermomètre reçoit donc moins de chaleur que précédemment, c'est-à-dire moins de chaleur qu'il n'en perd : il doit donc éprouver un abaissement de température, comme le montre l'expérience.

**885. Identité de la chaleur et de la lumière.** — Il résulte de tout ce qui précède que la propagation de la chaleur se rapproche, en tous points, de la propagation de la lumière.

Pour la chaleur et pour la lumière, les lois de la réflexion sont identiques (870 et 871). — La décomposition d'un faisceau de rayons solaires par un prisme de sel gemme (875) montre que les rayons *calorifiques obscurs* se séparent des rayons lumineux à cause de leur moindre réfrangibilité, comme les rayons rouges se séparent des rayons violets. — Dans les rayons *calorifiques lumineux*, les propriétés calorifiques sont inséparables des propriétés lumineuses. — Enfin, l'étude de la transmission de la chaleur (876) montre que les rayons obscurs peuvent être transmis par certaines substances, et absorbés par d'autres, comme les rayons lumineux de certaines couleurs sont transmis par certaines substances transparentes, et absorbés par d'autres.

L'ensemble des phénomènes conduit donc à admettre que la chaleur et la lumière sont dues à une seule et même cause. — Cette hypothèse n'est point infirmée par l'existence de rayons de chaleur sans lumière, car il n'est pas absurde de supposer que l'organe de la vue, s'il était constitué d'une manière différente, pourrait être impressionné par ces rayons, comme il l'est par les rayons lumineux (\*).

(\*) Les liquides qui remplissent le globe de l'œil, et que les rayons doivent traverser avant de tomber sur la rétine, sont *diathermanes pour les rayons lumineux*, mais *athermanes pour les rayons obscurs* : c'est ce que l'expérience permet de constater directement, en opérant sur les liquides d'un œil de bœuf. Il en résulte que, en réalité, les rayons calorifiques obscurs n'arrivent pas à la rétine.

## CHAPITRE II

## CONDUCTIBILITÉ

**884. Propagation de la chaleur par conductibilité.** — Les observations journalières suffisent pour montrer que la chaleur peut se transmettre dans les corps solides par *conductibilité*, c'est-à-dire par une élévation graduelle de la température de leurs couches successives.

La méthode suivante permet de comparer entre eux les différents corps solides, au point de vue de leurs propriétés *conductrices*.

**885. Conductibilité des corps solides. — Appareil d'Ingenhousz.** — L'appareil d'Ingenhousz se compose d'une petite cuve rectangulaire de laiton (fig. 685), dans la paroi de laquelle sont assujetties des tiges de diverses substances : argent, cuivre, laiton, zinc, étain, verre, bois, etc. Ces tiges ont été couvertes d'une couche mince de cire (pour cela, on les a plongées dans un bain de cire fondue, et on les a laissées refroidir après les en avoir retirées). — On verse de l'eau bouillante dans la caisse; la chaleur se transmet dans la longueur des tiges; on juge de leur plus ou moins grande conductibilité, par la distance à laquelle se propage la fusion de la cire. — On constate ainsi, par exemple, que la cire fond jusqu'à l'extrémité de la tige d'argent, tandis que la fusion se propage à peine sur une longueur de quelques millimètres sur la tige de bois.

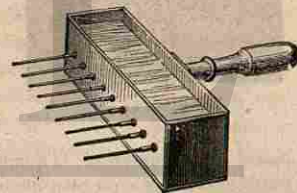


Fig. 685. — Appareil d'Ingenhousz

Les corps solides les plus usuels peuvent être classés comme il suit, par ordre de conductibilité décroissante :

*Argent, Cuivre, Or, Laiton, Zinc, Étain, Fer, Acier, Plomb, Platine, Bismuth;*

*Verre, Marbre, Porcelaine, Charbon, Bois.*

Les métaux sont donc les corps qui conduisent le mieux la chaleur. — Au contraire, le verre, le marbre, la porcelaine, sont des corps *mauvais conducteurs*. — De tous les corps solides, c'est le bois qui pré-

sente la plus faible conductibilité. C'est pour cette raison qu'on adapte des manches de bois aux outils de fer qui doivent être introduits dans le feu; des anses de bois, aux théières ou aux casseroles d'argent, etc.

886. **Coefficients de conductibilité.** — Pour comparer, d'une manière précise, les propriétés conductrices des divers corps, on a été conduit à la considération d'une quantité numérique, caractéristique de chaque corps, et qu'on appelle *coefficient de conductibilité*.

Pour définir cette expression, considérons une masse homogène indéfinie, limitée par deux plans parallèles M, M' (fig. 684), et constituant une sorte



Fig. 684.

de mur, dont les deux faces seront maintenues à des températures constantes T et T'. Au bout d'un certain temps, les points intérieurs arriveront chacun à une température déterminée, qu'ils conserveront ensuite indéfiniment. Or, il est facile de voir que, *une fois l'équilibre de température établi*, tous les plans parallèles aux faces du mur doivent laisser passer, dans un temps donné, par l'unité de surface, *des quantités égales de chaleur*. — En effet, supposons que la chaleur se propage de gauche à droite, et considérons deux plans quelconques P, Q, parallèles aux faces : si l'unité de surface du plan P laissait passer, dans un même temps, une quantité de chaleur plus grande que l'unité de surface du plan Q, il y aurait accumulation de chaleur entre ces deux plans, et la température des points compris entre eux devrait aller en s'élevant. — Cela posé, on appelle *coefficient de conductibilité*

*absolue* d'une substance, la quantité de chaleur qui traverse, en une seconde, l'unité de surface d'un plan quelconque parallèle aux faces d'un mur formé de cette substance, ce mur ayant pour épaisseur l'unité et présentant, entre ses faces extrêmes, *une différence de température de 1 degré*.

Soit  $c$  le coefficient de conductibilité absolue d'une substance; si le mur a pour épaisseur  $l$  et si ses deux faces sont à des températures T et T', une surface S, prise dans un plan parallèle aux faces du mur, laissera passer, en une seconde, une quantité de chaleur  $q = \frac{cS(T - T')}{l} = \frac{cSV}{l}$ , en désignant par V la différence des températures des deux faces. — L'identité de cette formule et de celle qui est la traduction des lois d'Ohm (572) fait ressortir l'analogie qui existe, entre la propagation de l'électricité dans un fil métallique, et la propagation de la chaleur dans un mur.

Les conditions dans lesquelles nous nous sommes placés, pour définir les coefficients de conductibilité absolue, sont difficilement réalisables; aussi les valeurs absolues de ces coefficients ne sont-elles pas connues avec précision. — Mais les expériences de Despretz, et surtout celles de MM. Wiedemann et

Franz, ont fait connaître, avec une très grande exactitude, *les rapports* que présentent entre eux les coefficients de conductibilité des divers métaux.

Le tableau suivant donne les coefficients de conductibilité des principaux métaux, en représentant conventionnellement par 100 celui de l'argent, qui est le métal le plus conducteur.

## COEFFICIENTS DE CONDUCTIBILITÉ DES MÉTAUX.

|                 |       |                    |      |
|-----------------|-------|--------------------|------|
| Argent. . . . . | 100,0 | Fer. . . . .       | 11,9 |
| Cuivre. . . . . | 77,6  | Acier. . . . .     | 11,1 |
| Or. . . . .     | 55,2  | Plomb. . . . .     | 8,5  |
| Laiton. . . . . | 25,6  | Platine. . . . .   | 8,4  |
| Zinc. . . . .   | 19,0  | Palladium. . . . . | 6,5  |
| Étain. . . . .  | 14,4  | Bismuth. . . . .   | 1,8  |

Il est à remarquer que, dans ce tableau, les métaux sont rangés à peu près dans le même ordre que celui de leurs résistances spécifiques électriques croissantes (577), c'est-à-dire dans l'ordre de leurs conductibilités électriques décroissantes.

887. **Courants produits dans les liquides ou dans les gaz, chauffés par leur partie inférieure.** — Lorsqu'on chauffe un

liquide par la partie inférieure, comme on le fait d'ordinaire, les couches qui reçoivent directement l'action de la chaleur se dilatent; par suite, leur densité diminuant, elles s'élèvent; elles sont remplacées par d'autres qui s'échauffent à leur tour, et ainsi de suite. Il s'établit ainsi des courants ascendants de liquide chaud, et des courants descendants de liquide froid. — On peut rendre ces courants visibles par une expérience simple. Une cloche de verre renversée (fig. 685) contient de l'eau, dans laquelle on a mis en suspension un peu de sciure de bois; en chauffant cette cloche par sa paroi inférieure, on voit les parcelles de bois, entraînées par les mouvements de l'eau, s'élever du point chauffé vers la surface, et redescendre ensuite en longeant les parois du vase. — Ce déplacement continu des diverses parties du liquide, qui a pour effet de répartir à peu près uniformément la chaleur dans toute sa masse, a été désigné sous le nom de *convection*.

Les gaz étant plus dilatables et plus mobiles que les liquides, les mouvements de ce genre s'y manifestent plus facilement encore. — C'est ainsi, par exemple, que l'air échauffé au contact des parois d'un poêle monte à la partie supérieure de la pièce; il est remplacé par de l'air plus froid, qui s'échauffe et s'élève à son tour, et ainsi de suite.



Fig. 685. — Courants produits dans un liquide chauffé.

— On peut rendre sensible ce mouvement ascendant de l'air en adaptant au tuyau du poêle un fil de fer recourbé (fig. 686), sur l'extrémité duquel on place une bande de papier découpée en spirale, de manière qu'elle forme une hélice enroulée autour du fil.

L'air qui s'élève autour du tuyau, en rencontrant l'hélice, lui communique un mouvement de rotation continu.

De même, quand la surface de la Terre est chauffée par le soleil, les couches d'air voisines du sol s'élèvent à mesure qu'elles s'échauffent; elles sont remplacées par de l'air froid, qui afflue des régions voisines, et qui se comporte ensuite de la même manière. — C'est l'une des causes qui produisent les vents, à la surface de la Terre.

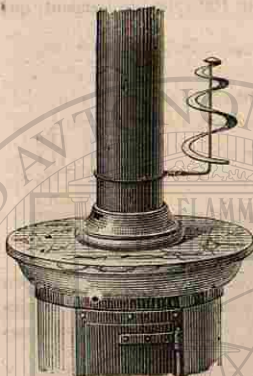


Fig. 686.  
Mouvement ascendant  
de l'air chaud.

888. **Conductibilité des liquides.** — D'après ce que l'on vient de voir, pour juger si les liquides sont conducteurs de la chaleur, il faut faire en sorte qu'il ne puisse pas s'y produire des mouvements de convection. — C'est à quoi l'on parvient en les chauffant par la partie supérieure. La conductibilité est tellement faible, qu'on peut faire bouillir, à la surface, de l'eau placée dans un tube de verre, sans faire éprouver une élévation de température sensible à la partie inférieure.

Une expérience due à Murray montre cependant que la chaleur peut se propager par conductibilité à travers un liquide. Un thermomètre fut placé au fond d'une cavité creusée dans un bloc de glace et remplie d'huile; on mit un corps chaud en contact avec la surface du liquide, et au bout de quelques minutes, on vit le thermomètre indiquer un petit accroissement de température. — On ne pouvait pas admettre que la chaleur se fût communiquée par les parois du vase; car, la glace étant à 0°, la chaleur qu'elle eût absorbée n'aurait eu pour effet que d'en faire fondre une partie, et non d'élever la température. — Pour prouver que la chaleur ne s'était pas transmise par rayonnement à travers le liquide, on répétait l'expérience en présentant le corps chaud à une petite distance de la surface: l'effet produit sur le thermomètre était incomparablement plus faible.

889. **Conductibilité des gaz.** — D'après ce que nous avons vu (887), la propagation de la chaleur dans les gaz doit se faire, le plus souvent, par convection. — De plus, les gaz étant très diathermanes, il est toujours difficile de constater directement les effets de leur conductibilité, même en les chauffant par la partie supérieure: ce qui détermine les indications du thermomètre placé à la partie inférieure,

c'est bien plutôt la chaleur qu'il reçoit par rayonnement, que l'élévation de température des couches qui sont en contact avec lui.

M. Magnus a cependant réussi à constater que l'hydrogène est conducteur. Un cylindre plein de gaz hydrogène étant chauffé par la partie supérieure, un thermomètre placé à la partie inférieure s'échauffe d'autant plus rapidement que la pression du gaz est plus grande; cet effet ne peut être attribué qu'à la conductibilité.

890. **Applications usuelles de la conductibilité.** — Lorsque, par un temps froid, nous appliquons la main sur un morceau de fer, puis sur un morceau de bois, le fer nous paraît *plus froid* que le bois. Cependant, au moment où nous les avons touchés, ils étaient l'un et l'autre à la même température que l'air extérieur. Mais, le fer étant un corps conducteur, la petite quantité de chaleur qui lui a été communiquée par notre main s'est répandue dans toute sa masse, en sorte qu'elle n'a pas pu l'échauffer d'une manière sensible. Au contraire, le bois étant mauvais conducteur, la chaleur transmise par la main est restée dans les points que nous avons touchés, et leur a fait prendre une température plus élevée. — Voici une expérience qui montre, d'une manière frappante, des effets du même genre. — On prend une boule de cuivre, et on l'enveloppe d'une couche de mousseline, serrée sur sa surface. On applique sur cette boule un morceau de charbon rouge: l'étoffe ne brûle pas, parce que la chaleur transmise par le charbon se répand dans toute la masse du cuivre, et la température ne peut s'élever que très lentement. — Au contraire, si on fait la même expérience avec une boule de bois, enveloppée d'une couche de mousseline, l'étoffe est brûlée, parce que la chaleur transmise aux points touchés ne peut pas se propager aux points voisins.

891. **Propriétés conductrices des toiles métalliques.** — **Lampe de sûreté.** — Lorsqu'on place une toile métallique en travers de la flamme d'une bougie ou d'un bec de gaz, on constate que la flamme ne se produit plus qu'*au-dessous* de la toile. Ce résultat est dû à ce que la toile métallique, qui est conductrice, refroidit rapidement les gaz qui la traversent, et les amène à une température inférieure à la température de combustion. — Cependant on peut s'assurer que les gaz combustibles traversent la toile métallique, en plaçant, *au-dessus* d'elle, une allumette enflammée: il se produit en ce point une nouvelle flamme.

C'est sur ces propriétés des toiles métalliques qu'est fondée la construction des lampes de sûreté, destinées à préserver des explosions du grisou les ouvriers qui travaillent dans les mines de houille. — La lampe de sûreté, imaginée par Davy et perfectionnée par Combes (fig. 687), se compose d'une lampe ordinaire à huile C, surmontée d'un cylindre de verre A, qui se termine par une cheminée B formée par une toile métallique. — Supposons que l'atmosphère de la mine

contienne une proportion notable de gaz hydrogène carboné, dont le mélange avec l'air produirait, à l'approche d'un corps enflammé, une détonation redoutable. Ce mélange pénètre, à travers la toile métallique, dans l'intérieur de l'appareil; il peut prendre feu au contact de la flamme, mais la combustion ne peut pas se propager à l'extérieur, et les dangers du *grisou* sont ainsi conjurés.



Fig. 687.  
Lampe de sûreté.

892. **Conservation de la chaleur.** — Pour conserver la chaleur, pendant l'hiver, à l'intérieur de nos appartements, les murs de pierre doivent avoir une épaisseur assez considérable, parce que la pierre est un corps assez conducteur; la brique, qui est moins conductrice, est préférable sous ce rapport. — Il faut remarquer aussi que, dans nos appartements, c'est surtout par la surface des vitres que la chaleur se perd au dehors. Dans les pays froids, on rend la déperdition beaucoup moindre, en employant des doubles fenêtres, qui emprisonnent entre elles une couche d'air.

Les animaux des pays froids ont le corps couvert d'une fourrure; nous nous couvrons, pour nous préserver du froid, soit de fourrures, soit d'étoffes de laine, ou de vêtements ouatés. —

L'efficacité de tous ces moyens de protection s'explique toujours de la même manière: c'est la couche d'air maintenue immobile, par les poils de la fourrure ou par les filaments de l'étoffe, qui joue surtout ici le rôle de corps mauvais conducteur. Pour qu'un vêtement soit chaud, l'important n'est pas qu'il soit lourd, mais que le tissu soit assez moelleux pour n'avoir qu'un poids relativement faible, sous une assez grande épaisseur. — C'est ainsi encore qu'un édredon, formé de plumes très légères, constitue une sorte de coussin d'air, préservant mieux du froid qu'une couverture d'un tissu serré.

Pour soustraire des *corps froids* à l'influence de la chaleur, c'est encore à des moyens analogues qu'on a recours. — Les *glacières*, où l'on conserve jusque pendant l'été, la glace qu'on y a accumulée pendant l'hiver, sont de vastes cavités, creusées dans le sol. La paroi est formée par une maçonnerie garnie d'une double paroi de bois, dans laquelle on entasse de la poussière de charbon; la cavité est fermée par un toit, placé au niveau du sol, et couvert de paille.

## LIVRE SIXIÈME

### MÉTÉOROLOGIE

895. — La *météorologie* a pour objet l'étude des phénomènes qui s'accomplissent à la surface de notre globe et dans notre atmosphère.

Ces phénomènes sont assez complexes, et il est parfois difficile de discerner le degré d'influence de chacune des causes qui les produisent. D'ailleurs, comme il est impossible de faire varier méthodiquement les conditions dans lesquelles ils s'accomplissent, le météorologiste doit se contenter de comparer le plus grand nombre possible d'observations faites dans des circonstances diverses et telles que les lui offre la nature; de plus, ces observations elles-mêmes présentent nécessairement des lacunes, pour les points du globe sur lesquels nous n'avons que des données météorologiques incomplètes. — Nous nous bornerons à l'exposé des résultats qui présentent actuellement un caractère de certitude suffisante (\*).

#### I. — RÉPARTITION DE LA TEMPÉRATURE A LA SURFACE DE LA TERRE.

894. **Observations thermométriques.** — Pour qu'un thermomètre, installé à demeure, indique réellement la température de l'air, il est indispensable qu'il soit placé à l'ombre, de manière qu'il ne reçoive pas directement les rayons du soleil. Mais il est nécessaire, en outre, de disposer des écrans autour de lui, afin de le garantir encore de la chaleur rayonnante qui pourrait lui être envoyée par le sol échauffé, par des murs frappés par le soleil, etc. — Quand ces précautions ne sont pas observées, il peut arriver que des thermomètres,

(\*) Pour la météorologie, la plupart des modifications par lesquelles nos dernières éditions diffèrent des précédentes sont dues à M. E. Nouel, qui a bien voulu mettre à notre disposition ses connaissances spéciales sur cette partie de la science.

contienne une proportion notable de gaz hydrogène carboné, dont le mélange avec l'air produirait, à l'approche d'un corps enflammé, une détonation redoutable. Ce mélange pénètre, à travers la toile métallique, dans l'intérieur de l'appareil; il peut prendre feu au contact de la flamme, mais la combustion ne peut pas se propager à l'extérieur, et les dangers du *grisou* sont ainsi conjurés.



Fig. 687.  
Lampe de sûreté.

892. **Conservation de la chaleur.** — Pour conserver la chaleur, pendant l'hiver, à l'intérieur de nos appartements, les murs de pierre doivent avoir une épaisseur assez considérable, parce que la pierre est un corps assez conducteur; la brique, qui est moins conductrice, est préférable sous ce rapport. — Il faut remarquer aussi que, dans nos appartements, c'est surtout par la surface des vitres que la chaleur se perd au dehors. Dans les pays froids, on rend la déperdition beaucoup moindre, en employant des doubles fenêtres, qui emprisonnent entre elles une couche d'air.

Les animaux des pays froids ont le corps couvert d'une fourrure; nous nous couvrons, pour nous préserver du froid, soit de fourrures, soit d'étoffes de laine, ou de vêtements ouatés. —

L'efficacité de tous ces moyens de protection s'explique toujours de la même manière: c'est la couche d'air maintenue immobile, par les poils de la fourrure ou par les filaments de l'étoffe, qui joue surtout ici le rôle de corps mauvais conducteur. Pour qu'un vêtement soit chaud, l'important n'est pas qu'il soit lourd, mais que le tissu soit assez moelleux pour n'avoir qu'un poids relativement faible, sous une assez grande épaisseur. — C'est ainsi encore qu'un édredon, formé de plumes très légères, constitue une sorte de coussin d'air, préservant mieux du froid qu'une couverture d'un tissu serré.

Pour soustraire des *corps froids* à l'influence de la chaleur, c'est encore à des moyens analogues qu'on a recours. — Les *glacières*, où l'on conserve jusque pendant l'été, la glace qu'on y a accumulée pendant l'hiver, sont de vastes cavités, creusées dans le sol. La paroi est formée par une maçonnerie garnie d'une double paroi de bois, dans laquelle on entasse de la poussière de charbon; la cavité est fermée par un toit, placé au niveau du sol, et couvert de paille.

## LIVRE SIXIÈME

### MÉTÉOROLOGIE

895. — La *météorologie* a pour objet l'étude des phénomènes qui s'accomplissent à la surface de notre globe et dans notre atmosphère.

Ces phénomènes sont assez complexes, et il est parfois difficile de discerner le degré d'influence de chacune des causes qui les produisent. D'ailleurs, comme il est impossible de faire varier méthodiquement les conditions dans lesquelles ils s'accomplissent, le météorologiste doit se contenter de comparer le plus grand nombre possible d'observations faites dans des circonstances diverses et telles que les lui offre la nature; de plus, ces observations elles-mêmes présentent nécessairement des lacunes, pour les points du globe sur lesquels nous n'avons que des données météorologiques incomplètes. — Nous nous bornerons à l'exposé des résultats qui présentent actuellement un caractère de certitude suffisante (\*).

#### I. — RÉPARTITION DE LA TEMPÉRATURE A LA SURFACE DE LA TERRE.

894. **Observations thermométriques.** — Pour qu'un thermomètre, installé à demeure, indique réellement la température de l'air, il est indispensable qu'il soit placé à l'ombre, de manière qu'il ne reçoive pas directement les rayons du soleil. Mais il est nécessaire, en outre, de disposer des écrans autour de lui, afin de le garantir encore de la chaleur rayonnante qui pourrait lui être envoyée par le sol échauffé, par des murs frappés par le soleil, etc. — Quand ces précautions ne sont pas observées, il peut arriver que des thermomètres,

(\*) Pour la météorologie, la plupart des modifications par lesquelles nos dernières éditions diffèrent des précédentes sont dues à M. E. Nouel, qui a bien voulu mettre à notre disposition ses connaissances spéciales sur cette partie de la science.

placés à des expositions diverses, indiquent au même instant des températures très différentes (\*).

Le thermomètre à mercure est celui qu'on emploie de préférence. Dans les régions polaires, où la température s'abaisse au-dessous de  $-40^{\circ}$ , point de congélation du mercure, on le remplace par le thermomètre à alcool.

Les thermomètres à *maxima* et à *minima* permettent de déterminer les limites extrêmes entre lesquelles a pu varier la température d'un lieu, pendant la durée d'une journée par exemple, sans s'assujettir à suivre, d'une manière continue, la marche des instruments.



Fig. 688.  
Thermomètre  
à maxima  
et à minima.

Le thermomètre de Six, modifié par Bellani, offre la réunion, dans un même instrument, d'un thermomètre à *maxima* et d'un thermomètre à *minima*. La figure 688 représente cet instrument tel qu'on le construit aujourd'hui. — Le réservoir R et la tige recourbée qui se continue avec lui contiennent de l'alcool, jusqu'en b; de b en a, est une colonne de mercure; enfin, au-dessus de a et jusqu'à la chambre C, est une seconde colonne d'alcool; à chacune des extrémités a et b de la colonne de mercure, sont deux petits cylindres d'émail, servant d'index,  $\alpha$  et  $\beta$ . Lorsque la température s'élève, la dilatation de l'alcool contenu dans le réservoir R et dans la branche de gauche, et celle de la colonne de mercure, ont pour effet de soulever le cylindre  $\alpha$ ; le cylindre  $\beta$ , maintenu contre la paroi du tube par un petit cheveu qui y est fixé et qui forme ressort, reste immobile au milieu de l'alcool. Lorsque la température s'abaisse, la contraction de l'alcool entraîne la colonne de mercure en sens inverse; c'est le cylindre  $\beta$  qui est soulevé, le cylindre  $\alpha$  restant en place. Le cylindre de droite indique donc les *maxima*; celui de gauche, les *minima*: chacune des deux branches porte une échelle indiquant les degrés. — Pour permettre de ramener facilement les index au contact du mercure, on a

placé, dans chacun d'eux, une tige de fer très fine, qu'on attire avec un aimant. Mais, pour que la tige d'un thermomètre puisse livrer passage à un index solide, il faut toujours qu'elle ait un assez grand diamètre

(\*) Lorsqu'on veut déterminer, avec précision, la température de l'air à un certain moment, il suffit de suspendre un thermomètre à une petite corde, que l'on tient à la main, et de le faire tourner vivement comme une fronde, pendant quelques instants. Ce mouvement, en déterminant un renouvellement rapide de l'air autour de l'instrument, l'amène à indiquer une température qui est exactement celle de l'air lui-même.

intérieur, ce qui permet difficilement de donner à l'instrument une sensibilité suffisante pour des observations précises. Aussi, les météorologistes emploient-ils préférablement, pour la détermination des *maxima* en particulier, un thermomètre dans lequel on se sert, comme index, d'une très petite colonne de mercure, séparée du reste liquide par une bulle d'air. — Cet instrument est, en réalité, un thermomètre à mercure ordinaire, à tige très fine, et à la partie supérieure duquel on a laissé un peu d'air. Pour le transformer en un thermomètre à *maxima*, il suffit de faire passer, de la tige dans la chambre supérieure, une gouttelette de mercure: on la fait redescendre ensuite dans la tige, comme si on voulait la réunir au reste de la colonne; la réunion est empêchée par la petite quantité d'air qui est restée dans la tige. — Pour mettre l'instrument en expérience, on le place dans une position horizontale, après avoir amené l'index de mercure aussi près que possible de l'extrémité de la colonne. Lorsque la température s'élève, la dilatation de la colonne pousse devant elle l'index; quand la température s'abaisse, l'index reste immobile; on pourra donc lire, au bout d'un temps quelconque, la température la plus haute à laquelle aura été soumis l'instrument.

[ 895. **Températures moyennes.** — On nomme *température moyenne d'un jour*, en un lieu déterminé, la moyenne des températures observées, d'heure en heure, de minuit à minuit. C'est la somme de 24 observations, divisée par le nombre 24. Dans la plupart des cas, cette moyenne concorde sensiblement avec celle qui est fournie par trois observations faites, la première au lever du soleil, la seconde à midi, la troisième au coucher du soleil. — Enfin, de Humboldt a montré qu'on obtient encore le même nombre, à quelques dixièmes de degré près, en prenant la moyenne entre la température *maximum* et la température *minimum* du jour. Dans les observatoires qui ne sont pas organisés pour des déterminations fréquentes, il suffit donc de relever, une fois par jour, les indications d'un thermomètre à *maxima* et d'un thermomètre à *minima*.

On nomme *température moyenne d'un mois*, la moyenne des températures de tous les jours de ce mois. C'est la somme de 30 ou 31 valeurs numériques, divisée par le nombre 30 ou par le nombre 31.

On nomme *température moyenne d'une année*, la moyenne des températures des mois de cette année: c'est la somme de 12 valeurs numériques, divisée par le nombre 12.

Enfin, on désigne sous le nom de *température moyenne d'un lieu*, la moyenne des températures d'un grand nombre d'années consécutives. Cette donnée devient d'autant plus exacte, qu'on emploie, pour l'évaluer, un plus grand nombre de moyennes annuelles. — A l'Observatoire de Paris, la moyenne fournie par 50 années d'observations consécutives est sensiblement  $10^{\circ},80$ .



896. **Variations de la température pendant la durée du jour.** — La température la plus basse du jour, en un lieu déterminé, s'observe en général vers le lever du soleil; à partir de ce moment, le thermomètre monte graduellement jusqu'à la température maximum, laquelle s'observe vers deux heures en été, et vers une heure en hiver; il redescend ensuite jusqu'au retour du minimum, et ainsi de suite, pourvu qu'il n'intervienne aucune cause perturbatrice.

Ces résultats, fournis par l'expérience, sont faciles à expliquer. — Le soleil, depuis son lever jusqu'à midi, s'élève de plus en plus au-dessus de l'horizon: donc, d'une part, l'inclinaison des rayons solaires diminuant, la quantité de chaleur qui tombe sur une surface déterminée augmente; d'autre part, ces rayons ayant à parcourir dans l'atmosphère un trajet moins long, l'absorption qu'ils y éprouvent est diminuée: pour ces deux raisons, la terre reçoit plus de chaleur qu'elle n'en perd par rayonnement, et sa température va en croissant. A partir de midi, la hauteur du soleil au-dessus de l'horizon diminue, et la quantité de chaleur que reçoit la terre décroît; toutefois, pendant quelque temps, cette quantité est encore supérieure à celle qui est émise par le rayonnement, et la température continue à s'élever. Enfin, il arrive un moment où la perte de chaleur devient égale au gain: la température devient alors stationnaire. — Puis, jusqu'au coucher du soleil, la température s'abaisse, parce que la chaleur émise est supérieure à la chaleur absorbée, et le refroidissement s'accélère encore après que le soleil a disparu. — Enfin le soleil reparait; au bout de quelques moments, la température remonte, et les mêmes phénomènes se reproduisent.

897. **Variations de la température pendant l'année.** — Si l'on compare entre elles les températures moyennes du jour, aux diverses époques de l'année et pour un même lieu, par exemple pour un point de la France, on observe un minimum vers le premier tiers de janvier, et un maximum vers le milieu de juillet.

C'est là encore un résultat facile à concevoir. — On sait que, pour notre hémisphère, le rapport de la durée du jour à celle de la nuit est minimum au 21 décembre (solstice d'hiver), et va en augmentant depuis cette époque jusqu'au 21 juin (solstice d'été); en outre, entre ces deux époques, la hauteur du soleil à midi devient toujours de plus en plus grande. Donc, à mesure qu'on s'approche du 21 juin, la quantité de chaleur reçue par la Terre en vingt-quatre heures augmente, et la moyenne du jour s'élève; elle continue encore à s'élever pendant un certain temps après cette époque, tant que la quantité de chaleur absorbée est supérieure à la quantité de chaleur émise. — A partir de la mi-juillet, la moyenne du jour s'abaisse, parce que la quantité de chaleur reçue en vingt-quatre heures décroît de plus en plus, et cet abaissement se continue quelques jours encore après le 21 décembre.

898. **Délimitation des saisons météorologiques.** — On considère, en météorologie, le mois le plus chaud, c'est-à-dire le mois de juillet, comme le milieu de l'été. Alors l'été, au lieu d'avoir les limites assignées en astronomie, savoir le 21 juin et le 22 septembre, comprend les mois de *juin, juillet, août*. — De même, le milieu de l'hiver est formé par le mois de janvier, et l'hiver comprend les mois de *décembre, janvier, février*. — Le *printemps* et l'*automne* comprennent les mois intermédiaires entre les deux autres saisons.

Cela posé, si l'on prend, en un lieu déterminé, la moyenne des trois mois de l'été, pendant plusieurs étés consécutifs, la moyenne des moyennes ainsi obtenues constituera ce qu'on nomme la *température moyenne de l'été* pour ce lieu. — On obtiendra de même la *température moyenne de l'hiver* pour un lieu déterminé.

899. **Influence de l'altitude sur la température.** — Les observations faites sur les montagnes, ou dans les ascensions aérostatiques, montrent que la température décroît à mesure qu'on s'élève au-dessus de la surface du globe. — La loi suivant laquelle s'effectue cette décroissance n'est connue qu'imparfaitement, et paraît dépendre de conditions diverses: cependant on a observé, en général, un abaissement de température de 1 degré pour un accroissement d'*altitude* d'environ 180 mètres (\*).

Lorsque, en gravissant une montagne, on observe les changements successifs qu'éprouve la végétation, on trouve précisément ceux qu'on rencontrerait en partant du pied de la montagne et se dirigeant, à travers les pays de plaines, vers le pôle. En gravissant, par exemple, le Chimborazo, qui est situé dans la chaîne des Andes, au voisinage de l'équateur, on trouve d'abord la végétation propre aux régions équatoriales, puis celle de la zone torride, celle des zones tempérées, celle des zones glaciales, et la région des neiges perpétuelles.

Enfin, l'observation montre, ainsi qu'il était facile de le prévoir, que la limite inférieure des neiges perpétuelles se trouve, sur les diverses montagnes, à une hauteur d'autant moindre que la montagne est à une latitude plus élevée. Ainsi, à Quito, dans le voisinage de l'équateur, cette limite est à 4800 mètres; dans les Alpes, à 2700 mètres; dans les montagnes de l'Islande, à 956 mètres.

(\* Ce chiffre ne s'applique qu'à la température *moyenne* des points situés à des hauteurs différentes au-dessus de la mer. Une foule de circonstances accidentelles modifient la loi de distribution de la température, à un moment donné, sur les différents points d'une même verticale.

Quant à la raison qui détermine cette décroissance, il faut la chercher dans la théorie mécanique de la chaleur. Une masse d'air, en s'élevant, se refroidit par la détente qu'elle éprouve; elle s'échauffe, au contraire, en descendant et se comprimant. On a pu calculer, d'après cela, la loi théorique de la variation de la température dans l'atmosphère: on a trouvé précisément un abaissement de température de 1 degré pour un accroissement de hauteur de 180 mètres.

900. **Lignes représentant la distribution des températures à la surface du globe.** — Pour rendre facilement saisissable la distribution des températures moyennes à la surface du globe, de Humboldt a eu l'idée de construire, sur la sphère, des lignes qui réunissent les points présentant des valeurs égales pour les moyennes de même espèce. — On a construit trois systèmes de lignes :

1° Les *lignes isothermes* (ἴσος, égal; θερμός, chaleur), qui réunissent les points offrant la même température moyenne de l'année ;

2° Les *lignes isotheres* (ἴσος, égal; θερος, été), qui réunissent les points offrant la même température moyenne de l'été ;

3° Les *lignes isochimènes* (ἴσος, égal; χειμών, hiver), qui réunissent les points offrant la même température moyenne de l'hiver (\*).

La figure 689 représente ces trois systèmes de lignes en Europe, pour les températures successives de 5 en 5 degrés. Nous indiquerons plus loin comment on peut se rendre compte des irrégularités qu'elles présentent; voyons d'abord quel parti on peut tirer de la comparaison des trois systèmes entre eux.

901. **Climats.** — On nomme *climat* d'un lieu, l'ensemble des conditions météorologiques auxquelles ce lieu est soumis dans l'intervalle d'une année.

Si nous nous bornons, pour le moment, aux conditions de température, on voit immédiatement que la connaissance de la ligne isotherme qui passe par le point considéré, ou des lignes isothermes entre lesquelles ce point est compris, donne la moyenne des températures qui s'y succèdent dans l'espace d'une année, en tenant compte toutefois de sa hauteur au-dessus de la mer (note au bas de la page). — Mais ce n'est là qu'une notion imparfaite, car une même moyenne peut être fournie par des températures qui varient entre des limites extrêmement différentes. Considérons, par exemple, la ligne isotherme de  $+10^{\circ}$  (fig. 689), qui traverse la partie septentrionale de la mer Caspienne, le nord de l'Allemagne, la Hollande, l'Angleterre, et vient passer au sud de l'Écosse. En tous les points de cette ligne, la température moyenne de l'année est la même : cependant il s'en faut de beaucoup qu'ils offrent, dans le cours de l'année, des températures semblables. En effet, la figure montre que les bords septentrionaux de la mer Caspienne sont compris entre la ligne isothère de  $+25^{\circ}$  et celle  $+20^{\circ}$ ; qu'ils sont coupés par la ligne isochimène de  $-5^{\circ}$ ; la moyenne de l'été y est donc très élevée, et celle de l'hiver fort basse. Au contraire, on

(\*) Il est important de remarquer que les lignes ainsi tracées se rapportent aux moyennes corrigées, c'est-à-dire réduites au niveau de la mer. On adopte, pour faire cette correction, le chiffre de 1 degré pour 180 mètres de différences d'altitude (899). Si l'on essayait de tracer les isothermes vraies pour un pays, on obtiendrait des lignes ayant les formes les plus capricieuses, et rappelant par leurs dispositions les courbes dites de niveau en géodésie.

voit que le sud de l'Irlande est coupé par la ligne isothère de  $+15^{\circ}$  et par la ligne isochimène de  $+5^{\circ}$ , en sorte que la moyenne de l'été et

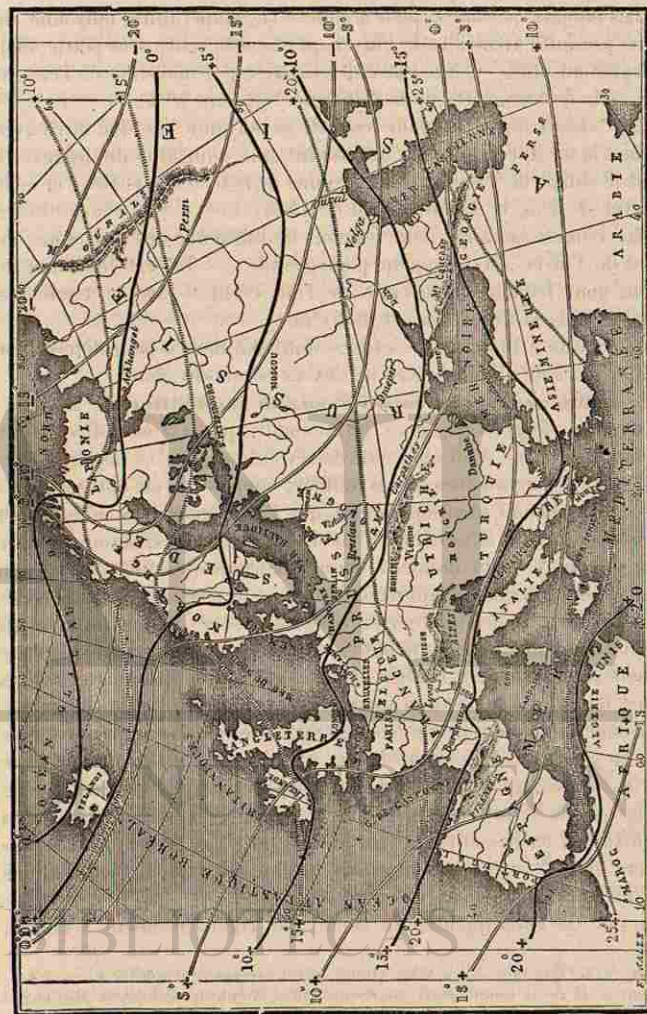


Fig. 689. — Lignes isothermes. — Lignes isotheres. — Lignes isochimènes.

la moyenne de l'hiver sont toutes deux des températures modérées, s'écartant peu de la moyenne annuelle. Ces deux régions, situées sur une même ligne isotherme, sont donc cependant dans des conditions

de température très différentes. — Ces remarques sont tout à fait générales (\*).

On distingue généralement trois variétés de climats :

1° Les *climats constants*, pour lesquels la température moyenne de l'été ne présente avec celle de l'hiver qu'une différence très petite, de 6 à 7 degrés au plus. — Ainsi aux îles Canaries, la moyenne de l'été est 25°,4, celle de l'hiver 18°,0 : la différence est donc 5°,8 ;

2° Les *climats tempérés*, pour lesquels la moyenne de l'été offre avec celle de l'hiver une différence qui atteint une quinzaine de degrés. — Tel est le climat de Paris, où, la moyenne de l'été étant + 18°,4 et celle de l'hiver + 5°,5, la différence est de 14°,8.

3° Les *climats excessifs*, pour lesquels la différence des moyennes de l'été et de l'hiver est beaucoup plus grande. — Tel est le climat de Moscou, pour lequel, la moyenne de l'été étant + 18°,4 et celle de l'hiver — 9°,1, la différence est de 27°,5.

Il nous reste à indiquer les causes dont l'influence peut déterminer les différences de climats entre les divers points du globe.

1902. **Influence de la latitude sur la répartition de la température.** — Supposons, pour un moment, que la Terre offre rigoureusement la forme d'un ellipsoïde de révolution, sans les aspérités qui constituent les montagnes et les vallées; supposons, en outre, que sa surface soit partout identique; enfin, que l'atmosphère soit immobile et partout identique à elle-même. — Dans ces hypothèses, la température de chaque point, à un moment donné, dépendrait seulement : 1° du temps pendant lequel il aurait été soumis ou soustrait à l'action des rayons solaires; 2° de l'inclinaison sous laquelle ces rayons lui seraient parvenus. Or, tous les points qui sont placés sur un même parallèle viennent successivement s'offrir dans les mêmes positions aux rayons solaires, dans l'espace de vingt-quatre heures : tous ces points présenteraient donc tour à tour une même température, à mesure qu'une même heure du jour arriverait pour chacun d'eux. — De même, pendant le cours de l'année, les variations de température seraient les mêmes pour tous les points d'un même parallèle. — Enfin, les différences qu'on rencontrerait, en passant d'un parallèle à un autre, dépendraient uniquement des changements dans les durées relatives des jours et des nuits, et dans l'inclinaison des rayons solaires.

Bien que ces conséquences ne soient pas rigoureusement vérifiées,

(\*) Pour avoir une idée exacte d'un climat, il est nécessaire d'ajouter à ces déterminations celle de la température *maximum* qui survient au moment le plus chaud de l'été, et celle de la température *minimum* à laquelle le thermomètre peut descendre pendant les jours les plus froids de l'hiver. — Ces températures extrêmes, qui ne sont souvent que passagères, et ne font varier que très peu la moyenne de l'été ou de l'hiver, peuvent avoir cependant sur la végétation une influence considérable, en permettant à certains végétaux d'arriver en quelques jours à maturité, ou en faisant périr subitement ceux qui auraient pu vivre pendant le reste de l'année.

on conçoit comment on a pu partager la surface du globe en cinq zones géographiques : cette division fournira au moins des indications générales sur la distribution de la température. Ces zones sont :

1° La *zone torride*, limitée par les deux tropiques, c'est-à-dire par les deux parallèles qui sont situés, de part et d'autre de l'équateur, à une latitude de 23° 28'. — Pour les points de cette zone qui sont placés sur l'équateur même, les jours sont, pendant toute l'année, égaux aux nuits; en outre, le soleil parvient toujours, aux heures voisines de midi, très près du zénith, c'est-à-dire qu'il arrive presque dans la direction de la verticale. De ces deux remarques on peut conclure que la température des points de l'équateur doit être à la fois, 1° *très uniforme* pendant l'année; 2° *très élevée* (\*). — Lorsqu'on s'éloigne de l'équateur pour s'approcher de l'un des tropiques, les jours cessent d'être égaux aux nuits, excepté au moment des deux équinoxes; mais la différence, sous les tropiques mêmes, ne dépasse pas trois heures aux époques où elle est maximum, c'est-à-dire aux époques des deux solstices : le soleil s'élève encore très haut sur l'horizon. La température de ces points doit donc être : 1° un peu *moins uniforme* qu'à l'équateur; 2° un peu *moins élevée* (\*\*).

2° Les deux *zones tempérées*, situées de part et d'autre de la zone torride, chacune d'elles étant limitée, d'une part par l'un des tropiques, de l'autre par le cercle polaire, c'est-à-dire par le petit cercle situé à 23° 28' du pôle (ou autrement, à la latitude de 66° 52'). — Pour les points de ces zones, à mesure qu'on s'éloigne des tropiques, la différence des jours et des nuits atteint une valeur maximum d'autant plus considérable, et la hauteur maximum du soleil au-dessus de l'horizon devient d'autant moindre, qu'on s'approche davantage des cercles polaires. L'été peut encore être assez chaud, parce que la longueur des jours compense, jusqu'à un certain point, l'obliquité que présentent, même à cette époque, les rayons solaires; mais l'hiver devient froid, parce que l'époque de la durée maximum des nuits coïncide avec celle de l'obliquité maximum des rayons solaires. — De là résulte que, en s'éloignant du tropique, on doit rencontrer : 1° une température *de plus en plus variable* pendant la durée de l'année; 2° une température moyenne *de plus en plus basse*. Le climat, d'abord tempéré, devient bientôt excessif, et la moyenne annuelle descend à des valeurs très faibles (\*\*\*).

(\*) A l'île de Singapour, dans l'Inde, la différence entre la moyenne de l'été et celle de l'hiver est de 2 degrés, et la température moyenne annuelle est de 26°,7.

(\*\*) A la Havane, dans les grandes Antilles, c'est-à-dire à peu près sous le tropique du Cancer, la différence des moyennes de l'été et de l'hiver est de 5°,4, et la moyenne annuelle est d'environ 25°.

(\*\*\*) Aux îles Canaries, la différence entre la moyenne de l'été et celle de l'hiver est d'environ 6°, et la moyenne annuelle est de 21°,8. — A Bordeaux, la différence entre

3° Les deux *zones glaciales*, comprises chacune entre l'un des cercles polaires et le pôle correspondant. — Dans ces zones, la durée maximum de la nuit, qui correspond à l'un des solstices, est de vingt-quatre heures pour les points situés sur les cercles polaires eux-mêmes, et devient de plusieurs semaines ou de plusieurs mois à mesure qu'on s'approche des pôles : il est vrai que la durée maximum du jour, qui correspond à l'autre solstice, acquiert les mêmes valeurs ; mais le soleil n'atteint jamais au-dessus de l'horizon qu'une faible hauteur. Enfin, aux pôles mêmes, l'année se compose d'une nuit de six mois, et d'un jour de six mois pendant lequel le soleil monte lentement au-dessus de l'horizon et n'atteint qu'une hauteur maximum de 25° 28' à l'époque du solstice. — De là résulte que la température de ces contrées, extrêmement basse pendant les plus longues nuits, ne peut atteindre qu'une moyenne très peu élevée pendant les plus longs jours. C'est la région des glaces perpétuelles, dont les limites varient un peu avec les saisons, mais qui s'étendent toujours jusqu'à une grande distance des pôles.

903. **Des causes qui modifient la répartition des climats.** — Si la Terre et l'atmosphère terrestre satisfaisaient aux hypothèses que nous avons faites sur leur constitution (902), toutes les lignes qui représentent des moyennes de température se confondraient avec des parallèles de la sphère. Or, l'inspection de ces lignes (*fig. 689*) montre qu'il n'en est pas ainsi. — Nous allons montrer que l'on peut trouver, dans les conditions physiques auxquelles sont soumises les différentes contrées, les causes les plus importantes de ces variations.

904. **Influence de la proximité ou de l'éloignement des côtes.** — **Climats maritimes et continentaux.** — Les eaux possèdent, pour la chaleur, un pouvoir absorbant et un pouvoir émissif moindres que la terre ferme : de là résulte que, toutes choses égales d'ailleurs, elles absorbent ou émettent des quantités de chaleur moindres. — Elles ont, en outre, une chaleur spécifique plus grande, de sorte que, pour une même quantité de chaleur absorbée ou émise, elles éprouvent aussi une moindre variation de température. — Enfin, une partie de la chaleur qu'elles absorbent est employée à former des vapeurs à leur surface. — Pour ces diverses raisons, on conçoit que l'échauffement ou le refroidissement doit être beaucoup plus lent pour les grandes étendues d'eau que pour la terre ferme.

A ces causes, il faut ajouter l'influence de la vapeur d'eau dans l'atmosphère, au voisinage des mers, et surtout celle des nuages qui sont toujours plus fréquents au voisinage des côtes : ils tempèrent l'ardeur du soleil pendant le jour, et diminuent la perte de chaleur qu'éprouve la terre par rayonnement pendant la nuit.

L'été et l'hiver est près de 16°, et la moyenne annuelle est de 45°.9. — A Stockholm, la différence entre l'été et l'hiver est de 20°, et la moyenne annuelle est de 5°.6.

De là, des différences très grandes entre les températures des continents et celles des mers, sous la même latitude. La figure 689 montre en effet que, au voisinage des mers, les lignes isothermes qui traversent des continents s'abaissent vers l'équateur, et qu'au contraire les lignes isochimènes se relèvent vers le pôle ; il en résulte que, sous une même latitude, les climats sont beaucoup *moins variables* sur les côtes que dans l'intérieur des continents.

Ce sont ces remarques qui ont donné lieu aux dénominations de *climats maritimes* et *climats continentaux*, les premiers étant en général des climats tempérés, tandis que les seconds peuvent être, sous les mêmes latitudes, des climats excessifs. — Ainsi, par exemple, la différence entre la température moyenne de l'été et celle de l'hiver est de 11 degrés à Cherbourg, de 15 degrés à Paris, de 20 degrés à Vienne, bien que les latitudes de ces points soient sensiblement les mêmes.

Enfin, les climats les plus constants sont les *climats insulaires*. — Ainsi, dans les îles de la zone tropicale, la différence entre la moyenne de l'été et celle de l'hiver ne dépasse guère 2 ou 3 degrés.

905. **Rapports qui existent entre les lignes de température et les limites de certains végétaux.** — On conçoit que, parmi les plantes cultivées, celles qu'on sème pour les récolter au bout de quelques mois peuvent arriver à maturité partout où la température moyenne de l'été est assez élevée, quelle que soit d'ailleurs la température de l'hiver. Aussi observe-t-on, par exemple, que la culture des orges, en Europe, est limitée au nord par une ligne voisine de la ligne isotherme de 10 degrés (*fig. 689*), et celle des froments par une ligne voisine de la ligne isotherme de 15 degrés. Les points traversés par ces lignes ont cependant des climats différents, et, pendant l'hiver, des températures très inégales. De même, le maïs n'exige guère que deux ou trois mois de température un peu élevée pour arriver à maturation : sa limite de culture se rapproche beaucoup de la ligne isotherme de 20 degrés. — Il en est à peu près de même des végétaux vivaces qu'on cultive pour leurs fruits : la culture en est répandue seulement dans les points où ces fruits peuvent arriver à maturité, c'est-à-dire où la température de l'été est assez élevée. Aussi, les limites de culture des vignes, des oliviers, des orangers, affectent-elles encore des formes voisines de celles des lignes isothermes.

Au contraire, les limites de végétation des arbres forestiers dépendent des températures de l'hiver, c'est-à-dire qu'elles suivent les lignes isochimènes. — Ainsi, la limite de végétation du chêne vert se rapproche de la ligne isochimène de + 5 degrés ; elle correspond à une latitude assez basse dans les continents orientaux, mais elle s'élève brusquement vers le midi de la France, et suit la côte de l'Océan jusque dans la Bretagne. — Des remarques analogues sont applicables aux autres arbres forestiers, dont les limites de végétation s'élèvent d'autant plus en latitude qu'ils peuvent supporter des hivers plus rigoureux.

En résumé, l'ensemble de la végétation d'une contrée dépend, à des titres différents, des températures de l'été et des températures de l'hiver, ou des

lignes *isothermes* et des lignes *isochimènes* entre lesquelles cette contrée est comprise.

II. — DES VENTS.

906. **Causes principales des vents.** — La production des vents se relie intimement aux variations de température. Elle peut dépendre d'un grand nombre de causes diverses : nous indiquerons seulement les principales.

Lorsqu'une région a été fortement échauffée, les couches d'air voisines du sol s'élèvent, en vertu de leur diminution de densité; ces couches sont remplacées par l'air froid qui afflue des régions voisines. De là, un vent qui souffle, à la surface du sol, des régions plus froides vers la région considérée. Quant à l'air chaud qui s'est élevé, il se déverse ensuite par les régions supérieures vers les parties froides, et produit ainsi, dans les hautes régions de l'atmosphère, un vent en sens contraire (\*).

Le même effet peut se produire encore par suite d'une différence dans l'état hygrométrique de deux masses d'air voisines, un mélange d'air et de vapeur d'eau étant moins dense que de l'air sec, à la même température et à la même pression.

Ces différences de densité, dues à l'action du soleil, sont les causes les plus générales des vents. Il en résulte un échange continu de courants atmosphériques, surtout entre les mers et les continents, de sorte qu'on peut dire que l'atmosphère ne reste jamais en équilibre. Les calmes momentanés qu'on observe, en certains points et à certains instants, correspondent à des moments d'arrêt qui précèdent ordinairement les changements de direction du vent.

Enfin, des coups de vent violents peuvent résulter du vide produit, en un point de l'atmosphère, par la condensation subite d'une grande quantité de vapeur d'eau, comme cela a lieu dans les orages : l'air des régions voisines se précipite dans cet espace où la pression est moindre. — Il peut même arriver que le phénomène se propage, de proche en proche, au rebours de la direction du vent. C'est ce que Franklin avait constaté dans certains cas : il avait donné à ces vents le nom de *vents d'aspiration*. Ce sont les plus rares, la transmission de pression se faisant généralement plus vite que le mouvement de transport de l'air.

(\*) On peut mettre en évidence ce double mouvement, au moyen d'une expérience imaginée par Franklin. Si l'on ouvre la porte d'une chambre chauffée, donnant sur un espace froid, et si l'on place une bougie allumée au niveau du sol, on constate immédiatement, par le mouvement de la flamme, l'existence d'un courant d'air, venant du dehors vers la chambre. Si l'on place, au contraire, la bougie vers le haut de l'ouverture de la porte, on constate un mouvement inverse de l'air chaud, de l'intérieur de la chambre vers le dehors.

907. **Vents périodiques. — Brises. — Moussons.** — Parmi les vents périodiques, on peut citer les *brises*, qu'on observe sur les côtes, et qui affectent deux directions différentes dans le cours d'une même journée. — La *brise de mer* souffle le matin, quelque temps après le lever du soleil; c'est sur cette brise que les marins comptent pour entrer dans les ports. On s'explique la production de ce vent en remarquant que la terre s'échauffe, sous l'influence des rayons solaires, plus vite que la surface de la mer (904) : donc, tant que la température continue à croître, il s'établit au-dessus de la terre une colonne d'air ascendante, qui appelle l'air de la mer. Dans notre zone tempérée, c'est surtout pendant l'été que la brise de mer est sensible : elle commence à diminuer vers trois ou quatre heures du soir, et cesse au coucher du soleil. Alors, survient la *brise de terre*, ou brise du soir, qui dure jusqu'au lever du soleil, et que les marins peuvent utiliser pour sortir du port : la terre se refroidissant plus vite que la mer, c'est l'air de la côte qui descend, pendant que l'air de la mer s'élève pour lui faire place.

Les *moussons* sont des vents périodiques qui s'observent surtout dans la mer des Indes. Ils règnent pendant six mois dans un sens, et pendant les six autres mois en sens contraire. La *mousson de printemps* commence au mois d'avril, c'est-à-dire à l'époque où la température moyenne du continent commence à devenir plus élevée que celle de la mer; aussi est-ce un vent de mer, qui se continue jusque vers le mois d'octobre. A cette époque, survient la *mousson d'automne*, qui souffle du continent tant que la température moyenne du sol décroît plus vite que celle des mers. — Dans la mer des Indes, la mousson de printemps vient du sud-ouest, la mousson d'automne vient du nord-est : on peut facilement s'en rendre compte par la configuration des mers et des continents voisins (\*).

908. **Vents constants. — Alizés.** — Les seuls vents constants qui aient été observés sont les *vents alizés*, qui soufflent pendant toute l'année dans le voisinage de l'équateur, et dont l'influence se fait sentir à une très grande distance. — Voici la théorie qui en a été donnée par Halley.

(\*) C'est encore à des causes du même ordre qu'on doit rapporter le *mistral*, qui souffle dans le midi de la France et qui est un vent de nord-ouest. — On se rend compte assez facilement de la production du *mistral* de la Provence : les plaines basses et sablonneuses de la Crau, de la Camargue et des Bouches-du-Rhône, échauffées par le soleil ardent de l'été, déterminent une ascension des couches d'air qui les touchent, et un appel continu de l'air des régions voisines. Cet air ne peut venir de l'est, où il est arrêté par la chaîne des Alpes : il arrive donc du nord et de l'ouest, et en particulier du plateau central de la France. — On peut remarquer enfin que ces masses d'air, qui ont passé sur les hauteurs du Cantal et de l'Auvergne, où elles se sont refroidies et ont abandonné une partie de leur humidité, arrivent alors dans des régions plus chaudes, et se trouvent ainsi très éloignées de leur point de saturation. On conçoit donc que le *mistral* soit l'un des vents les plus desséchants qu'on observe en Europe.

lignes *isothermes* et des lignes *isochimènes* entre lesquelles cette contrée est comprise.

II. — DES VENTS.

906. **Causes principales des vents.** — La production des vents se relie intimement aux variations de température. Elle peut dépendre d'un grand nombre de causes diverses : nous indiquerons seulement les principales.

Lorsqu'une région a été fortement échauffée, les couches d'air voisines du sol s'élèvent, en vertu de leur diminution de densité; ces couches sont remplacées par l'air froid qui afflue des régions voisines. De là, un vent qui souffle, à la surface du sol, des régions plus froides vers la région considérée. Quant à l'air chaud qui s'est élevé, il se déverse ensuite par les régions supérieures vers les parties froides, et produit ainsi, dans les hautes régions de l'atmosphère, un vent en sens contraire (\*).

Le même effet peut se produire encore par suite d'une différence dans l'état hygrométrique de deux masses d'air voisines, un mélange d'air et de vapeur d'eau étant moins dense que de l'air sec, à la même température et à la même pression.

Ces différences de densité, dues à l'action du soleil, sont les causes les plus générales des vents. Il en résulte un échange continu de courants atmosphériques, surtout entre les mers et les continents, de sorte qu'on peut dire que l'atmosphère ne reste jamais en équilibre. Les calmes momentanés qu'on observe, en certains points et à certains instants, correspondent à des moments d'arrêt qui précèdent ordinairement les changements de direction du vent.

Enfin, des coups de vent violents peuvent résulter du vide produit, en un point de l'atmosphère, par la condensation subite d'une grande quantité de vapeur d'eau, comme cela a lieu dans les orages : l'air des régions voisines se précipite dans cet espace où la pression est moindre. — Il peut même arriver que le phénomène se propage, de proche en proche, au rebours de la direction du vent. C'est ce que Franklin avait constaté dans certains cas : il avait donné à ces vents le nom de *vents d'aspiration*. Ce sont les plus rares, la transmission de pression se faisant généralement plus vite que le mouvement de transport de l'air.

(\*) On peut mettre en évidence ce double mouvement, au moyen d'une expérience imaginée par Franklin. Si l'on ouvre la porte d'une chambre chauffée, donnant sur un espace froid, et si l'on place une bougie allumée au niveau du sol, on constate immédiatement, par le mouvement de la flamme, l'existence d'un courant d'air, venant du dehors vers la chambre. Si l'on place, au contraire, la bougie vers le haut de l'ouverture de la porte, on constate un mouvement inverse de l'air chaud, de l'intérieur de la chambre vers le dehors.

907. **Vents périodiques.** — **Brisés.** — **Moussons.** — Parmi les vents périodiques, on peut citer les *brises*, qu'on observe sur les côtes, et qui affectent deux directions différentes dans le cours d'une même journée. — La *brise de mer* souffle le matin, quelque temps après le lever du soleil; c'est sur cette brise que les marins comptent pour entrer dans les ports. On s'explique la production de ce vent en remarquant que la terre s'échauffe, sous l'influence des rayons solaires, plus vite que la surface de la mer (904) : donc, tant que la température continue à croître, il s'établit au-dessus de la terre une colonne d'air ascendante, qui appelle l'air de la mer. Dans notre zone tempérée, c'est surtout pendant l'été que la brise de mer est sensible : elle commence à diminuer vers trois ou quatre heures du soir, et cesse au coucher du soleil. Alors, survient la *brise de terre*, ou brise du soir, qui dure jusqu'au lever du soleil, et que les marins peuvent utiliser pour sortir du port : la terre se refroidissant plus vite que la mer, c'est l'air de la côte qui descend, pendant que l'air de la mer s'élève pour lui faire place.

Les *moussons* sont des vents périodiques qui s'observent surtout dans la mer des Indes. Ils règnent pendant six mois dans un sens, et pendant les six autres mois en sens contraire. La *mousson de printemps* commence au mois d'avril, c'est-à-dire à l'époque où la température moyenne du continent commence à devenir plus élevée que celle de la mer; aussi est-ce un vent de mer, qui se continue jusque vers le mois d'octobre. A cette époque, survient la *mousson d'automne*, qui souffle du continent tant que la température moyenne du sol décroît plus vite que celle des mers. — Dans la mer des Indes, la mousson de printemps vient du sud-ouest, la mousson d'automne vient du nord-est : on peut facilement s'en rendre compte par la configuration des mers et des continents voisins (\*).

908. **Vents constants.** — **Alizés.** — Les seuls vents constants qui aient été observés sont les *vents alizés*, qui soufflent pendant toute l'année dans le voisinage de l'équateur, et dont l'influence se fait sentir à une très grande distance. — Voici la théorie qui en a été donnée par Halley.

(\*) C'est encore à des causes du même ordre qu'on doit rapporter le *mistral*, qui souffle dans le midi de la France et qui est un vent de nord-ouest. — On se rend compte assez facilement de la production du *mistral* de la Provence : les plaines basses et sablonneuses de la Crau, de la Camargue et des Bouches-du-Rhône, échauffées par le soleil ardent de l'été, déterminent une ascension des couches d'air qui les touchent, et un appel continu de l'air des régions voisines. Cet air ne peut venir de l'est, où il est arrêté par la chaîne des Alpes : il arrive donc du nord et de l'ouest, et en particulier du plateau central de la France. — On peut remarquer enfin que ces masses d'air, qui ont passé sur les hauteurs du Cantal et de l'Auvergne, où elles se sont refroidies et ont abandonné une partie de leur humidité, arrivent alors dans des régions plus chaudes, et se trouvent ainsi très éloignées de leur point de saturation. On conçoit donc que le *mistral* soit l'un des vents les plus desséchants qu'on observe en Europe.

Dans les régions intertropicales, la température moyenne du jour est plus élevée que sous les autres latitudes (902) : elle est d'environ 28 degrés pendant toute l'année. De plus, les eaux occupant dans cette zone une étendue considérable, il se produit en ces points une évaporation extrêmement active. Ces deux causes diminuent la densité de l'air et déterminent une ascension des couches inférieures, qui sont remplacées par de l'air affluant des régions tempérées. Donc, si la Terre était immobile, il se produirait, à sa surface, des courants dirigés de chacun des pôles vers l'équateur. — Mais la Terre tourne autour de la ligne des pôles, et les vitesses de ses différents points sont d'autant plus grandes qu'ils sont plus rapprochés de l'équateur; d'autre part, l'air qui touche chaque point du globe est animé de la même vitesse de rotation que ce point lui-même. Donc, quand une masse d'air, ayant séjourné au contact des zones tempérées, a acquis la vitesse de rotation de ces régions, et que cet air vient ensuite à affluer vers les tropiques, il est animé d'une vitesse de rotation moindre que celle des points des tropiques : il reste, pour ainsi dire, en retard par rapport à ce mouvement de rotation, et il paraît souffler en sens inverse du mouvement de la Terre. Le vent de l'hémisphère boréal est donc ainsi transformé en un vent de *nord-est*; le vent de l'hémisphère austral, en un vent de *sud-est*. — Ces deux vents se combinent en arrivant sur l'équateur, où ils produisent un vent d'est.

On voit de plus que, si cette explication est exacte, il doit exister, outre les courants que nous venons de signaler à la surface de la Terre des *contre-alizés supérieurs*, allant de l'équateur vers les pôles. Or, ces courants arrivent sur les régions tempérées avec une vitesse de rotation plus grande que celle de ces régions; de là, dans les parties supérieures de l'atmosphère, un vent du *sud-ouest* pour l'hémisphère boréal; un vent de *nord-ouest*, pour l'hémisphère austral. — Ces contre-alizés, qui règnent au-dessus des alizés inférieurs, ont pu en effet être constatés, soit par la direction dans laquelle ils transportent les nuages élevés et les cendres de certains volcans, soit par l'observation directe du vent qui règne au sommet des montagnes élevées, sur le pic de Ténériffe par exemple.

909. **Influences des contre-alizés et du Gulf-stream sur la température de l'Europe.** — Les contre-alizés dont il vient d'être question, et qui s'observent dans la partie boréale de l'océan Atlantique, ont une influence considérable sur le *climat* de l'Europe occidentale. Ces courants équatoriaux, de direction sud-ouest, après avoir régné dans les régions supérieures, viennent, en s'abaissant, atteindre la surface du globe à des distances variables de leur point de départ : c'est à eux qu'on doit attribuer la prédominance du vent de sud-ouest dans l'Europe occidentale, notamment en Angleterre, dans les Pays-Bas, et en France à partir de la région méditerranéenne. — Ces vents

du sud-ouest n'atteignent notre continent qu'après avoir passé au-dessus d'une partie de l'océan Atlantique qui est traversée par le *Gulf-stream*, ce grand courant d'eau tiède qui est indiqué sur toutes les cartes, et qui, partant du golfe du Mexique, vient, avec une direction sud-ouest, atteindre l'Europe occidentale et se fait sentir le long des côtes de Norvège jusqu'au delà du cap Nord (\*). On comprend donc que ces vents empruntent à la surface de la mer sa température et son humidité, et ramènent, sur les régions qu'ils traversent, la pluie et une température modérée.

C'est à ce courant d'eau tiède (le *Gulf-stream*) et à ce courant d'air tempéré et humide (le *courant équatorial* du sud-ouest) que nos pays doivent le climat exceptionnellement doux dont ils jouissent; c'est dans cette circonstance météorologique qu'il faut chercher la cause principale de la richesse de ces régions privilégiées et de la supériorité des races qui les habitent.

910. **Vitesse des vents.** — Pour déterminer la vitesse des vents qui soufflent à la surface de la Terre, on emploie de petits moulinets, ou *anémomètres*, à ailettes très mobiles, dont on évalue le nombre de tours au moyen d'appareils compteurs disposés comme celui de la sirène (682). Parfois aussi, on mesure le temps que mettent des poussières légères à franchir des distances connues. — Pour déterminer approximativement la vitesse des vents élevés, on mesure la vitesse de translation de l'ombre formée par les nuages sur le sol (\*\*).

Voici quelques nombres extraits des tableaux construits par les météorologistes :

|   | VITESSE DES VENTS |                    |
|---|-------------------|--------------------|
|   | PAR SECONDE.      | PAR HEURE.         |
| Vent seulement sensible. . . . .                      | 1 <sup>m</sup>    | 3 <sup>m</sup> , 6 |
| Vent modéré. . . . .                                  | 2                 | 7 2                |
| Vent frais (qui tend les voiles). . . . .             | 6                 | 21 6               |
| Bon frais (bon pour la marche des navires). . . . .   | 9                 | 52 4               |
| Grand frais (fait serrier les hautes voiles). . . . . | 12                | 45 2               |
| Vent impétueux. . . . .                               | 20                | 72 0               |
| Grande tempête. . . . .                               | 27                | 97 2               |
| Ouragan. . . . .                                      | 56                | 129 0              |
| Ouragan renversant les édifices. . . . .              | 46                | 163 0              |

(\*) Le mécanisme de la formation de ce courant est le même que celui des vents alizés, et des contre-alizés. Le *Gulf-stream* représente, dans l'océan Atlantique, le courant supérieur qui ramène, dans l'atmosphère, l'air chaud de l'équateur vers les pôles, et précisément avec la même direction sud-ouest.

(\*\*) Les voyages aérostatiques ont permis d'avoir des indications exactes sur la vitesse des vents dans les hautes régions. Le résultat le plus général est que cette vitesse est toujours bien plus considérable que celle du vent qu'on observe, au même instant, à la surface de la Terre; la différence est due évidemment aux obstacles que rencontre le mouvement de l'air à la surface du sol. C'est pour la même cause que la vitesse du vent est plus grande, en général, à la surface de la mer que sur les continents.

[ 911. **Trombes. — Cyclones.** — Le mouvement de l'air, dans une direction donnée, se produit rarement avec une vitesse égale pour tous les points de la masse; il en résulte, comme dans les cours d'eau, des tourbillons animés d'une vitesse de rotation plus ou moins grande, et se transportant en même temps dans le sens du courant général. Ces tourbillons affectent la forme d'entonnoirs, dont la pointe est dirigée vers le sol.

Dans certains cas, le phénomène, qui prend toujours naissance dans les hautes régions de l'atmosphère, est tout à fait local: c'est le phénomène particulier auquel on a donné le nom de *trombe*. On voit alors descendre des nuages une protubérance de matière nimbeuse, qui s'allonge en une sorte de colonne, et vient atteindre la mer ou le sol. Le diamètre de cette colonne peut se réduire parfois à quelques mètres; d'autres fois il acquiert plusieurs centaines de mètres. — La vitesse de rotation des couches d'air peut atteindre ou dépasser les plus grandes vitesses de translation du vent ordinaire. C'est ce que démontrent les effets formidables qui signalent parfois le passage des trombes, brisant ou arrachant les plus gros arbres, renversant les édifices ou enlevant les toitures, etc. (\*).

Les *cyclones*, les *typhons*, les *tempêtes*, les *ouragans* (\*\*), sont également dus à la rotation rapide d'une masse d'air autour d'un axe vertical: mais alors le phénomène affecte des dimensions tout autres. Ce n'est qu'en réunissant des observations faites sur un certain nombre de points, souvent très éloignés, qu'on a pu arriver à constater le mouvement de rotation de ces masses d'air, qui ont parfois plus de cent lieues de diamètre.

912. **Lois des tempêtes.** — Les travaux des météorologistes anglais et américains ont conduit à la découverte de lois remarquables, sur la constitution et la marche des tempêtes à la surface des grands océans du globe:

1° Les tempêtes résultent d'un *mouvement circulaire* de l'air, autour d'un centre qui se déplace lui-même plus ou moins rapidement: ce sont donc des *cyclones*.

2° Dans l'hémisphère boréal, le mouvement de *translation* des cyclones a lieu suivant des lignes courbes dont la concavité est tournée vers l'est, et dont la direction générale est de S.-O. à N.-E., c'est-à-dire la direction des contre-alizés. Dans l'hémisphère austral, ces courbes de translation présentent une disposition symétrique par rapport à l'équateur.

(\*) Les *tornados* des régions tropicales, dont la puissance de destruction est terrible, ne sont que des trombes de très grand diamètre.

(\*\*) Ces dénominations assez peu précises ont été données, dans les divers pays, à des phénomènes à peu près identiques. — Le mot *typhon* s'applique plus spécialement aux cyclones de la mer des Indes. — Le nom véritablement scientifique qu'on oit donner à ces phénomènes est celui de *cyclone* (de κύκλος, cercle).

3° Le sens de la *rotation* de l'air autour du centre est toujours de l'E. à l'O. en passant par le N., ou *en sens contraire des aiguilles d'une montre*, pour notre hémisphère. Dans l'hémisphère austral, le sens est inverse, c'est-à-dire que la rotation s'effectue dans le sens des aiguilles d'une montre.

Au centre du cyclone, le baromètre est très bas, et l'air est relativement calme; à une certaine distance du centre, la vitesse de rotation de l'air peut devenir redoutable. — D'autre part, la rotation étant accompagnée d'un mouvement de translation de toute la masse, on conçoit que la vitesse absolue du vent ne doit pas être la même des deux côtés d'un observateur placé au centre et regardant dans la direction où le cyclone se transporte. A *droite*, elle est la somme de la vitesse de rotation et de la vitesse de translation; c'est ce côté que les marins appellent le *demi-cercle dangereux*. A *gauche*, elle n'est que la différence entre les deux vitesses; c'est ce qu'on nomme le *demi-cercle maniable*.

Lorsqu'un navire se sent atteint par un cyclone, ce dont il est averti par la baisse rapide du baromètre, il doit immédiatement manœuvrer pour s'éloigner du centre, qui se trouve toujours, pour notre hémisphère, à *sa droite*, lorsqu'il fait face au vent. La règle inverse doit être appliquée dans l'hémisphère austral.

915. **Service météorologique international.** — Un service de correspondance télégraphique, pour l'échange quotidien des observations météorologiques, est établi aujourd'hui sur toute l'Europe: il a déjà permis d'arriver à des résultats importants, soit au point de vue de la science pure, soit au point de vue des services à rendre à la marine et à l'agriculture. — Voici, d'une manière sommaire, l'organisation de ce *Service météorologique international*, pour ce qui concerne la France (\*).

Un bureau central météorologique, établi à Paris, reçoit, tous les matins, des stations météorologiques organisées en Europe, les observations faites à sept heures du matin en été et à huit heures en hiver, et comprenant: 1° la hauteur du baromètre ramenée à 0° (257) et *rapportée au niveau de la mer* (\*\*); 2° la température à l'heure indiquée; 3° la direction et la force du vent; 4° l'état du ciel et de la mer; 5° la quantité de pluie tombée la veille. Ces observations sont reportées, au fur et à mesure de leur réception, sur une carte de l'Europe, à l'aide de signes conventionnels.

La distribution des températures est représentée, d'une manière gra-

(\*) L'établissement de ce service en France remonte à l'année 1858; il est dû à l'initiative de Le Verrier, alors directeur de l'Observatoire de Paris.

(\*\*) On connaît la hauteur de chaque station au-dessus de la mer, et on a calculé une fois pour toutes (154) la quantité dont il faut augmenter la hauteur lue à ce niveau, pour avoir celle que l'on observerait si l'instrument était descendu verticalement jusqu'au niveau de la mer.



phique, par le tracé de *lignes isothermes*. — La répartition des pressions est exprimée par des *lignes isobares* (lignes d'égale pression), tracées de 5 en 5 millimètres de mercure.

A l'aide de ces renseignements, le bureau central établit la *situation générale* : cette situation est résumée en quelques phrases, que l'on place au bas de la carte des isobares, et qui sont reproduites dans la plupart des journaux quotidiens. — Le même bureau compose enfin des *avis spéciaux*, sur le temps probable de la journée; ces avis sont transmis par le télégraphe, les uns aux divers ports de la Manche, de l'Océan et de la Méditerranée; les autres, dans les diverses régions de la France, aux localités qui ont un abonnement à cet effet avec le télégraphe. Les mêmes localités sont munies d'un baromètre métallique (135) qui est exposé aux regards du public (\*). C'est au-dessous de ce baromètre qu'on affiche chaque jour la dépêche dont il vient d'être question. On trouve ainsi réunis tous les renseignements qui peuvent servir à asseoir une opinion sur le temps probable de la journée.

914. **Bourrasques ou dépressions.** — La construction quotidienne des cartes de lignes isobares a mis en évidence des lois importantes, que des observations isolées eussent été incapables de faire connaître. La principale est la *loi des tempêtes* que nous avons indiquée plus haut (912), et qu'on peut encore énoncer comme il suit :

« Le vent souffle généralement en tournant autour du point où le baromètre est le plus bas : pour nos latitudes, la rotation a toujours lieu en sens contraire du mouvement des aiguilles d'une montre. La force du vent est d'autant plus grande, que la dépression du baromètre est plus considérable dans le point central. »

Nous reproduisons ci-contre (fig. 690), à titre d'exemple, la carte des lignes isobares pour le 9 décembre 1874, carte qui montre, d'une manière frappante, les diverses particularités du phénomène.

Ces mouvements tournants, dont l'ensemble constitue ce qu'on a désigné d'abord sous le nom de *bourrasques* et ce qu'on désigne aujourd'hui sous le nom de *dépressions*, se forment toujours sur l'océan Atlantique et se dirigent vers la région de l'Est. Elles abordent l'Europe à des hauteurs diverses, depuis les côtes du Portugal jusqu'au nord de l'Écosse, mais le plus souvent par l'Irlande (à Valentia). La direction suivant laquelle se déplace le point central peut varier du N. E. au S. E.; cette marche est connue par la comparaison des cartes des lignes isobares pour deux jours consécutifs. On peut alors annoncer, à coup sûr,

(\*) Cet instrument ne donne pas la *vraie hauteur* du baromètre du lieu. Il est réglé de telle sorte qu'il indique la hauteur barométrique rapportée au *niveau de la mer*; de cette façon, sa hauteur concorde avec les indications de la dépêche et de la carte qui est affichée dans certaines stations. Il ne faut donc pas comparer un baromètre du lieu avec le baromètre officiel : on trouverait, selon l'altitude du lieu, des écarts plus ou moins considérables, pouvant s'élever à plusieurs centimètres.

l'arrivée d'une tempête à tel ou tel port de mer. C'est ainsi que la bourrasque figurée sur la carte ci-jointe a attaqué l'Irlande le 8 décembre et que, le lendemain, son centre se trouvait dans la mer du Nord, marchant exactement à l'est.

On peut dire que le régime météorologique ordinaire de presque

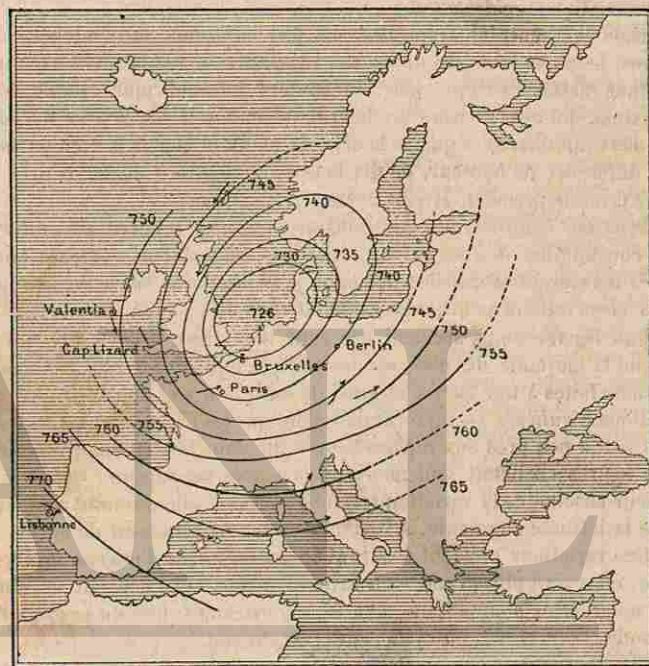


Fig. 690. — Diagramme de la tempête du 9 décembre 1874.

toute l'Europe se résume dans le passage d'une série à peu près continue de dépressions successives, venant de l'océan Atlantique, se déplaçant avec une vitesse plus ou moins grande, se déformant plus ou moins en chemin, mais se dirigeant généralement vers l'est (\*). — Cette loi générale est un des éléments qui ont rendu possible la *prévision du temps*, au moins à courte échéance.

(\*) Le bassin de la Méditerranée échappe souvent à l'action de ces dépressions; aussi le régime climatique de cette région diffère-t-il essentiellement de celui du reste de l'Europe.

## III. — OBSERVATIONS BAROMÉTRIQUES.

915. **Variations barométriques.** — On doit distinguer, dans les mouvements de la colonne barométrique, les variations régulières et les variations accidentelles.

Dans les contrées tropicales, où les variations accidentelles sont rares, les variations barométriques régulières se manifestent avec une grande netteté. Chaque jour, la hauteur barométrique atteint deux maxima, qui ont lieu vers dix heures du matin et dix heures du soir, et deux minima, vers quatre heures du matin et quatre heures du soir. La différence de hauteur, de dix heures du matin à quatre heures du soir (grande période), atteint  $2^{\text{mm}},5$ .

Dans nos contrées, les variations accidentelles rendent plus difficile la constatation des variations régulières. Mais si l'on compare entre elles les moyennes calculées chacune pour une même heure du jour, par des observations continuées pendant quelques semaines (surtout en été où les variations accidentelles sont moindres), c'est-à-dire si l'on prend la moyenne des observations faites à midi, puis celle des observations faites à une heure, et ainsi de suite, on voit apparaître les variations régulières. — On reconnaît alors que les maxima et les minima ont lieu à peu près aux mêmes heures que dans les régions tropicales; ces heures changent seulement un peu avec les saisons. Quant à la valeur absolue de la variation (grande période), elle diminue à mesure que la latitude augmente. A Paris, sa valeur moyenne est de  $0^{\text{mm}},8$ .

Les variations accidentelles sont fréquentes dans l'Europe occidentale; elles sont plus grandes en hiver qu'en été. Elles peuvent atteindre 50 millimètres d'amplitude dans les cas extrêmes, lors du passage des grandes bourrasques ou cyclones venant du sud.

916. **Relations des variations barométriques avec les variations de température et avec les météores aqueux.** — Les variations de la température, et les fluctuations qu'elles déterminent dans l'atmosphère, sont les causes immédiates des oscillations du baromètre. — Si, en un lieu déterminé, une dilatation de l'air, due à un accroissement de température, donne lieu à un mouvement d'ascension, il se produit, par cela même, une diminution de pression dans le lieu considéré. — Pour une raison semblable, un vent chaud et humide, au moment où il se fait sentir en un point du globe, fait baisser le baromètre. Au contraire, un vent sec et froid fait monter le baromètre. — On comprend donc qu'il existe, dans chaque contrée, une relation entre les oscillations du baromètre d'une part, les variations de la température et de la direction des vents régnants de l'autre.

Ainsi, dans nos contrées, les vents humides et chauds du sud-ouest,

qui déterminent un abaissement de la colonne barométrique, sont précisément ceux qui amènent le plus ordinairement la pluie. Au contraire, les vents secs et froids du nord-est, qui font monter le baromètre, amènent presque toujours le beau temps. — On en peut conclure que, en général, dans les contrées offrant une situation géographique analogue à la nôtre, un abaissement de la colonne barométrique est un indice probable de pluie, tandis qu'une ascension du sommet de la colonne est un présage de beau temps (\*).

917. **Moyenne barométrique d'un lieu. — Influence de la position géographique.** — Lorsque, pendant une journée, on observe d'heure en heure le baromètre, et qu'on prend ensuite la moyenne de toutes ces observations, on a ce qu'on appelle la hauteur moyenne du baromètre pendant la journée. — La moyenne des résultats ainsi obtenus pour tous les jours d'un mois donne la moyenne mensuelle; avec les moyennes des douze mois, on calcule la moyenne de l'année. Enfin, si l'on combine de la même manière les moyennes de plusieurs années consécutives, observées dans un même lieu, on obtient la hauteur moyenne du baromètre dans ce lieu.

La hauteur moyenne du baromètre dans un lieu dépend, d'une part de son altitude, c'est-à-dire de la hauteur de ce lieu au-dessus du niveau de la mer; d'autre part, de sa latitude géographique.

L'influence de l'altitude, établie déjà par les expériences de Pascal (119), ressort manifestement de la comparaison des trois moyennes barométriques suivantes, prises dans le voisinage de l'équateur :

|   |                   |
|---|-------------------|
| Au niveau de la mer. . . . .  | 758 <sup>mm</sup> |
| A Quito (2908 mètres au-dessus du niveau de la mer). . . . .                              | 554               |
| A la métairie d'Antisana, près Quito (4101 mètres au-dessus du niveau de la mer). . . . . | 470               |

L'influence de la latitude se manifeste par les observations faites en différents lieux au niveau de la mer. — Il résulte de ces observations : que, à l'équateur, la pression moyenne est de 758 millimètres. A mesure qu'on s'éloigne de l'équateur, la pression augmente à partir de la latitude de 10 degrés; elle atteint son maximum, savoir 762 à 764 millimètres, entre le 30° et le 40° degré. A partir de cette zone, elle diminue; vers le 50° degré (c'est-à-dire à peu près la latitude de Paris), elle n'est plus que de 760 millimètres. Enfin, dans les contrées les plus septentrionales, elle descend jusqu'à 756 millimètres environ.

(\*) Il faudrait bien se garder de considérer cette règle comme absolue, et surtout de l'étendre à des contrées dont les conditions météorologiques sont différentes. Ainsi, sur la côte orientale de l'Amérique du Sud, à l'embouchure de la Plata, ce sont les vents du sud-est qui amènent la pluie, en même temps qu'ils déterminent, en raison de leur basse température, une ascension de la colonne barométrique; dans cette contrée, la relation entre l'état du ciel et la hauteur du baromètre est donc inverse de ce qu'elle est chez nous.

## IV. — MÉTÉORES AQUEUX.

1918. **Variations dans l'état hygrométrique de l'air.** — Nous avons montré (528) que le *degré d'humidité* de l'air, à un moment donné, dépend à la fois de la quantité absolue de vapeur d'eau que cet air contient, et de la température de l'atmosphère au même instant.

Dès lors, il est facile de se rendre compte des résultats suivants, que nous nous contenterons d'énoncer. — C'est au lever du soleil que l'air contient la plus petite quantité absolue de vapeur d'eau; cependant, c'est au lever du soleil que l'air est le plus humide, c'est-à-dire le plus voisin de la saturation, parce que ce moment est celui du minimum de température (896). — Pendant l'été, c'est vers trois heures que l'air est le plus sec; cependant, c'est à ce moment qu'il contient le plus de vapeur d'eau, mais c'est aussi à ce moment qu'il possède la température la plus haute. — De même, dans le cours de l'année, c'est vers la fin de décembre que l'air est le plus humide, c'est vers la fin de juillet qu'il est le plus sec; et cependant la quantité absolue de vapeur d'eau est beaucoup moindre en hiver qu'en été.

L'observation montre que l'air est rarement saturé de vapeur, même lorsqu'il pleut. A la surface de la terre, l'hygromètre à cheveu ne descend presque jamais au-dessous de 40 degrés. La moyenne annuelle de ses indications, dans nos climats, est d'environ 72 degrés, ce qui correspond à un degré d'humidité de 0,50.

Dans son mémorable voyage aérostatique, Gay-Lussac a constaté une rapide diminution de l'état hygrométrique, à mesure que le ballon s'élevait dans l'atmosphère; à 7000 mètres de hauteur, l'hygromètre à cheveu ne marquait plus que 26 degrés: bien que la température fût très inférieure à zéro, l'air ne contenait que la huitième partie environ de la vapeur nécessaire pour le saturer.

1919. **Rosée.** — On donne le nom de *rosée* à ces gouttelettes d'eau qui couvrent, après les nuits calmes et sereines, les corps placés à découvert sur la surface du sol.

La théorie suivante, publiée à Londres en 1815 par Wells, rend compte de ce phénomène. — Lorsque le ciel est serein, et que le soleil a disparu sous l'horizon, la surface du sol, ou les corps qui y sont placés, continuent à rayonner vers les espaces célestes; la chaleur que ces corps perdent ainsi ne peut leur être restituée par les couches profondes, puisque le sol est mauvais conducteur: leur température s'abaisse donc rapidement. Cet abaissement de température est toujours plus considérable que celui de l'air, dont le pouvoir émissif est beaucoup moindre: en effet, Wells a constaté qu'un thermomètre placé sur le gazon, pendant une nuit sereine, marquait une température inférieure de 5 à

6 degrés à celle d'un thermomètre suspendu à un mètre au-dessus du sol. De là résulte que la couche d'air, qui est en contact immédiat avec la surface de la terre, est amenée à une température plus basse que les couches plus élevées, et, si la vapeur qu'elle contient n'est pas trop éloignée de son point de saturation, il arrive un moment où elle se condense: la rosée apparaît.

Cette théorie est confirmée par toutes les particularités que présente le phénomène. — Nous indiquerons les principales.

Un vent léger augmente le dépôt de rosée: c'est ce qu'on peut s'expliquer en remarquant que ce vent renouvelle lentement les couches d'air, qui apportent la vapeur qu'elles contiennent. — Un vent fort rend impossible tout dépôt de rosée: il réchauffe les corps par son contact, et ne laisse pas à l'air le temps de se refroidir. — Enfin, c'est quand il règne un vent léger et humide que la rosée est surtout abondante: l'observation montre que le vent le plus favorable à la production de la rosée, en France, est le vent du sud-ouest, qui a passé sur des mers étendues et relativement chaudes.

La présence de nuages, le voisinage d'abris masquant une partie du ciel, comme les arbres ou les édifices élevés, sont autant de causes qui diminuent la quantité de rosée ou en empêchent la formation. On voit que, dans ce cas, l'échange de chaleur, au lieu de se faire entre le sol et les espaces célestes qui sont à une température très basse, se fait entre le sol et des corps qui sont à une température voisine de la sienne; le refroidissement doit donc être beaucoup moins considérable. Wells a constaté qu'un thermomètre placé sur l'herbe, au-dessous d'un mouchoir supporté par quatre piquets, marquait une température supérieure de quelques degrés à celle d'un thermomètre semblable, placé à côté, mais à ciel découvert.

Enfin, les corps qui ont un pouvoir émissif considérable et une faible conductibilité, comme le bois, les feuilles, la terre, sont ceux où la rosée se dépose en plus grande abondance. Le dépôt de rosée est à peu près insensible sur les métaux polis, qui ont à la fois un pouvoir émissif très faible et une grande conductibilité.

1920. **Gelée blanche.** — On désigne sous le nom de *gelée blanche*, un dépôt de glace, en petits cristaux, qu'on observe quelquefois sur les herbes et autres corps, à la surface du sol, après les nuits claires. — La gelée blanche se forme dans les mêmes circonstances que la rosée, surtout au printemps et en automne. En effet, si la température de l'air n'est que de quelques degrés au-dessus de 0°, par un ciel serein, la température du sol, qui lui est inférieure de 5 à 6 degrés en moyenne (919), peut s'abaisser à quelques degrés au-dessous de 0°; alors, la condensation de l'humidité, au lieu de se faire sous forme de gouttelettes liquides, donne naissance à de petites aiguilles de glace, qui hérissent la surface des objets refroidis.

Les gelées blanches qui surviennent à la fin d'avril ou au commencement de mai sont particulièrement funestes aux arbres fruitiers. A la suite de ces gelées, les bourgeons qui sont déjà développés ne tardent pas à se faner et à roussir. De là le nom de *lune rousse*, qui a été donné à la lune d'avril, c'est-à-dire à celle qui commence en avril pour se terminer en mai (\*). — Les habitants des campagnes ont observé, en effet, que c'est lorsque la lune brille, c'est-à-dire lorsque le temps est pur, que ces gelées tardives sont surtout à craindre; mais il serait absurde de croire que c'est la lune elle-même qui produit ces effets sur les végétaux.

921. **Givre ou frimas.** — Le brouillard possède la propriété, signalée sans explication par de Saussure en 1785, de pouvoir exister dans une atmosphère bien au-dessous de  $0^{\circ}$ , sans se congeler. On peut observer souvent qu'il en est ainsi, en hiver, à la surface du sol, et les nuages donnent lieu à une observation analogue. — C'est là un phénomène de surfusion. Les gouttelettes très fines du brouillard, en suspension dans l'air, se trouvent, en effet, absolument dans les conditions que M. Dufour a réalisées dans les gouttes d'eau en équilibre au milieu d'un autre liquide (269). M. Dufour a montré que, dans ce cas, le point de congélation pouvait être retardé jusqu'à près de  $-20^{\circ}$ , pour les plus petites de ces gouttes. La même limite paraît devoir être adoptée pour les globules du brouillard: Fournet a vu en effet du brouillard non gelé à  $-15^{\circ}$  et  $-14^{\circ}$ , et M. E. Renou à  $-21^{\circ},7$ .

Lorsque des gouttelettes liquides en surfusion viennent à rencontrer un corps solide dont la température est inférieure à  $0^{\circ}$ , la surfusion cesse, et la cristallisation se produit. C'est ainsi que se forme le *givre* ou *frimas*, qui consiste en un dépôt de glace cristallisée, s'effectuant petit à petit (souvent en plusieurs jours), à la surface des objets placés sur le sol. — Lorsque le dépôt a lieu par un brouillard coïncidant avec une température de plusieurs degrés au-dessous de  $0^{\circ}$ , il peut atteindre des proportions assez considérables pour faire rompre les branches des arbres ou les fils des télégraphes.

922. **Brouillards. — Nuages.** — On donne le nom de *brouillard*, au résultat de la condensation de la vapeur d'eau au voisinage du sol: cette eau forme alors une multitude de gouttelettes fines, qui donnent à l'air une opacité plus ou moins grande. — Quand ces amas de gouttelettes occupent les régions plus élevées de l'atmosphère, ils constituent les *nuages*.

Cette assimilation entre les brouillards et les nuages est justifiée par les observations directes. L'observateur placé dans la vallée voit souvent des nuages courir sur les flancs des montagnes; ces nuages ne sont que des brouillards, pour un observateur placé à leur hauteur. De

(\*) On sait que l'âge de la lune se compte depuis une nouvelle lune jusqu'à la suivante.

même, dans les ascensions en ballon, l'aéronaute qui traverse les nuages se trouve plongé dans un brouillard plus ou moins épais.

La cause générale de la production des brouillards ou des nuages est le refroidissement d'une masse d'air déjà voisine de son point de saturation. — C'est ainsi, par exemple, qu'il se forme des brouillards à la fin des nuits de printemps ou d'automne, dans les vallées contenant des cours d'eau, lorsque l'air humide arrive au contact des flancs refroidis de la vallée. — C'est ainsi encore qu'il se forme des nuages, lorsque la vapeur d'eau qui se dégage d'un sol échauffé et humide arrive dans les couches élevées de l'atmosphère, où la température est plus basse. — Inversement, mais pour la même raison, lorsqu'un vent chaud et humide vient à souffler sur des régions qui ont été soumises antérieurement à un froid prolongé, il y a condensation de la vapeur et formation de brouillards. C'est ce qu'on observe dans les moments de dégel, par exemple.

Parmi les causes de formation des nuages, Babinet a signalé encore le phénomène suivant. Les vents d'ouest qui soufflent en France se sont chargés d'humidité en passant sur l'Océan: à mesure qu'ils pénètrent sur le continent, dont les reliefs deviennent de plus en plus saillants, ils arrivent dans des couches atmosphériques plus élevées et par suite plus froides: l'air humide qu'ils entraînent atteint ainsi bientôt son point de saturation, et il se produit une condensation progressive. — Enfin les nuages se forment plus rapidement encore quand ces vents rencontrent des montagnes, dont la cime disparaît alors dans les brouillards qui la couronnent.

925. **Principales espèces de nuages.** — Les formes des nuages,

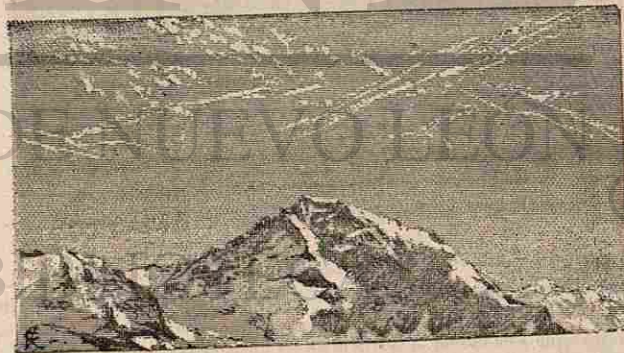


Fig. 691. — Cirrus.

et leurs distances à la terre, sont extrêmement variables: on peut cependant les rapporter à trois types principaux.

On désigne, sous le nom de *cirrus*, les nuages en forme de stries blanches (fig. 691) qui apparaissent au milieu du ciel bleu, et qui signalent généralement la fin d'une période de beau temps. Leur distance à la terre peut atteindre 9 à 10 kilomètres. — A ces hauteurs considérables, la température est toujours extrêmement basse, même pendant l'été; aussi, a-t-on pu constater que ces nuages se composent, non pas de gouttelettes d'eau liquide, mais de petites aiguilles de glace, flottant dans l'atmosphère (\*).



Fig. 692. — Cumulus.

On donne le nom de *cumulus*, à ces gros nuages qui présentent la forme de masses blanches, à contours arrondis (fig. 692), et qui cou-



Fig. 695. — Nimbus.

vrent souvent une partie du ciel sans amener le mauvais temps (\*\*). — Ils sont situés à des hauteurs qui ne dépassent guère 2 à 3 kilomètres,

(\*) C'est ce que démontrent, en particulier, les phénomènes produits par le passage des rayons du soleil ou de la lune à travers ces nuages. — C'est ce qu'on a également pu constater dans certaines ascensions aérostatiques.

(\*\*) Les cumulus apparaissent quelquefois, à l'horizon, sous la forme de bandes horizontales, qu'on désigne alors sous le nom de *stratus*.

et sont formés de gouttelettes d'eau liquide, d'une finesse extrême.

Enfin, on désigne sous le nom de *nimbus* les gros nuages sombres (fig. 695), qui interceptent la lumière du soleil, et qui prennent parfois une étendue considérable. Ils sont généralement situés beaucoup plus bas que les précédents, et peuvent arriver à raser la surface du sol.

924. **Pluie.** — Ni les cirrus, ni les cumulus isolés ne donnent naissance à la pluie; c'est de la rencontre de ces deux espèces de nuages, dans la verticale, que résultent ordinairement les *nimbus* ou nuages à pluie. — On comprend que, si les aiguilles de glace des cirrus, à une très basse température, viennent à rencontrer dans leur chute les gouttelettes liquides des cumulus qui s'élèvent, soulevés par les courants d'air chaud provenant du sol, il en résulte une condensation puissante, qui donne aux gouttes un poids suffisant pour les faire tomber. Leur volume s'accroît, en chemin, par la condensation de nouvelles vapeurs, en sorte que les gouttes de pluie sont d'autant plus grosses qu'elles viennent d'une plus grande hauteur.

Le mécanisme que nous venons d'exposer s'applique surtout aux pluies d'été, et notamment aux pluies d'orage. — En hiver, dans nos contrées, lorsque, à une période de froid résultant du vent de nord-est, succède un vent chaud et humide de sud-ouest, il se forme de vastes nimbus, qui déterminent des pluies abondantes. On ne peut mieux comparer le phénomène qu'à une vaste distillation, dont la chaudière serait à l'équateur, et le réfrigérant dans nos régions.

925. **Neige.** — **Grêle.** — **Grésil.** — Lorsque les nimbus d'hiver se forment dans des régions froides, les globules des nuages se congèlent, en donnant naissance à de petites aiguilles prismatiques de glace, qui se groupent généralement en étoiles régulières dont les angles sont toujours de 60°; elles affectent d'ailleurs des formes très diverses, dont la figure 694 représente quelques types. — Ce phénomène est assez



Fig. 694. — Flocons de neige.

fréquent dans les hautes régions de l'atmosphère, comme le témoignent les chutes de neige, en toute saison, sur les sommets des Alpes et des Pyrénées; mais, si la température est assez élevée à la surface du sol, cette neige fond en chemin et arrive en pluie.

Le mécanisme de la formation de la *grêle*, en été, a embarrassé jusqu'ici presque tous les météorologistes; on peut cependant se l'expliquer

en se reportant à ce que nous avons dit plus haut (924). Imaginons, d'une part, des cirrus très élevés, à 10 000 mètres, dont la température peut être, même en été, de  $-20^{\circ}$  à  $-50^{\circ}$ ; d'autre part, des cumulus, formés par un temps chaud et humide et s'élevant rapidement, à une grande hauteur, par l'effet du courant ascensionnel d'air chaud. Ces cumulus peuvent atteindre des régions dont la température est inférieure à  $0^{\circ}$ , et y rester en surfusion, jusqu'à ce que les aiguilles de

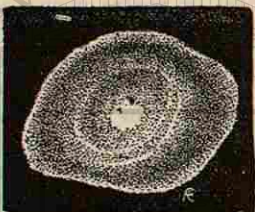


Fig. 695. — Coupe d'un grêlon.

glace des cirrus y déterminent, par leur chute, une congélation partielle; les noyaux ainsi formés, analogues à des grains de grésil, augmenteront de grosseur par l'adjonction de couches successives d'eau en surfusion, et la congélation des couches additionnelles pourra se produire presque instantanément. — L'observation montre en effet que, lorsqu'on coupe un grêlon en travers (fig. 695), on trouve généralement

au centre une partie blanche et opaque, ressemblant à un grain de grésil; puis, autour de cette espèce de noyau, des couches de glace transparente. On sait enfin que le phénomène de la grêle est intimement lié aux orages, car la chute de la grêle est toujours accompagnée d'éclairs et de tonnerre. — Volta a imaginé une théorie qui, sans rendre compte de tous les détails du phénomène, permet au moins d'en expliquer quelques-unes des particularités. Il suppose que les grêlons, se formant dans un nuage électrique, et étant électrisés eux-mêmes, doivent être soutenus dans l'atmosphère par l'attraction de nuages placés au-dessus, chargés d'une électricité contraire et donnant lieu aux décharges électriques. Cette circonstance permettrait aux grêlons d'acquérir les dimensions considérables qu'on observe quelquefois, et dont l'explication constitue la principale difficulté de la théorie de la grêle. — A la suite d'une forte décharge électrique, le nuage laisserait échapper subitement son fardeau de grêlons, qui tomberait alors vers le sol.

La chute de la grêle est toujours de très courte durée. Les grêlons arrivent par ordre de grosseur, les plus gros les premiers, comme si tous avaient été abandonnés au même instant.

Le grésil paraît se former de la même manière que la grêle; seulement, l'absence de l'électricité ne permet pas à ces noyaux opaques de se soutenir dans l'air et d'y acquérir des dimensions comparables à celles des grêlons.

En résumé, on comprend comment, en hiver, la simple congélation des nimbus, dans un air froid, donne de la neige; comment, au printemps, la rencontre des cirrus avec les cumulus qui s'élèvent du sol

donne du grésil; comment enfin, en été, le même phénomène, accompagné d'une forte tension électrique, donne de la grêle (\*).

926. **Verglas.** — Une dernière circonstance peut se présenter, dans la condensation de l'eau atmosphérique; c'est une pluie (eau liquide) tombant à travers une atmosphère au-dessous de  $0^{\circ}$ , et se continuant quelques heures, en même temps que la gelée persiste au niveau du sol. Dans ce cas, très rare d'ailleurs, il y a formation de verglas: la surface du sol, et de tous les objets exposés à la pluie, se couvre d'une couche uniforme de glace transparente et lisse, dont l'épaisseur va en augmentant avec la durée du phénomène.

Cette circonstance anormale se présente à la suite d'une longue période de froid, lorsqu'au vent du nord-est succède le retour du courant équatorial du sud-ouest. Ce courant atteint nos contrées par les hautes régions d'abord, en produisant des nuages dont la marche est contraire à celle du vent qui règne à la surface du sol, et qui est indiqué par les girouettes: il en résulte un trouble momentané dans la distribution de la température suivant la verticale; le dégel commence par en haut.

Or, nous avons dit plus haut (921) que le brouillard ne se congèle dans l'atmosphère qu'à  $-20^{\circ}$  environ; il suffit donc que les hautes régions de l'atmosphère, réchauffées par le vent du sud-ouest, arrivent à n'être plus qu'à une dizaine de degrés au-dessous de zéro, pour que la pluie puisse y prendre naissance; cette pluie en surfusion, tombant sur un sol à 5 ou 4 degrés au-dessous de zéro, s'y congèle, pour la plus grande partie. Une pluie peu abondante peut même se transformer entièrement en verglas. — Le phénomène ne dure généralement que quelques heures; le courant du sud-ouest, en s'abaissant, atteint bientôt le sol et fait remonter le thermomètre au-dessus de zéro: alors le vrai dégel commence (\*\*). — Cette explication du verglas a été donnée par M. Nouel, en 1862.

#### V. — ÉLECTRICITÉ ATMOSPHÉRIQUE.

927. **Électroscope de Saussure.** — **État électrique de l'atmosphère.** — L'atmosphère est toujours plus ou moins chargée d'électricité. Pour déterminer la nature et le mode de distribution de cette électricité, on peut faire usage de l'électroscope imaginé par de Saussure (fig. 696). Il diffère peu de l'électroscope à feuilles d'or qui a été décrit plus haut (fig. 295); les feuilles d'or sont remplacées par de

(\*) Les principaux traits de cette théorie de la pluie et de la grêle sont empruntés à un mémoire publié par M. E. Renou en 1866.

(\*\*) On doit cependant noter le célèbre verglas des 22, 23 et 24 janvier 1879, qui a duré trois jours sans dégel et a causé des dégâts immenses dans les forêts d'une zone s'étendant d'Épernay à Angers.

en se reportant à ce que nous avons dit plus haut (924). Imaginons, d'une part, des cirrus très élevés, à 10 000 mètres, dont la température peut être, même en été, de  $-20^{\circ}$  à  $-50^{\circ}$ ; d'autre part, des cumulus, formés par un temps chaud et humide et s'élevant rapidement, à une grande hauteur, par l'effet du courant ascensionnel d'air chaud. Ces cumulus peuvent atteindre des régions dont la température est inférieure à  $0^{\circ}$ , et y rester en surfusion, jusqu'à ce que les aiguilles de

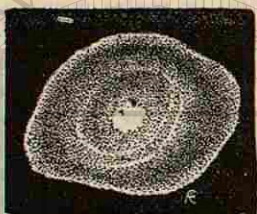


Fig. 695. — Coupe d'un grêlon.

glace des cirrus y déterminent, par leur chute, une congélation partielle; les noyaux ainsi formés, analogues à des grains de grésil, augmenteront de grosseur par l'adjonction de couches successives d'eau en surfusion, et la congélation des couches additionnelles pourra se produire presque instantanément. — L'observation montre en effet que, lorsqu'on coupe un grêlon en travers (fig. 695), on trouve généralement au centre une partie blanche et opaque, ressemblant à un grain de grésil; puis, autour de cette espèce de noyau, des couches de glace transparente.

On sait enfin que le phénomène de la grêle est intimement lié aux orages, car la chute de la grêle est toujours accompagnée d'éclairs et de tonnerre. — Volta a imaginé une théorie qui, sans rendre compte de tous les détails du phénomène, permet au moins d'en expliquer quelques-unes des particularités. Il suppose que les grêlons, se formant dans un nuage électrique, et étant électrisés eux-mêmes, doivent être soutenus dans l'atmosphère par l'attraction de nuages placés au-dessus, chargés d'une électricité contraire et donnant lieu aux décharges électriques. Cette circonstance permettrait aux grêlons d'acquérir les dimensions considérables qu'on observe quelquefois, et dont l'explication constitue la principale difficulté de la théorie de la grêle. — A la suite d'une forte décharge électrique, le nuage laisserait échapper subitement son fardeau de grêlons, qui tomberait alors vers le sol.

La chute de la grêle est toujours de très courte durée. Les grêlons arrivent par ordre de grosseur, les plus gros les premiers, comme si tous avaient été abandonnés au même instant.

Le grésil paraît se former de la même manière que la grêle; seulement, l'absence de l'électricité ne permet pas à ces noyaux opaques de se soutenir dans l'air et d'y acquérir des dimensions comparables à celles des grêlons.

En résumé, on comprend comment, en hiver, la simple congélation des nimbus, dans un air froid, donne de la neige; comment, au printemps, la rencontre des cirrus avec les cumulus qui s'élèvent du sol

donne du grésil; comment enfin, en été, le même phénomène, accompagné d'une forte tension électrique, donne de la grêle (\*).

926. **Verglas.** — Une dernière circonstance peut se présenter, dans la condensation de l'eau atmosphérique; c'est une pluie (eau liquide) tombant à travers une atmosphère au-dessous de  $0^{\circ}$ , et se continuant quelques heures, en même temps que la gelée persiste au niveau du sol. Dans ce cas, très rare d'ailleurs, il y a formation de verglas: la surface du sol, et de tous les objets exposés à la pluie, se couvre d'une couche uniforme de glace transparente et lisse, dont l'épaisseur va en augmentant avec la durée du phénomène.

Cette circonstance anormale se présente à la suite d'une longue période de froid, lorsqu'au vent du nord-est succède le retour du courant équatorial du sud-ouest. Ce courant atteint nos contrées par les hautes régions d'abord, en produisant des nuages dont la marche est contraire à celle du vent qui règne à la surface du sol, et qui est indiqué par les girouettes: il en résulte un trouble momentané dans la distribution de la température suivant la verticale; le dégel commence par en haut.

Or, nous avons dit plus haut (921) que le brouillard ne se congèle dans l'atmosphère qu'à  $-20^{\circ}$  environ; il suffit donc que les hautes régions de l'atmosphère, réchauffées par le vent du sud-ouest, arrivent à n'être plus qu'à une dizaine de degrés au-dessous de zéro, pour que la pluie puisse y prendre naissance; cette pluie en surfusion, tombant sur un sol à 5 ou 4 degrés au-dessous de zéro, s'y congèle, pour la plus grande partie. Une pluie peu abondante peut même se transformer entièrement en verglas. — Le phénomène ne dure généralement que quelques heures; le courant du sud-ouest, en s'abaissant, atteint bientôt le sol et fait remonter le thermomètre au-dessus de zéro: alors le vrai dégel commence (\*\*). — Cette explication du verglas a été donnée par M. Nouel, en 1862.

#### V. — ÉLECTRICITÉ ATMOSPHÉRIQUE.

927. **Électroscope de Saussure.** — **État électrique de l'atmosphère.** — L'atmosphère est toujours plus ou moins chargée d'électricité. Pour déterminer la nature et le mode de distribution de cette électricité, on peut faire usage de l'électroscope imaginé par de Saussure (fig. 696). Il diffère peu de l'électroscope à feuilles d'or qui a été décrit plus haut (fig. 295); les feuilles d'or sont remplacées par de

(\*) Les principaux traits de cette théorie de la pluie et de la grêle sont empruntés à un mémoire publié par M. E. Renou en 1866.

(\*\*) On doit cependant noter le célèbre verglas des 22, 23 et 24 janvier 1879, qui a duré trois jours sans dégel et a causé des dégâts immenses dans les forêts d'une zone s'étendant d'Épernay à Angers.

petites balles de sureau, suspendues par des fils de platine très fins. la tige, terminée par une longue pointe métallique T, porte en D un chapeau de laiton qui abrite l'instrument.

Si l'électroscope est placé au-dessous d'un corps chargé d'électricité positive, l'électricité positive de la tige est refoulée dans les balles de sureau, et l'électricité négative s'écoule par la pointe. L'instrument se charge donc, en général, de la même électricité que le corps influent; la divergence des petites balles peut se mesurer au moyen d'un arc gradué, tracé sur la paroi de la cloche; elle est d'autant plus grande que le corps influent est à un potentiel plus élevé.

Cet instrument, et quelques autres un peu différents, ont permis de constater que, lorsque le temps est serein, l'atmosphère est généralement à un potentiel positif, et ce potentiel est d'autant plus grand que le temps est plus pur et plus sec. — En outre, le potentiel électrique augmente progressivement à mesure qu'on s'élève dans l'atmosphère.

Un électroscope placé sous un arbre, ou dominé par un édifice, ne donne aucune indication, puisque ces corps sont en communication avec le sol, et, par suite, à un potentiel nul.

Quant à la cause de l'état électrique de l'atmosphère, il est difficile, dans l'état actuel de la science, de l'indiquer avec précision. On peut seulement remarquer que, en raison de l'augmentation progressive qu'éprouve le potentiel à mesure qu'on s'élève, cette cause doit être attribuée à des phénomènes qui se produisent dans des régions très élevées. — C'est d'ailleurs dans

Fig. 696. — Electroscope de Saussure.

ces hautes régions qu'on observe les aurores boréales, particulièrement fréquentes dans les contrées polaires. Ces splendides météores, qui apparaissent sous la forme d'immenses arcs lumineux, dardant des rayons par leur partie inférieure, présentent une couleur rouge ou violacée, qui rappelle celle des décharges électriques produites dans l'air très raréfié (486).

1928. **Expériences anciennes, vérifiant l'identité entre les phénomènes de la foudre et ceux de l'électricité.** — L'étincelle électrique qui jaillit d'une machine fortement chargée rappelle, par sa forme sinuose, les éclairs qui apparaissent pendant les orages. Les effets mécaniques ou calorifiques, que produisent les décharges de nos batteries, rappellent aussi ceux que produit la foudre à la surface de

la terre. Ce sont là des rapprochements qui furent faits dès la découverte des phénomènes électriques. — Cependant c'est à Franklin que revient la gloire d'avoir démontré qu'il y a réellement identité entre la foudre et les décharges électriques, et que la foudre est due à l'électricité dont sont chargés les nuages.

Les premières expériences, pour mettre en évidence l'électricité des nuages, furent faites en France par Dalibard, d'après des indications données par Franklin. — En 1752, Dalibard fit élever, dans un jardin de Marly-la-Ville, une tige de fer de 40 pieds de haut, fixée sur un support isolant et terminée en pointe à la partie supérieure. Il attendit que des nuages orageux vinssent à passer au-dessus de la tige. En approchant alors, de la partie inférieure de la tige, un fil de cuivre mis en communication avec le sol, il obtint une succession d'étincelles, plus fortes que celles des meilleures machines. — Pour comprendre ce qui s'était produit dans cette circonstance, il suffit de se reporter à ce que nous avons vu, sur la manière dont s'électrise le conducteur de la machine électrique, sous l'influence du plateau de verre (455). Admettons, en effet, que le nuage fût chargé, par exemple, d'électricité positive : il agissait, sur la tige métallique isolée, comme le plateau de la machine électrique agit sur le conducteur, c'est-à-dire que, sous l'influence du nuage, l'électricité négative de la tige s'écoulait par la pointe; l'électricité positive était repoussée à la partie inférieure de la tige, qui pouvait ainsi fournir des étincelles à l'approche d'un corps communiquant avec le sol.

Un mois plus tard, Franklin fit lui-même, dans la plaine de Philadelphie, une autre expérience qui conduisit aux mêmes résultats. — Un cerf-volant, muni d'une pointe métallique, fut lancé dans la direction d'un nuage orageux : la corde se terminait, à sa partie inférieure, par un cordon de soie isolant. La corde de chanvre étant peu conductrice, on n'obtint d'abord que des traces douteuses d'électricité; mais, une pluie fine étant venue rendre le chanvre conducteur, Franklin put tirer de la corde des étincelles de plusieurs pouces; il put allumer de l'alcool, charger des bouteilles de Leyde, etc.

Enfin, l'année suivante, de Romas, magistrat de la petite ville de Nérac, fit encore usage d'un cerf-volant, mais il eut soin d'ajouter un fil de cuivre à la corde de chanvre, dans toute sa longueur; l'extrémité inférieure de ce fil aboutissait à un cylindre métallique, supporté par des cordons de soie. — A l'approche de nuages orageux, on présenta à ce cylindre un autre cylindre métallique, que l'on tenait par un long tube de verre, et qui était mis en communication avec le sol. Des étincelles éclatèrent entre les deux cylindres; au plus fort de l'orage, elles prirent la forme de lames de feu, de 10 pieds de long, produisant un bruit qui se entendait à une distance considérable. Des débris de paille, qui se trouvaient sur le sol, s'élançaient vers la corde, avec un



crépitemment continu. — Cette expérience se termina par un coup de tonnerre formidable : la foudre était tombée à une petite distance (\*).

929. **Nuages positifs et nuages négatifs.** — On sait aujourd'hui que les nuages sont chargés tantôt d'électricité positive, tantôt d'électricité négative. — Il suffit, pour s'en rendre compte, d'avoir égard aux conditions diverses dans lesquelles se forment les nuages, au milieu d'une atmosphère dans laquelle le potentiel positif va progressivement en croissant à mesure qu'on s'élève (927).

En effet, un nuage, formé par la condensation de la vapeur d'eau dans l'air, peut être considéré comme une masse semi-conductrice, se substituant à la masse gazeuse non conductrice. Il doit, dès lors, s'électriser *par influence*, sous l'action de l'électricité positive accumulée dans les régions supérieures. — Or, si un nuage se forme dans une couche d'air peu éloignée du sol, et sensiblement à l'état neutre, cette action d'influence développera de l'électricité négative sur sa face supérieure, et une quantité égale d'électricité positive sur sa face inférieure : si la partie inférieure du nuage vient à se résoudre en pluie, ou si elle arrive momentanément en contact avec le flanc d'une montagne, il y aura déperdition d'électricité positive, en sorte que, une fois cette cause de déperdition supprimée, le nuage restera chargé d'une quantité prédominante d'électricité *négative*.

Au contraire, si un nuage se forme dans une couche d'air plus élevée, contenant déjà de l'électricité positive, quelles que soient les actions d'influence qu'il éprouve de la part des régions supérieures de l'atmosphère, l'électricité positive accumulée à sa face inférieure sera toujours en quantité plus grande que l'électricité négative à sa face supérieure. Si le nuage vient ensuite à s'abaisser avant qu'il y ait eu déperdition, la distribution de l'électricité à sa surface pourra se modifier, mais il y aura toujours prédominance de l'électricité *positive*.

Cette formation de nuages, tantôt *positifs*, tantôt *négatifs*, suffit pour expliquer tous les phénomènes produits pendant les orages.

930. **Foudre.** — On comprend que, si deux nuages chargés d'électricités contraires se rapprochent suffisamment l'un de l'autre, il éclate entre eux une décharge, résultant de la combinaison de ces deux électricités. — De même, si un nuage fortement électrisé se rapproche de la terre, il attire à la surface du sol l'électricité contraire à la sienne, et peut déterminer une décharge qui éclate entre lui et la terre.

(\*) On comprend tout le danger que présentent ces expériences. Le 6 août 1755, Richmann, membre de l'Académie de Saint-Petersbourg, en renouvelant des essais du même genre, s'approcha par mégarde du conducteur électrisé : la décharge l'atteignit au front, et la mort fut instantanée. — De pareilles tentatives ne doivent donc être faites que par des physiciens consommés, auxquels la pratique des expériences indique toutes les précautions dont il est nécessaire de s'entourer ; la moindre imprudence peut être fatale à l'expérimentateur ou à ceux qui l'entourent.

La foudre n'est autre chose que la décharge puissante, qui se produit dans l'une ou l'autre de ces deux circonstances. — L'éclair est le phénomène lumineux qui accompagne la décharge. — Le tonnerre est le bruit de la décharge elle-même.

Nous allons étudier successivement les principales particularités que présentent ces phénomènes.

931. **Éclairs.** — La lueur de l'éclair, plus vive que celle des étincelles électriques artificielles, est *instantanée*. Quelle que soit la précision des méthodes employées, on n'a pu encore lui assigner aucune durée appréciable. — Quant à l'aspect du sillon lumineux, il rappelle ces étincelles en zigzags (fig. 357) que donnent les machines électriques fortement chargées, quand on éloigne autant que possible les surfaces entre lesquelles éclate la décharge.

La longueur de l'éclair peut parfois être très grande : les évaluations les moins exagérées portent à lui donner, dans certains cas, jusqu'à 12 ou 15 kilomètres. — Pour comprendre comment l'éclair peut acquérir une pareille longueur, il faut se reporter aux conditions dans lesquelles il se produit. — L'intervalle compris entre les nuages orageux est généralement occupé par un brouillard plus ou moins épais, formé de gouttelettes d'eau flottant dans l'air. C'est dans ce milieu que se produit la décharge : on conçoit donc qu'elle puisse franchir une distance considérable, en passant d'une gouttelette à une autre, comme les décharges de nos machines franchissent la série des losanges métalliques de nos tubes étincelants (fig. 354). — De même, lorsque la foudre éclate entre les nuages et le sol, elle ne franchit ordinairement une aussi grande distance que grâce à la communication momentanée qui lui est offerte par la chute de l'averse orageuse.

On distingue les éclairs, au point de vue de leur éclat, en deux classes. — Les *éclairs de première classe* forment un sillon éblouissant, en général blanc ou bleuâtre, et nettement arrêté sur les bords : ils éclairent d'une lueur vive la voûte du ciel et les objets placés à la surface de la terre. — Les *éclairs de seconde classe* consistent en des lueurs diffuses, qui n'éclairent généralement qu'une partie du ciel. Ces lueurs sont produites, dans la plupart des cas, par des éclairs dont nous n'apercevons pas directement la lumière, soit qu'elle nous soit masquée par les nuages eux-mêmes, soit qu'elle se produise dans une région du ciel située au-dessous de notre horizon.

Enfin, on a désigné sous le nom de *foudre globulaire*, ou de *tonnerre en boule*, un phénomène bizarre, qui semblerait n'avoir aucune analogie avec les phénomènes électriques connus. Certains observateurs affirment avoir vu, pendant les orages, des espèces de globes lumineux se promener lentement à la surface du sol, et disparaître subitement, tantôt avec explosion, tantôt sans bruit. — Il est difficile de ne point accueillir avec quelque défiance des récits de cette nature, surtout

quand ils sont faits par des personnes dont l'instruction scientifique n'est pas suffisante pour les mettre en garde contre les illusions possibles. L'expérience montre en effet que, en général, une lumière vive, apparaissant au milieu de l'obscurité, peut faire éprouver à notre œil un éblouissement, se traduisant par une sorte de tache lumineuse que nous croyons apercevoir ensuite sur les divers objets où se portent nos regards : cette impression ne disparaît qu'au bout de quelques secondes. Or, il peut se faire que l'apparition d'un éclair très vif produise, sur l'œil d'un observateur, une illusion de cette espèce ; et alors la disposition de cette illusion pourra évidemment coïncider, soit avec l'un des instants où le tonnerre éclatera de nouveau, soit avec un moment où l'on ne percevra aucun bruit. — Quoi qu'il en soit, il paraît prudent d'attendre, avant de se prononcer sur la réalité de la foudre globulaire, que le phénomène ait pu être observé dans des conditions qui permettent de l'analyser avec certitude.

952. **Tonnerre.** — Le bruit du tonnerre ne nous arrive jamais que *quelque temps après la lumière de l'éclair*. — Cet effet est dû à la différence entre la vitesse de propagation de la lumière et la vitesse de propagation du son. La lumière se propage avec une vitesse de plus de 300 000 kilomètres par seconde : la lumière de l'éclair parcourt donc les quelques kilomètres qui nous séparent des nuages, en un temps tout à fait inappréciable. Le son se propage avec une vitesse qui est seulement d'environ 340 mètres par seconde : il met donc environ 3 secondes pour parcourir 1 kilomètre : dès lors, le bruit de la décharge électrique peut mettre plusieurs secondes pour nous parvenir. — Pendant un orage, si nous entendons les coups de tonnerre succéder de plus en plus rapidement aux éclairs, nous pouvons en conclure que l'orage se rapproche de nous ; au contraire, si ces intervalles de temps vont en augmentant, c'est que l'orage s'éloigne.

Le roulement qui accompagne souvent les coups de tonnerre s'explique encore par des considérations du même genre. En effet, si *une même décharge* éclate à la fois entre plusieurs nuages placés à la suite les uns des autres, il se produit, dans l'atmosphère, autant de détonations, *à un même instant*. Mais nous percevons d'abord le bruit qui s'est produit dans le point le plus rapproché de nous ; nous percevons ensuite, successivement, les bruits qui se sont produits en des points de plus en plus éloignés. — A cette cause s'ajoutent aussi, parfois, les échos formés par les objets qui nous entourent.

953. **Effets produits par la foudre, à la surface de la terre.** — Lorsque la décharge éclate entre un nuage et la terre, on dit généralement que *la foudre tombe*. Elle frappe de préférence les points qui forment des saillies à la surface du sol, parce que c'est surtout en ces points que s'accumule l'électricité attirée par l'influence des nuages. Les sommets des montagnes, les clochers, les arbres, sont les points

qui sont le plus souvent atteints. Aussi, n'est-ce jamais dans leur voisinage qu'on doit chercher un abri pendant les orages.

Les effets produits par la foudre sont semblables à ceux que nous pouvons produire avec nos appareils : ils ne s'en distinguent que par leur intensité. — Comme *effets mécaniques*, on cite des coups de foudre enlevant les toitures des bâtiments, ou arrachant les pierres ; traversant des plaques de verre, ou déchirant en filaments le tronc des arbres. — Comme *effets calorifiques*, on voit la foudre mettre le feu à des meules de paille, ou à des amas de matières combustibles, et déterminer des incendies ; fondre ou volatiliser des corps conducteurs, comme les fils des sonnettes ou les dorures des appartements, etc. (\*).

Les commotions déterminées chez les animaux par les décharges de la foudre, peuvent occasionner les désordres les plus graves, et parfois amener instantanément la mort. — Les traces que laisse la décharge sont très variables : tantôt elle détermine des brûlures ou des blessures profondes ; tantôt elle ne produit aucune lésion extérieure, mais on observe une congestion au cerveau et un épanchement du sang hors des vaisseaux.

Enfin, il est des circonstances où la décharge d'un nuage peut devenir mortelle pour des animaux que la foudre n'a pas directement frappés. — Supposons qu'un nuage d'une assez grande étendue, et chargé, par exemple, d'électricité positive, décompose par influence l'électricité neutre des corps qui sont à la surface de la terre : il attire l'électricité négative à la partie supérieure de chacun de ces corps, et repousse l'électricité positive vers le sol. S'il arrive que le nuage se décharge tout à coup *sur un autre point du sol*, il s'opère, dans tous les corps influencés, une recomposition subite des électricités contraires : l'expérience a montré que la commotion produite sur les animaux, dans des circonstances de ce genre, peut être assez violente pour déterminer instantanément la mort. — C'est le phénomène qui a été désigné sous le nom de *choc en retour*.

954. **Paratonnerres.** — C'est encore à Franklin qu'est due l'invention des *paratonnerres*, qui servent à préserver nos édifices de la foudre.

Voici une expérience qui permet de comprendre le rôle d'un paratonnerre, pendant un orage. — Prenons à la main une tige métallique, terminée en pointe, et approchons-la d'une machine électrique en activité (fig. 697). Il ne jaillit *aucune étincelle* entre la machine et la tige : l'électricité négative, attirée par la machine, s'écoule immédiatement par la pointe, et se combine sans bruit avec l'électricité positive de la machine. Le corps de l'opérateur, armé de cette pointe, ne peut donc déterminer aucune décharge brusque, ni éprouver aucune commotion.

(\*) En traversant les couches de sable quartzueux qui forment le sol de certaines contrées, la foudre détermine la fusion du sable, et forme, avec les grains agglutinés, des espèces de tubes auxquels on donne le nom de *fulgurites*.

— C'est ce pouvoir des pointes qui a conduit Franklin à l'emploi des paratonnerres.

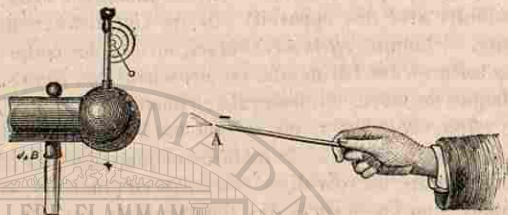


Fig. 697. — Expérience imitant l'effet produit par un paratonnerre.

Un paratonnerre, tel qu'on le construit le plus ordinairement aujourd'hui, se compose d'une longue tige de fer, terminée en pointe à sa partie supérieure. Pour éviter l'oxydation de la pointe, l'Académie des sciences, dans une *Instruction* publiée en 1825,



Fig. 698.  
Paratonnerre.

avait d'abord prescrit de terminer la tige de fer par une baguette de cuivre *d*, et d'y souder une pointe de platine *P* (fig. 698). Les modifications apportées à ces premières indications, en 1854, prescrivent simplement de terminer en pointe la tige de cuivre *mn* (fig. 699), et de la dorer à sa surface. — La partie inférieure du paratonnerre s'engage, par un prolongement *g* (fig. 698), dans la toiture du bâtiment; elle est mise en communication avec le sol par une tringle de fer *C*, réunie à la tige elle-même par un collier métallique *b*. Cette tringle de fer est le *conducteur* du paratonnerre, qui descend le long du toit et des murs de l'édifice, et vient se rendre dans le sol (fig. 700). Ce conducteur est mis en communication, le long de son trajet, avec toutes les pièces métalliques un peu volumineuses de l'édifice, afin que l'électricité, sollicitée dans ces pièces par l'influence des nuages, puisse se rendre dans la tige et s'écouler par la pointe. — Si l'édifice porte plusieurs paratonnerres, ils sont également mis en communication entre eux par des tiges métalliques.

Enfin, pour établir une communication aussi parfaite que possible entre l'extrémité inférieure

du conducteur et le sol, on fait ordinairement plonger cette extrémité dans un puits où elle se ramifie en plusieurs branches, terminées par des plaques de tôle plongeant dans l'eau, comme le montre la

Fig. 699. Pointe de cuivre. A vertical copper rod with a pointed tip, labeled with letters *n*, *m*, *d*, and *T*.

Fig. 699.  
Pointe  
de cuivre.

figure. L'électricité repoussée par les nuages se perd ainsi rapidement par la nappe d'eau souterraine qui alimente le puits. Cette communication du conducteur avec le sol est, suivant Pouillet, la partie la plus importante de l'établissement du paratonnerre, et c'est aussi celle qui a été longtemps la plus mal comprise : la braise de boulanger, dont on enveloppe quelquefois les ramifications des conducteurs, est tout à fait insuffisante; il est *indispensable* que la communication ait lieu avec une vaste nappe d'eau (\*). — Il ne faudrait pas se contenter, par exemple, de faire rendre l'extrémité du conducteur dans une citerne, à parois imperméables. Un paratonnerre installé dans de semblables conditions serait plutôt dangereux qu'utile.

Quand un édifice est muni de paratonnerres, dans de bonnes conditions et en nombre suffisant (\*\*), il est rare qu'il soit frappé de la foudre : l'écoulement de l'électricité attirée vers la pointe de chaque paratonnerre se manifeste par une aigrette lumineuse, visible dans l'obscurité. — Quelquefois cependant, par un fort orage, cet écoulement ne pouvant pas se faire d'une manière assez rapide, la foudre éclate; mais elle frappe alors le paratonnerre lui-même, qui est la partie la plus saillante de l'édifice. Le plus souvent, dans ce cas, la pointe du paratonnerre est fondue : certaines parties du conducteur sont aussi parfois détériorées. On en est quitte alors pour une réparation; mais cette réparation est indispensable pour que le paratonnerre conserve dans l'avenir son efficacité.

§55. **Paratonnerres Melsens.** — On doit à M. Melsens, de Bruxelles, la construction d'un système de paratonnerres assez différent de celui

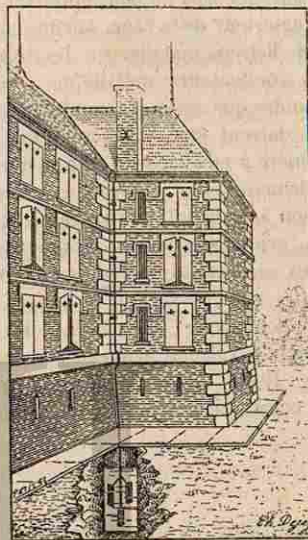


Fig. 700.  
Paratonnerres avec leurs conducteurs.

(\*) M. Nouel a conseillé, en 1874, d'établir aussi une communication entre la tige du paratonnerre et les gouttières qui constituent, avec leurs descentes, au moment des orages, une excellente communication avec le sol : la pluie qui s'échappe des tuyaux, et qui va rejoindre la nappe d'eau superficielle, transforme momentanément le sol en un conducteur à surface immense.

(\*\*) On admet généralement qu'un paratonnerre préserve de la foudre les objets compris dans un cercle dont le rayon est double de la hauteur de la tige.

de Franklin : il paraît présenter le double avantage d'être moins coûteux, et d'avoir une efficacité plus certaine.

Ce système de paratonnerres est fondé sur ce principe, établi par Faraday, que si un corps quelconque est placé à l'intérieur d'une sorte de cage, formée par un réseau de fils métalliques communiquant avec le sol, ce corps ne peut éprouver, de la part des corps électrisés, placés à l'extérieur de la cage, aucune action d'influence (\*).

M. Melsens installe, sur les toits et sur tout le contour de l'édifice, des conducteurs métalliques dont la section peut être beaucoup moindre que celle des conducteurs de paratonnerres ordinaires, mais qui doivent être beaucoup plus multipliés, et reliés entre eux de manière à envelopper l'édifice d'un réseau, qui n'en altère d'ailleurs nullement l'effet architectural. Ces conducteurs sont mis en communication avec le sol, par un grand nombre de points, au moyen de puits. Aux principaux points d'intersection des conducteurs, et particulièrement sur le faite de l'édifice, sont placées des gerbes formées par de petites tiges de cuivre, terminées en pointes, par lesquelles se produit l'écoulement de l'électricité. — Un système de ce genre a été établi sur l'hôtel de ville de Bruxelles, et un autre sur l'une des casernes de la ville : le prix de revient a été environ la moitié de ce qu'il eût été pour des paratonnerres ordinaires, à égalité de superficie.

VI. — VARIATIONS DU MAGNÉTISME TERRESTRE.

956. **Variations de la déclinaison et de l'inclinaison, en un même lieu.** — La *déclinaison*, en chaque point du globe, est soumise à des variations, dont les unes sont assujetties à une périodicité qui leur a fait donner le nom de *variations régulières*; les autres sont des *variations irrégulières*, ou *accidentelles*.

Pendant l'intervalle d'une même journée, on voit, dans nos climats, l'extrémité australe de l'aiguille marcher de quelques minutes vers l'ouest pendant la matinée, et jusqu'à l'heure du maximum de température; elle revient ensuite sur elle-même, à l'heure où la température s'abaisse, pour reprendre une marche semblable le jour suivant, et ainsi de suite. Ces écarts réguliers, auxquels on donne le nom de *variations diurnes*, sont cependant plus grands pendant la saison chaude que pendant l'hiver.

Si maintenant on évalue, en un lieu déterminé, la *déclinaison moyenne* de l'année, et si l'on compare entre elles les moyennes de

(\*) On peut, par exemple, placer un oiseau dans une cage ordinaire, à treillage de fils de fer, en communication avec le sol, et constater que les décharges d'une machine électrique, ou même celles d'une batterie, en éclatant sur la cage, ne font éprouver à l'oiseau aucune commotion.

plusieurs années successives, on constate une variation qui a reçu le nom de *variation séculaire*. Les observations faites à Paris, depuis l'année 1580, ont conduit aux résultats suivants. — En 1580, la *déclinaison* était orientale et égale à  $11^{\circ} 50'$ ; elle a été en diminuant jusqu'en 1663, où elle est devenue nulle, puis occidentale, et l'aiguille a continué à marcher dans le même sens jusqu'en 1814. En 1814, la *déclinaison* occidentale a atteint un maximum, égal à  $22^{\circ} 54'$ , et elle a ensuite commencé à décroître. — En 1885, la *déclinaison* moyenne, toujours occidentale, était de  $16^{\circ} 15'$ ; elle décroît d'environ  $7,4$  par an : si cette loi se continue, la *déclinaison* à Paris deviendra nulle vers le milieu du siècle prochain; puis elle redeviendra orientale, et ainsi de suite.

Pour l'*inclinaison*, les observations remontent à une époque moins reculée. En 1674, époque postérieure à celle du maximum de *déclinaison*, l'*inclinaison* à Paris était d'environ  $75^{\circ}$ ; elle a été en décroissant depuis cette époque; sa valeur en 1884 était de  $65^{\circ} 20'$ , c'est-à-dire que, dans un intervalle de plus de deux cents ans, elle n'a diminué que d'environ  $10^{\circ}$ . — Par conséquent, tout ce qu'on peut dire jusqu'ici, c'est que les variations de l'*inclinaison* ont été beaucoup plus petites que celles de la *déclinaison*. Mais il n'est pas impossible que ces deux éléments du magnétisme terrestre soient soumis à une période d'oscillations *de même durée*; c'est une question sur laquelle il ne sera possible de se prononcer qu'aux époques où ces deux quantités repasseront par des maxima.

Enfin, on donne le nom de *variations accidentelles*, ou *orages magnétiques*, à de véritables perturbations, survenant brusquement dans les mouvements de l'aiguille aimantée, et ne durant en général que quelques heures. — Arago a remarqué qu'elles coïncident généralement avec l'apparition d'aurores boréales, soit en des points voisins, soit en des points éloignés. — Des observations suivies, faites dans les observatoires des colonies anglaises, qui couvrent la surface du globe, ont montré que ces orages apparaissent simultanément, avec des intensités diverses, en un grand nombre de points : la cause qui les produit ne peut donc résider que dans des phénomènes s'accomplissant à une grande distance de la surface du globe.

957. **Variations de la déclinaison et de l'inclinaison magnétiques, à la surface du globe.** — Puisque la *déclinaison* et l'*inclinaison* n'éprouvent, en un même lieu, pendant le cours d'une année, que des variations de quelques minutes, on comprend que l'on puisse exprimer, par des tables numériques ou par des cartes, l'état magnétique du globe à une époque déterminée. — Voici quelques résultats généraux, se rapportant à l'époque actuelle.

*Déclinaison.* — La *déclinaison* varie beaucoup d'un point à l'autre du globe. Elle est occidentale en Europe; elle est orientale dans la

de Franklin : il paraît présenter le double avantage d'être moins coûteux, et d'avoir une efficacité plus certaine.

Ce système de paratonnerres est fondé sur ce principe, établi par Faraday, que si un corps quelconque est placé à l'intérieur d'une sorte de cage, formée par un réseau de fils métalliques communiquant avec le sol, ce corps ne peut éprouver, de la part des corps électrisés, placés à l'extérieur de la cage, aucune action d'influence (\*).

M. Melsens installe, sur les toits et sur tout le contour de l'édifice, des conducteurs métalliques dont la section peut être beaucoup moindre que celle des conducteurs de paratonnerres ordinaires, mais qui doivent être beaucoup plus multipliés, et reliés entre eux de manière à envelopper l'édifice d'un réseau, qui n'en altère d'ailleurs nullement l'effet architectural. Ces conducteurs sont mis en communication avec le sol, par un grand nombre de points, au moyen de puits. Aux principaux points d'intersection des conducteurs, et particulièrement sur le faite de l'édifice, sont placées des gerbes formées par de petites tiges de cuivre, terminées en pointes, par lesquelles se produit l'écoulement de l'électricité. — Un système de ce genre a été établi sur l'hôtel de ville de Bruxelles, et un autre sur l'une des casernes de la ville : le prix de revient a été environ la moitié de ce qu'il eût été pour des paratonnerres ordinaires, à égalité de superficie.

VI. — VARIATIONS DU MAGNÉTISME TERRESTRE.

956. **Variations de la déclinaison et de l'inclinaison, en un même lieu.** — La *déclinaison*, en chaque point du globe, est soumise à des variations, dont les unes sont assujetties à une périodicité qui leur a fait donner le nom de *variations régulières*; les autres sont des *variations irrégulières*, ou *accidentelles*.

Pendant l'intervalle d'une même journée, on voit, dans nos climats, l'extrémité australe de l'aiguille marcher de quelques minutes vers l'ouest pendant la matinée, et jusqu'à l'heure du maximum de température; elle revient ensuite sur elle-même, à l'heure où la température s'abaisse, pour reprendre une marche semblable le jour suivant, et ainsi de suite. Ces écarts réguliers, auxquels on donne le nom de *variations diurnes*, sont cependant plus grands pendant la saison chaude que pendant l'hiver.

Si maintenant on évalue, en un lieu déterminé, la *déclinaison moyenne* de l'année, et si l'on compare entre elles les moyennes de

(\*) On peut, par exemple, placer un oiseau dans une cage ordinaire, à treillage de fils de fer, en communication avec le sol, et constater que les décharges d'une machine électrique, ou même celles d'une batterie, en éclatant sur la cage, ne font éprouver à l'oiseau aucune commotion.

plusieurs années successives, on constate une variation qui a reçu le nom de *variation séculaire*. Les observations faites à Paris, depuis l'année 1580, ont conduit aux résultats suivants. — En 1580, la *déclinaison* était orientale et égale à  $11^{\circ} 50'$ ; elle a été en diminuant jusqu'en 1663, où elle est devenue nulle, puis occidentale, et l'aiguille a continué à marcher dans le même sens jusqu'en 1814. En 1814, la *déclinaison* occidentale a atteint un maximum, égal à  $22^{\circ} 54'$ , et elle a ensuite commencé à décroître. — En 1885, la *déclinaison* moyenne, toujours occidentale, était de  $16^{\circ} 15'$ ; elle décroît d'environ  $7,4$  par an : si cette loi se continue, la *déclinaison* à Paris deviendra nulle vers le milieu du siècle prochain; puis elle redeviendra orientale, et ainsi de suite.

Pour l'*inclinaison*, les observations remontent à une époque moins reculée. En 1674, époque postérieure à celle du maximum de *déclinaison*, l'*inclinaison* à Paris était d'environ  $75^{\circ}$ ; elle a été en décroissant depuis cette époque; sa valeur en 1884 était de  $65^{\circ} 20'$ , c'est-à-dire que, dans un intervalle de plus de deux cents ans, elle n'a diminué que d'environ  $10^{\circ}$ . — Par conséquent, tout ce qu'on peut dire jusqu'ici, c'est que les variations de l'*inclinaison* ont été beaucoup plus petites que celles de la *déclinaison*. Mais il n'est pas impossible que ces deux éléments du magnétisme terrestre soient soumis à une période d'oscillations *de même durée*; c'est une question sur laquelle il ne sera possible de se prononcer qu'aux époques où ces deux quantités repasseront par des maxima.

Enfin, on donne le nom de *variations accidentelles*, ou *orages magnétiques*, à de véritables perturbations, survenant brusquement dans les mouvements de l'aiguille aimantée, et ne durant en général que quelques heures. — Arago a remarqué qu'elles coïncident généralement avec l'apparition d'aurores boréales, soit en des points voisins, soit en des points éloignés. — Des observations suivies, faites dans les observatoires des colonies anglaises, qui couvrent la surface du globe, ont montré que ces orages apparaissent simultanément, avec des intensités diverses, en un grand nombre de points : la cause qui les produit ne peut donc résider que dans des phénomènes s'accomplissant à une grande distance de la surface du globe.

957. **Variations de la déclinaison et de l'inclinaison magnétiques, à la surface du globe.** — Puisque la *déclinaison* et l'*inclinaison* n'éprouvent, en un même lieu, pendant le cours d'une année, que des variations de quelques minutes, on comprend que l'on puisse exprimer, par des tables numériques ou par des cartes, l'état magnétique du globe à une époque déterminée. — Voici quelques résultats généraux, se rapportant à l'époque actuelle.

*Déclinaison.* — La *déclinaison* varie beaucoup d'un point à l'autre du globe. Elle est occidentale en Europe; elle est orientale dans la

Chine et au Japon; les différences peuvent s'élever, sur un même parallèle, à 50° ou 40°. — On comprend quelle importance offre, pour la navigation ou pour la géodésie, la connaissance exacte de la déclinaison en chaque point du globe et à chaque instant. On trouve, dans *Annuaire du Bureau des longitudes*, une carte de France sur laquelle sont tracées les *lignes d'égale déclinaison*, ou *lignes isogoniques*, joignant entre eux les points pour lesquels la déclinaison a présenté une même valeur, au 1<sup>er</sup> janvier 1885; ces lignes se succèdent de degré en degré (\*). En admettant une variation d'environ 7' en moins par an, on peut obtenir, pendant plusieurs années, la valeur approchée de la déclinaison, pour les points compris dans cette carte.

Quant à la distribution des lignes isogoniques à la surface du globe, elle est trop irrégulière pour se prêter à un résumé élémentaire.

*Inclinaison.* — Les variations de l'aiguille d'inclinaison à la surface du globe peuvent se résumer de la manière suivante. Supposons qu'en partant de nos latitudes on puisse se déplacer, avec une boussole d'inclinaison, en suivant à peu près un *méridien*; à mesure que l'on remontera vers le nord, l'inclinaison, qui était d'environ 65° à Paris, ira en augmentant, le pôle austral de l'aiguille étant toujours au-dessous de l'horizon. On a même découvert, dans les voyages aux régions arctiques, un point où l'aiguille se tient *verticale*, c'est-à-dire où l'inclinaison est de 90°. Ce point, situé au nord de l'Amérique et à 15° du pôle, se nomme le *pôle magnétique boréal de la Terre* (\*\*). — Si, partant de là, on redescend vers l'équateur, on observera que l'inclinaison va toujours en diminuant; dans le voisinage de l'équateur, on trouvera un point où l'aiguille est *horizontale*, c'est-à-dire où l'inclinaison est nulle. Ce point appartient à l'*équateur magnétique* du globe. — En continuant la même marche vers le pôle austral de la Terre, on observera que l'aiguille s'incline de nouveau, mais alors c'est son pôle boréal qui se trouve au-dessous de l'horizontale. Cette inclinaison va en augmentant jusqu'à un point situé dans les régions antarctiques, et nommé *pôle magnétique austral* de la Terre, où l'aiguille se retrouve verticale, mais en sens contraire de la position qu'elle occupait au pôle magnétique boréal. Ce second point est à environ 18° du pôle géographique.

Le même fait s'observerait sur tous les méridiens. — La ligne qui réunit tous les points sans inclinaison s'appelle l'*équateur magnétique*; c'est une ligne assez irrégulière, mais s'écartant peu d'un grand cercle qui coupe l'équateur géographique en deux points situés à peu près aux

(\*) L'Annuaire du Bureau des longitudes donne aussi une table des déclinaisons et des autres éléments du magnétisme terrestre dans tous les chefs-lieux de départements de la France et dans quelques villes des pays voisins, pour le 1<sup>er</sup> janvier 1885.

(\*\*) En ce point, la déclinaison est indéterminée, puisque, les forces du couple terrestre étant verticales, elles ne peuvent donner aucune orientation à une aiguille mobile dans un plan horizontal.

extrémités d'un même diamètre. L'équateur magnétique se déplace d'ailleurs progressivement, par suite des variations séculaires de l'inclinaison (\*).

#### VII. — MÉTÉORES LUMINEUX.

958. *Arc-en-ciel.* — Lorsque le soleil est peu élevé au-dessus de l'horizon, et qu'en face de lui se trouve un nuage se résolvant en pluie, un spectateur, placé de manière à tourner le dos au soleil et à regarder le nuage, voit se produire un *arc-en-ciel*, c'est-à-dire un arc circulaire d'une certaine largeur, coloré des couleurs du spectre : le violet occupe le bord *interne* de cet arc; le rouge, le bord *externe*. — Quelquefois, un deuxième arc-en-ciel enveloppe le premier; les couleurs, moins brillantes, y sont disposées *dans un ordre inverse*.

Le phénomène de l'arc-en-ciel est dû à la décomposition des rayons solaires dans l'intérieur des gouttes de pluie. L'explication en a été donnée par Newton : nous en indiquerons sommairement les principes.

Lorsqu'un rayon de lumière simple RI (fig. 701 ou 702), un rayon rouge

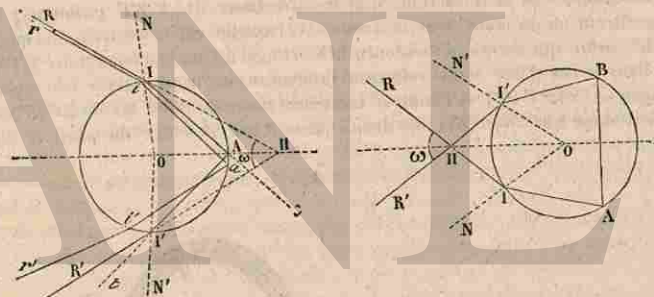


Fig. 701.

Fig. 702.

par exemple, rencontre en I la surface d'une goutte d'eau, il se divise en deux portions, dont l'une est réfléchie, et dont l'autre pénètre dans la goutte en se réfractant suivant IA; celle-ci peut subir soit une, soit deux, soit un plus grand nombre de réflexions intérieures, avant d'émerger suivant IT'; la figure 701 représente le cas d'une seule réflexion intérieure; la figure 702, le cas de deux réflexions.

(\*) L'hypothèse de l'aimant terrestre rend compte des diverses valeurs que présente l'inclinaison sur un même méridien. Il suffit, en effet, de disposer un aimant un peu intense dans une position fixe, et de faire parcourir à une boussole d'inclinaison une demi-circonférence, décrite sur une droite ayant la direction même de cet aimant, pour voir l'aiguille de cette boussole prendre successivement, par rapport à l'aimant, les diverses positions que nous venons de décrire par rapport à la ligne des pôles de la Terre. — Mais, d'autre part, les variations séculaires du magnétisme terrestre conduiraient à regarder l'aimant terrestre comme éprouvant des changements progressifs de direction, et aussi d'intensité.

Considérons d'abord le cas d'une seule réflexion. — Soit un deuxième rayon *ri* (fig. 701), parallèle à RI et de même réfrangibilité, qui rencontre la surface de la sphère en un point *i* voisin de I : les angles d'incidence de ces deux rayons étant différents, il est aisé de voir qu'ils s'écartent de plus en plus l'un de l'autre, pendant leur trajet à l'intérieur de la sphère; à l'émergence, les rayons IR' et *i*r' suivent des directions divergentes. En d'autres termes, un faisceau de rayons simples, parallèles avant l'incidence, donne généralement naissance à un faisceau réfracté divergent : si donc on a égard à la distance du nuage au spectateur, on conçoit que la quantité de lumière apportée à l'œil par ce faisceau soit trop faible pour y produire une impression. — Mais la déviation totale du rayon RI est la somme des angles HIs, AI, IR' : or, la théorie montre que, si la position de RI est telle que cette déviation totale soit un maximum ou un minimum par rapport à celles des autres rayons, les rayons voisins de RI émergeront suivant des directions sensiblement parallèles; ces rayons pourront donc impressionner l'œil : on les nomme rayons efficaces.

Le calcul donne, pour les rayons de chaque couleur, la valeur de ce maximum ou de ce minimum; et la figure montre que, en retranchant cette valeur de 4 angles droits, on obtient l'angle RHR' ou  $\omega$ , que fait le faisceau incident avec le faisceau émergent; on voit aussi, en tenant compte des lois de la réflexion et de la réfraction, que les directions RI et RT' prolongées se rencontrent en un point H de la droite OA, laquelle est bissectrice de l'angle RHR'; enfin, que l'angle d'incidence RIN est égal à l'angle d'émergence RT'N'.

— Dans le cas d'une seule réflexion intérieure, on trouve, pour les rayons rouges,  $\omega = 42^{\circ} 1' 10''$ , et l'angle d'incidence correspondant est de  $59^{\circ} 25' 50''$ .

Soit donc SAS' (fig. 705) une droite passant par le centre du soleil et par

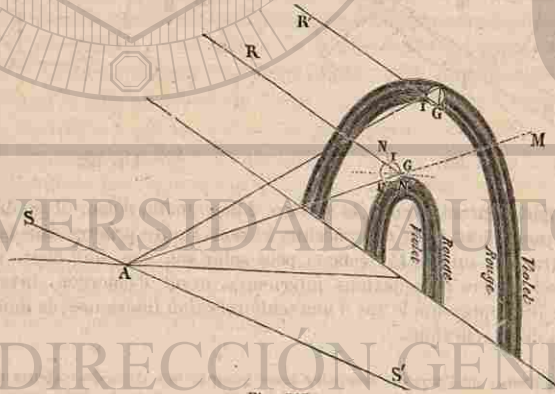


Fig. 705.

l'œil du spectateur que nous supposons placé en A; menons par ce point A, vers le nuage, une droite quelconque AM faisant avec SAS' un angle de  $42^{\circ} 1' 10''$  : pendant la chute de la pluie, cette droite est à chaque instant rencontrée par des gouttes d'eau, de telle façon que l'angle d'incidence soit égal à  $59^{\circ} 25' 50''$ . Soit G une des gouttes; menons par son centre une paral-

lèle à la bissectrice de l'angle MAS' et considérons le rayon solaire dont la direction RI est symétrique de l'IA par rapport à cette parallèle. Ce rayon, en se réfractant au point I, subit une décomposition, et l'on voit, d'après ce qui précède, que le rayon rouge auquel il donne naissance sortira de la goutte d'eau suivant l'IA, après s'être réfléchi une fois dans son intérieur; on voit, de plus, que les rayons très voisins de RI donneront, à l'émergence, un faisceau de rayons efficaces; l'œil de l'observateur placé en A recevra donc de la lumière rouge dans la direction l'IA. — Les mêmes conclusions s'appliquant à toute droite qui fait avec AS' un angle de  $42^{\circ} 1' 10''$ , le spectateur verra un arc rouge, suivant l'intersection de la voûte céleste avec la surface d'un cône engendré par la révolution de l'IA autour de AS'. Cet arc rouge ne sera d'ailleurs pas une simple ligne lumineuse, mais une bande, ayant une largeur angulaire égale au diamètre apparent du soleil; on voit en effet que l'on peut répéter, pour chacun des points du soleil, les raisonnements que nous avons faits pour le centre.

Les diverses couleurs qui composent la lumière blanche incidente donnent lieu à des phénomènes semblables; mais la théorie montre que la valeur de l'angle  $\omega$  va progressivement en décroissant, du rouge au violet : c'est pourquoi, dans cet arc-en-ciel, le rouge occupe le bord externe. — Les bandes correspondantes aux sept couleurs du spectre se superposent d'ailleurs en partie; de sorte que les couleurs de l'arc-en-ciel ne sont pas des couleurs simples, à l'exception du rouge extrême et du violet extrême.

Si l'on considère de même le cas de deux réflexions intérieures, on arrive à expliquer l'arc-en-ciel extérieur. — Dans ce cas, la valeur de l'angle  $\omega$  (fig. 702) est plus petite pour le rouge que pour le violet : le rouge occupe donc le bord interne, et le violet le bord externe. — On comprend aussi que ce deuxième arc doit être moins brillant que le premier, parce que les rayons qui le produisent ont subi une réflexion de plus, à l'intérieur des gouttes d'eau.

930. Halos. — On nomme halos, des cercles colorés qui s'observent quelquefois autour du soleil, et dont cet astre occupe le centre : les couleurs y sont les mêmes que dans l'arc-en-ciel, mais le rouge est toujours à l'intérieur, le violet toujours à l'extérieur. — Le plus souvent, le halo est composé d'un cercle unique, dont le rayon est vu sous un angle d'environ  $25^{\circ}$ . Parfois, on observe un deuxième cercle, concentrique au premier, et dont le rayon est vu sous un angle double. Enfin, on peut voir apparaître un cercle ou un arc coloré, tangent au point le plus élevé du halo de  $25^{\circ}$ ; ordinairement, cet arc AA' est à l'extérieur du cercle CC' du halo (fig. 704); mais il se peut aussi que AA' enveloppe le halo (fig. 705). — Les halos s'observent également autour de la lune; mais alors les couleurs sont moins nettes.

Le phénomène des halos a été attribué par Mariotte à la décomposition de la lumière, dans les aiguilles prismatiques hexagonales de glace qui composent les cirrus (925). L'explication des halos repose sur les mêmes principes que celle de l'arc-en-ciel.

940. Cercles parhéliques. — Parhélies. — Un cercle parhélique est une bande blanche horizontale PP' (fig. 704 et 705), passant par le soleil S, et ayant une hauteur égale au diamètre de l'astre. Il accompagne ordinairement le halo, qu'il coupe en deux points *s* et *s'* (fig. 704); en ces points, on voit apparaître des images du soleil, très vives et colorées, qu'on nomme

*parhélies*. — Ordinairement, on observe aussi une image blanche de l'astre, au point du cercle parhélique qui est diamétralement opposé au soleil; on lui donne le nom d'*anthélie* ou de *faux-soleil*. — Lorsque l'arc AA' enveloppe

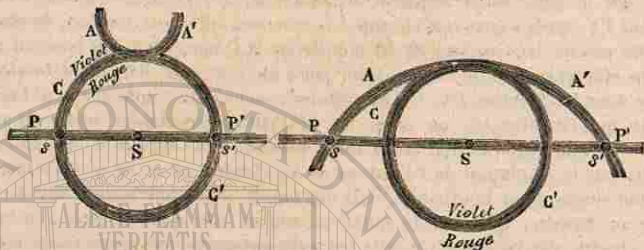


Fig. 704.

Fig. 705.

le halo de 25° (fig. 705), les parhélies *s* et *s'* apparaissent aux intersections de cet arc AA' avec le cercle parhélique.

Le cercle parhélique est dû à la réflexion de la lumière solaire, sur les faces des prismes de glace qui sont placées verticalement.

941. **Couronnes.** — Les couronnes sont encore des cercles colorés, qui apparaissent autour du soleil ou autour de la lune. Elles se distinguent des halos par une disposition inverse des couleurs : le rouge est toujours à l'extérieur, le violet à l'intérieur; leur diamètre est d'ailleurs bien moindre que celui des halos. — On observe fréquemment plusieurs couronnes concentriques : l'angle sous lequel on voit le rayon de la couronne intérieure varie depuis 19° 50' jusqu'à 4°.

Le phénomène des couronnes est dû à l'action exercée sur les rayons solaires par les nuages formés de gouttelettes sphériques, sensiblement égales entre elles. — On peut le reproduire artificiellement, en saupoudrant de lycopode une lame de verre, à travers laquelle on regarde la flamme d'une bougie placée à une certaine distance.

## PROBLÈMES

### PROBLÈMES SUR LA PESANTEUR ET L'HYDROSTATIQUE

I. Dans une machine d'Atwood, chacune des masses égales pèse 240 grammes, la masse additionnelle pèse 10 grammes. On sait que l'accélération de la chute libre des corps est égale à 9<sup>m</sup>,80. — Évaluer, en faisant usage du système d'unités C, G, S. : 1° la force qui met le système en mouvement; 2° la masse mise en mouvement; 3° la hauteur de chute, pour une durée de la chute égale à 5 secondes.

*Solution.* — 1° Puisque l'accélération de la chute libre est égale à 980 centimètres, l'intensité de la pesanteur est de 980 dynes : c'est la force qui sollicite à tomber le gramme-masse. Or, dans le cas actuel, la force qui met le système en mouvement est le poids de la masse additionnelle; cette force est donc égale à  $10 \times 980 = 9800$  dynes.

2° La masse mise en mouvement est évidemment  $2 \times 240 + 10 = 490$  grammes.

3° L'accélération  $\gamma$  du mouvement, évaluée en centimètres, s'obtient en faisant le quotient de la force, évaluée en dynes, par la masse, évaluée en grammes : on a donc  $\gamma = \frac{9800}{490} = 20$  centimètres. — L'espace parcouru pendant la première seconde de la chute est la moitié de l'accélération, 10 centimètres; l'espace parcouru pendant les cinq premières secondes est 25 fois plus grand, c'est-à-dire 250 centimètres.

II. Le fil qui s'enroule sur la poulie d'une machine d'Atwood supporte, à ses deux extrémités, deux masses égales chacune à 240 grammes; l'une de ces masses, ramenée à la division zéro, est surchargée d'une masse additionnelle cylindrique de 5 grammes, et d'une masse de forme allongée, égale aussi à 5 grammes. On dispose le curseur annulaire de manière à arrêter la masse de forme allongée au bout de 2 secondes de chute. On demande de trouver l'équation du mouvement : 1° quand la durée de la chute est inférieure à deux secondes; 2° quand la durée de la chute dépasse 2 secondes. — On sait que l'accélération de la chute libre est de 9<sup>m</sup>,80. — On fera usage des unités C, G, S.

*Solution.* — La force qui sollicite le système, évaluée en dynes, est égale à  $10 \times 980 = 9800$  dynes, dans la première partie de la chute; elle n'est plus que  $5 \times 980 = 4900$  dynes, dans la seconde partie. — La masse entraînée est d'abord de  $2 \times 240 + 10 = 490$  grammes; elle n'est plus ensuite que de  $2 \times 240 + 5 = 485$  grammes. — L'accélération du mouvement s'obtient, dans les deux cas, en faisant le quotient de la force par la masse :  $\gamma = \frac{F}{m}$ . On trouve ainsi, avant que le curseur annulaire ait arrêté la masse de forme allongée,  $\gamma = 20$  centimètres; après que cette masse a été arrêtée, c'est-à-dire au bout de 2 secondes,  $\gamma' = 40^{\text{m}}, 10$ .

Si  $t$  est inférieur à 2 secondes, la vitesse et l'espace parcouru sont donnés par les deux équations :

$$(1) \quad v = 20 \times t, \quad e = 10 \times t^2.$$

En particulier, quand  $t = 2$ , on a  $e = 40$ ,  $v = 40$ . Le curseur annulaire est donc placé à 40 centimètres du zéro, et quand le système mobile abandonne la masse de forme allongée, sa vitesse est de 40 centimètres. Cette vitesse est la vitesse initiale  $v_0$  du second mouvement, uniformément accéléré, qui succède au premier; l'accélération



*parhélies*. — Ordinairement, on observe aussi une image blanche de l'astre, au point du cercle parhélique qui est diamétralement opposé au soleil; on lui donne le nom d'*anthélie* ou de *faux-soleil*. — Lorsque l'arc AA' enveloppe

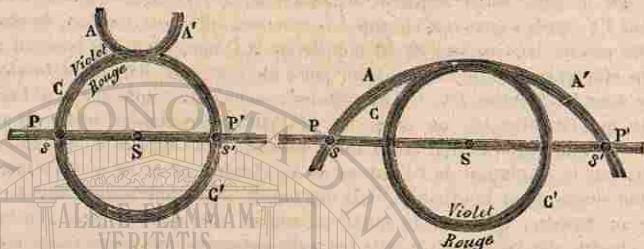


Fig. 704.

Fig. 705.

le halo de 25° (fig. 705), les parhélies *s* et *s'* apparaissent aux intersections de cet arc AA' avec le cercle parhélique.

Le cercle parhélique est dû à la réflexion de la lumière solaire, sur les faces des prismes de glace qui sont placées verticalement.

941. **Couronnes.** — Les couronnes sont encore des cercles colorés, qui apparaissent autour du soleil ou autour de la lune. Elles se distinguent des halos par une disposition inverse des couleurs : le rouge est toujours à l'extérieur, le violet à l'intérieur; leur diamètre est d'ailleurs bien moindre que celui des halos. — On observe fréquemment plusieurs couronnes concentriques : l'angle sous lequel on voit le rayon de la couronne intérieure varie depuis 19° 50' jusqu'à 4°.

Le phénomène des couronnes est dû à l'action exercée sur les rayons solaires par les nuages formés de gouttelettes sphériques, sensiblement égales entre elles. — On peut le reproduire artificiellement, en saupoudrant de lycopode une lame de verre, à travers laquelle on regarde la flamme d'une bougie placée à une certaine distance.

## PROBLÈMES

### PROBLÈMES SUR LA PESANTEUR ET L'HYDROSTATIQUE

I. Dans une machine d'Atwood, chacune des masses égales pèse 240 grammes, la masse additionnelle pèse 10 grammes. On sait que l'accélération de la chute libre des corps est égale à 9<sup>m</sup>,80. — Évaluer, en faisant usage du système d'unités C, G, S. : 1<sup>o</sup> la force qui met le système en mouvement; 2<sup>o</sup> la masse mise en mouvement; 3<sup>o</sup> la hauteur de chute, pour une durée de la chute égale à 5 secondes.

*Solution.* — 1<sup>o</sup> Puisque l'accélération de la chute libre est égale à 980 centimètres, l'intensité de la pesanteur est de 980 dynes : c'est la force qui sollicite à tomber le gramme-masse. Or, dans le cas actuel, la force qui met le système en mouvement est le poids de la masse additionnelle; cette force est donc égale à  $10 \times 980 = 9800$  dynes.

2<sup>o</sup> La masse mise en mouvement est évidemment  $2 \times 240 + 10 = 490$  grammes.

3<sup>o</sup> L'accélération  $\gamma$  du mouvement, évaluée en centimètres, s'obtient en faisant le quotient de la force, évaluée en dynes, par la masse, évaluée en grammes : on a donc  $\gamma = \frac{9800}{490} = 20$  centimètres. — L'espace parcouru pendant la première seconde de la chute est la moitié de l'accélération, 10 centimètres; l'espace parcouru pendant les cinq premières secondes est 25 fois plus grand, c'est-à-dire 250 centimètres.

II. Le fil qui s'enroule sur la poulie d'une machine d'Atwood supporte, à ses deux extrémités, deux masses égales chacune à 240 grammes; l'une de ces masses, ramenée à la division zéro, est surchargée d'une masse additionnelle cylindrique de 5 grammes, et d'une masse de forme allongée, égale aussi à 5 grammes. On dispose le curseur annulaire de manière à arrêter la masse de forme allongée au bout de 2 secondes de chute. On demande de trouver l'équation du mouvement : 1<sup>o</sup> quand la durée de la chute est inférieure à deux secondes; 2<sup>o</sup> quand la durée de la chute dépasse 2 secondes. — On sait que l'accélération de la chute libre est de 9<sup>m</sup>,80. — On fera usage des unités C, G, S.

*Solution.* — La force qui sollicite le système, évaluée en dynes, est égale à  $10 \times 980 = 9800$  dynes, dans la première partie de la chute; elle n'est plus que  $5 \times 980 = 4900$  dynes, dans la seconde partie. — La masse entraînée est d'abord de  $2 \times 240 + 10 = 490$  grammes; elle n'est plus ensuite que de  $2 \times 240 + 5 = 485$  grammes. — L'accélération du mouvement s'obtient, dans les deux cas, en faisant le quotient de la force par la masse :  $\gamma = \frac{F}{m}$ . On trouve ainsi, avant que le curseur annulaire ait arrêté la masse de forme allongée,  $\gamma = 20$  centimètres; après que cette masse a été arrêtée, c'est-à-dire au bout de 2 secondes,  $\gamma' = 40^m,10$ .

Si  $t$  est inférieur à 2 secondes, la vitesse et l'espace parcouru sont donnés par les deux équations :

$$(1) \quad v = 20 \times t, \quad e = 10 \times t^2.$$

En particulier, quand  $t = 2$ , on a  $e = 40$ ,  $v = 40$ . Le curseur annulaire est donc placé à 40 centimètres du zéro, et quand le système mobile abandonne la masse de forme allongée, sa vitesse est de 40 centimètres. Cette vitesse est la vitesse initiale  $v_0$  du second mouvement, uniformément accéléré, qui succède au premier; l'accélération

devient alors  $10^m,10$ ; et si l'on compte toujours l'espace parcouru à partir du zéro de la règle, les deux équations du mouvement sont :

$$(2) \quad v = 40 + 10,10(t-2), \quad e = 40 + 40(t-2) + 5,05(t-2)^2.$$

III. On a laissé tomber une pierre au fond d'un puits, et l'on a entendu le bruit de la chute au bout de  $\frac{1}{2}$  secondes et demie. Quelle est la profondeur du puits? — On supposera que le son se propage d'un mouvement uniforme, avec une vitesse de 340 mètres par seconde.

*Solution.* — Représentons par  $T$  le temps écoulé entre le départ de la pierre et le moment où le bruit de la chute est parvenu à l'oreille : soient  $t$  la durée de la chute, et  $x$  la profondeur inconnue du puits. En désignant par  $g$  l'intensité de la pesanteur, on aura

$$(1) \quad x = \frac{1}{2}gt^2.$$

D'autre part, le bruit de la chute a mis, pour parvenir à l'oreille, un temps  $T - t$ ; donc, si  $v$  est la vitesse de propagation du son, on a

$$x = v(T - t); \quad \text{d'où} \quad t = T - \frac{x}{v};$$

en substituant cette valeur de  $t$  dans l'équation (1), on arrive à l'équation du second degré

$$x^2 - 2\left(vT + \frac{v^2}{g}\right)x + v^2T^2 = 0;$$

d'où l'on tirera, réductions faites,

$$x = vT + \frac{v^2}{g} \pm \sqrt{\left(2vT + \frac{v^2}{g}\right)\frac{v^2}{g}}.$$

Or, remarquons que la hauteur  $x$  du puits doit être inférieure au produit  $vT$ , qui exprimerait l'espace parcouru par le son dans le temps  $T$ : donc la valeur de  $x$  qui correspond au signe négatif du radical est la seule qui convienne au problème actuel. En remplaçant les lettres par leurs valeurs numériques, on trouve  $x = 88^m,2$ .

IV. Calculer la vitesse acquise par un corps pesant qui tombe d'une hauteur égale à 20 mètres, en un lieu de la Terre où la longueur du pendule qui bat la seconde est de 98 centimètres. — On négligera la résistance de l'air.

*Solution.* — Représentons par  $g$  l'accélération de la chute, exprimée en mètres, et par  $v$  la vitesse. On a

$$v = \sqrt{2g \times 20}.$$

Quant à la valeur de  $g$ , elle est donnée par la formule du pendule; la longueur du pendule simple est  $0^m,98$ , la durée de l'oscillation est 1 seconde; on a donc

$$1 = \pi \sqrt{\frac{0,98}{g}} \quad g = \pi^2 \times 0,98.$$

En portant cette valeur de  $g$  dans l'expression de la vitesse, il vient :

$$v = \pi \sqrt{2 \times 0,98 \times 20} = 19^m,67.$$

V. Sur un couteau ayant son arête horizontale, on dispose, perpendiculairement à cette arête, une tige pesante de poids  $p$  et de longueur  $l$ , supportant à ses extrémités des poids  $P$  et  $Q$ . Calculer les distances  $x$  et  $y$  du couteau aux extrémités de la tige, lorsque celle-ci se tient horizontalement en équilibre.

*Solution.* — Pour qu'il y ait équilibre, il faut que la résultante des trois forces  $P$ ,  $Q$ , et  $p$  passe par l'arête du couteau. — Or, on peut remplacer cette dernière force  $p$ ,

appliquée au milieu de la tige, par deux forces égales à  $\frac{p}{2}$ , dont les points d'application sont les deux extrémités de la tige. Il suffit alors d'exprimer que la résultante des forces  $P + \frac{p}{2}$  et  $Q + \frac{p}{2}$ , appliquées à distances  $x$  et  $y$  de l'arête du couteau, doit passer par cette arête; on aura donc

$$\frac{P + \frac{p}{2}}{Q + \frac{p}{2}} = \frac{y}{x}, \quad \text{et } x + y = l.$$

En résolvant ces deux équations, on trouve :

$$x = l \frac{Q + \frac{p}{2}}{P + Q + p}, \quad y = l \frac{P + \frac{p}{2}}{P + Q + p}.$$

VI. Deux mobiles sont lancés successivement de bas en haut, avec la même vitesse initiale  $a$ : l'intervalle de temps qui s'écoule entre le départ du premier et le départ du second est égal à  $\theta$ . — On demande : 1° à quelle hauteur et à quel instant ils se rencontreront; 2° de quelles vitesses ils seront animés à l'instant de leur rencontre.

*Solution.* — Représentons par  $t$  le temps qui s'écoule entre le départ du premier mobile et l'instant de la rencontre, par  $e$  la hauteur à laquelle les deux mobiles se rencontrent, par  $v$  et  $v'$  leurs vitesses au moment de la rencontre, ces deux quantités étant comptées positivement de bas en haut. En désignant par  $g$  l'accélération de la chute libre, et remarquant que le mouvement des deux mobiles est uniformément retardé, on aura, pour le premier mobile,

$$(1) \quad e = at - \frac{1}{2}gt^2, \quad v = a - gt.$$

La considération du mouvement du second mobile nous donnera une deuxième expression de  $e$ , et la valeur de  $v'$ , en remplaçant, dans les équations (1),  $t$  par  $t - \theta$ ; on a ainsi

$$(2) \quad e = a(t - \theta) - \frac{1}{2}g(t - \theta)^2, \quad v' = a - g(t - \theta).$$

En égalant les deux expressions (1) et (2) de la même quantité  $e$ , on obtient une équation du premier degré, qui donne la valeur de  $t$ ; en portant cette valeur dans les expressions de  $e$ ,  $v$ , et  $v'$ , on obtient les résultats suivants :

$$t = \frac{2a + g\theta}{2g}, \quad e = \frac{4a^2 - g^2\theta^2}{8g}, \quad v = -g\frac{\theta}{2}, \quad v' = +g\frac{\theta}{2}.$$

On voit que, à l'instant de la rencontre, les deux mobiles sont animés de vitesses égales et de signes contraires : le premier mobile descend, tandis que le second s'élève. — La hauteur  $e$  doit être positive, c'est-à-dire que l'on doit avoir  $\theta < \frac{2a}{g}$ ; en d'autres termes, le second mobile doit être lancé avant que le premier mobile soit revenu au point de départ.

VII. Le petit piston d'une presse hydraulique a une section de 15 centimètres carrés la pression qu'on exerce sur lui est de 10 kilogrammes. On demande : 1° quelle pression exercera le gros piston quand il cessera de pouvoir s'élever, en supposant que sa section soit de 5 décimètres carrés; 2° quelle section on devrait donner au gros piston, pour qu'il pût exercer une pression de 2000 kilogrammes.

*Solution.* — 1° La pression exercée par le petit piston sur chaque centimètre carré est  $\frac{40^{11}}{15}$  donc la pression transmise à la surface inférieure du gros piston sera

$\frac{40^{m}}{15} \times 500$ , ou 800 kilogrammes; ce sera aussi la pression que ce piston pourra exercer sur le corps soumis à son action.

2° Pour que le gros piston pût exercer une pression de 2000 kilogrammes, il faudrait que sa section contint autant de centimètres carrés que 2000 kilogrammes contiennent de fois  $\frac{40^{m}}{15}$ , c'est-à-dire que sa section fût égale à  $2000 : \frac{40}{15}$ , ou 750 centimètres carrés.

VIII. On a un cylindre d'acier, de 22 centimètres de longueur, qu'on voudrait lester avec un cylindre de platine de même diamètre, de manière qu'il se tint verticalement flottant dans du mercure, la partie non plongée du cylindre d'acier n'étant que de 2 centimètres : quelle longueur faut-il donner au cylindre de platine ?

Solution. — Désignons par  $d$  la densité du platine, par  $d'$  celle de l'acier et par  $d''$  celle du mercure; appelons  $x$  la longueur du cylindre de platine. Exprimons que le poids du corps plongé et le poids du mercure déplacé sont égaux entre eux; nous aurons

$$\begin{aligned} dx + 22d' &= (20 + x)d''; \\ \text{d'où l'on tire} \quad x &= \frac{20d'' - 22d'}{d - d''}; \end{aligned}$$

et il suffira de remplacer  $d$ ,  $d'$  et  $d''$  par leurs valeurs, pour avoir la valeur numérique de  $x$ .

IX. Quel est le rapport des poids  $x$  et  $y$  de deux cylindres de fer et de platine qu'il faudrait fixer l'un à l'autre, pour que le système pût se maintenir en équilibre au milieu du mercure? — Densité du fer, 7,8; densité du platine, 21; densité du mercure, 13,6.

Solution. — Les poids des cylindres étant  $x$  et  $y$ , leurs volumes seront respectivement  $\frac{x}{7,8}$  et  $\frac{y}{21}$ . Le volume du mercure déplacé sera égal à la somme de ces volumes, et le poids du mercure déplacé sera  $\left(\frac{x}{7,8} + \frac{y}{21}\right) 13,6$ . — Ce poids devant être égal à la somme des poids des deux cylindres, on aura

$$\left(\frac{x}{7,8} + \frac{y}{21}\right) 13,6 = x + y;$$

d'où

$$x \left(\frac{13,6}{7,8} - 1\right) = y \left(1 - \frac{13,6}{21}\right),$$

ce qui donne

$$\frac{x}{y} = 0,474.$$

X. Un morceau de platine et une boule de cire se font équilibre dans les plateaux d'une balance parfaitement juste. Calculer le rapport des masses de ces deux corps, en tenant compte de la poussée qu'ils éprouvent de la part de l'air. — Densité du platine, 21; densité de la cire, 0,96; densité absolue de l'air, 0,0015.

Solution. — Soit  $m$  la masse du platine; son volume, exprimé en centimètres cubes, est  $\frac{m}{21}$ , et par suite la masse de l'air qu'il déplace est  $\frac{m}{21} \times 0,0015$ . De même,  $m'$  étant la masse de la cire, la masse de l'air qu'elle déplace est  $\frac{m'}{0,96} \times 0,0015$ . Or, les poids apparents de ces deux corps dans l'air étant égaux, on a, en désignant par  $g$  l'intensité de la pesanteur,

$$\left(m - \frac{m}{21} \times 0,0015\right) g = \left(m' - \frac{m'}{0,96} \times 0,0015\right) g;$$

d'où l'on déduira facilement

$$\frac{m}{m'} = \frac{21(0,96 - 0,0015)}{0,96(21 - 0,0015)} = \frac{20,152700}{20,158752} = 0,9987.$$

XI. Une sphère de platine et un cylindre de cuivre, ayant même diamètre, sont suspendus aux deux extrémités d'une balance parfaitement juste, et plongent, la première, dans du mercure; le second, dans l'eau. Quelle doit être la hauteur du cylindre pour que le fléau se tienne horizontal? — Poids spécifique du platine, 22; poids spécifique du cuivre, 8,8; poids spécifique du mercure, 13,6.

Solution. — Soient  $d$  le diamètre commun de la sphère et du cylindre,  $h$  la hauteur inconnue du cylindre; on verra facilement que le poids apparent de la sphère de platine dans le mercure est  $\frac{1}{6} \pi d^2 (22 - 13,6)$ ; le poids apparent du cylindre de cuivre dans l'eau est  $\frac{1}{4} \pi d^2 h (8,8 - 1)$ . En égalant ces deux expressions, supprimant le facteur commun  $\frac{1}{2} \pi d^2$ , et effectuant les calculs, on arrive à l'équation

$$h \times 5,9 = d \times 2,8; \quad \text{d'où} \quad h = d \times 0,718.$$

L'équilibre aura lieu, pour une valeur quelconque du diamètre commun de la sphère et du cylindre, si la hauteur du cylindre est égale aux 0,718 de ce diamètre.

XII. On fait passer de l'acide chlorhydrique gazeux dans l'eau, jusqu'à ce qu'on obtienne l'hydrate de formule  $\text{HCl} + 16\text{H}_2\text{O}$ , dont la densité est 1,12. Trouver l'accroissement de volume de l'eau, et le volume du gaz dissous dans un litre d'eau. On sait que 1 litre d'acide chlorhydrique gazeux pèse 1<sup>er</sup>,614.

Solution. — Supposons que l'on fasse passer le gaz dans 1 litre d'eau, et cherchons la masse de gaz chlorhydrique qui entre en combinaison avec 1000 grammes d'eau pour former l'hydrate  $\text{HCl} + 16\text{H}_2\text{O}$ . D'après la formule même, 36<sup>er</sup>,5 de gaz se combinent avec 144 grammes d'eau; donc 1000 grammes d'eau absorbent 253<sup>er</sup>,472 de gaz chlorhydrique. Puisque 1 litre de ce gaz pèse 1<sup>er</sup>,614, le volume de gaz absorbé par 1 litre d'eau est égal à  $\frac{253,472}{1,614} = 157$  litres.

La masse de l'hydrate obtenue est de 1235<sup>er</sup>,472, et le volume, évalué en centimètres cubes, est  $\frac{1235,472}{1,12} = 1119$ . — Le volume de l'eau s'est accru de 0<sup>in</sup>,119.

XIII. Un vase cylindrique, de section  $S$  renferme un liquide de densité  $D$ , à la surface duquel on fait flotter un cylindre de bois, de section  $s$ , de hauteur  $h$  et de densité  $d$ . On demande : 1° la hauteur de la partie du cylindre immergée; 2° de combien le niveau s'est élevé dans le vase; 3° l'accroissement de la pression sur le fond du vase.

Solution. — 1° Soit  $x$  la hauteur de la partie immergée; exprimons que le poids du cylindre de bois est égal au poids du liquide qu'il déplace, nous aurons

$$sxd = shd, \quad \text{d'où} \quad x = h \frac{d}{D}.$$

2° Le niveau du liquide s'est élevé comme si l'on avait versé dans le vase un volume de liquide  $sx = sh \frac{d}{D}$ ; l'addition de ce volume du liquide, dans un vase cylindrique de section  $S$ , produira une élévation du niveau exprimée par  $y = h \frac{sd}{SD}$ .

3° La pression sur le fond du vase s'est accrue du poids de la colonne liquide ayant pour base le fond du vase et pour hauteur l'accroissement du niveau; l'augmentation de la pression est donc  $SyD = shd$ . La pression sur le fond du vase a donc augmenté du poids du cylindre qui flotte à la surface du liquide.

XIV. Un aréomètre de Baumé, destiné aux liquides plus denses que l'eau, marque 66 degrés dans l'acide sulfurique concentré. Quelle est la densité de cet acide, sachant que la densité de la solution saline qui a servi à marquer le 15° degré de l'instrument est 1,1156?

*Solution.* — Soit l'aréomètre représenté par la figure 95; appelons  $V$  le volume de liquide, exprimé en centimètres cubes, qu'il déplace quand il affleure au zéro, et  $v$  le volume de liquide que déplace une division de l'instrument. Quand l'aréomètre flotte dans l'eau, il affleure au zéro; le volume de l'eau déplacée est donc  $V$  centimètres cubes, et le poids de cette eau est  $V$  grammes; ce nombre exprime aussi le poids du corps flottant (91). Quand l'aréomètre flotte dans l'acide sulfurique, il affleure au 66° degré; le volume de l'acide déplacé est donc  $V - 66v$ , et le poids de cet acide, exprimé en grammes, est  $(V - 66v)x$ ,  $x$  désignant la densité cherchée, ce nombre  $(V - 66v)x$  exprime aussi le poids du corps flottant. Enfin, quand l'aréomètre flotte dans la solution saline dont la densité est 1,1156, et qu'il affleure au 15° degré, le poids du liquide déplacé est  $(V - 15v)1,1156$ ; c'est encore une expression du poids du corps flottant.

Si l'on égale successivement la première de ces expressions du poids de l'aréomètre à chacune des deux autres, on aura deux équations, savoir

$$\begin{aligned} V &= (V - 66v)x, \\ V &= (V - 15v)1,1156. \end{aligned}$$

Chaque terme de ces équations renfermant soit  $V$ , soit  $v$ , nous n'avons en réalité que deux inconnues,  $x$  et  $\frac{v}{V}$ ; en posant  $\frac{v}{V} = r$  et divisant les deux membres de chaque équation par  $V$ , nous aurons

$$\begin{aligned} 1 &= (1 - 66r)x, \\ 1 &= (1 - 15r)1,1156. \end{aligned}$$

La seconde donne  $r = \frac{0,1156}{16,7040}$  ou  $r = \frac{1156}{167040}$ ; en substituant dans la première, et résolvant par rapport à  $x$ , il vient

$$x = \frac{167040}{92064} = \frac{5220}{2877} = 1,814.$$

La densité cherchée est donc 1,814.

XV. Un aréomètre de Baumé, destiné aux liquides moins denses que l'eau (fig. 96), est plongé dans l'alcool absolu ayant pour densité 0,804. A quel degré affleure-t-il dans ce liquide, sachant que la densité de la solution qui a servi à marquer le zéro est 1,0853?

*Solution.* — Ce problème se traitera comme celui qui précède. — L'aréomètre plongé dans l'alcool absolu, marque 50°,9.

XVI. Un ballon contenant de l'air à la pression de 770 millimètres de mercure est ajusté, au moyen d'une monture à robinet, à la partie supérieure d'un baromètre à cuvette, dont le tube a une section de 2 centimètres carrés et une longueur de 90 centimètres au-dessus du niveau du mercure dans la cuvette. La pression extérieure étant de 760 millimètres, on ouvre le robinet; le mercure s'abaisse dans le tube, de telle sorte que sa surface ne se trouve plus qu'à 10 centimètres au-dessus du niveau dans la cuvette. On demande d'en déduire la capacité du récipient, en supposant que la température soit restée invariable pendant l'expérience.

*Solution.* — Soit  $x$  le volume du récipient, exprimé en centimètres cubes. Avant l'ouverture du robinet, le volume d'air contenu dans l'appareil est  $x$ , sa pression est 770 millimètres; quand le robinet est ouvert, le volume de cet air devient  $x + 2(90 - 10)$ , ou  $x + 160$ , et sa pression est 760 - 100 millimètres, ou 660 milli-

mètres. D'après la loi de Mariotte, le produit de chacun de ces volumes par la pression correspondante étant constant (141), on a :

$$x \times 770 = (x + 160)660;$$

d'où l'on tirera  $x = 960^{\text{e}}$ .

XVII. On a construit un baromètre à cuvette sans se préoccuper d'en chasser complètement l'air, de sorte que la chambre barométrique contient une quantité inconnue de ce gaz. On fait une première observation, dans laquelle on mesure successivement la hauteur de la colonne de mercure, qui est 748 millimètres, et la longueur de la chambre barométrique, qui est 122 millimètres. On soulève alors un peu le tube et l'on constate que la hauteur du liquide devient 750 millimètres, la chambre barométrique acquérant une longueur de 141 millimètres. Quelle est la pression atmosphérique au moment de l'expérience, en supposant que le tube soit bien cylindrique, au moins dans sa partie supérieure? (\*)

*Solution.* — Soit  $x$  la pression atmosphérique inconnue. Dans la première observation, le volume de l'air, représenté par la longueur qu'il occupe dans le tube, est 122; sa force élastique est  $x - 748$ . Dans la seconde observation, le volume de cet air est 141; sa force élastique est  $x - 750$ . On a donc :

$$(x - 748)122 = (x - 750)141;$$

d'où l'on tirera  $x = 762^{\text{e}}$ ,8.

XVIII. Un eudiomètre à mercure, de section uniforme dans toute sa longueur, est placé sur la cuve à mercure; il contient du gaz ammoniac, sur une longueur de 10 centimètres; le mercure s'élève dans le tube à 25 centimètres au-dessus de sa surface libre dans la cuvette. On fait passer dans l'eudiomètre une série d'étincelles électriques (fig. 540); jusqu'à ce que le gaz soit complètement décomposé; trouver la longueur occupée par le gaz. — Le baromètre marque 76 centimètres.

*Solution.* — Soit  $s$  la section du tube; le volume du gaz ammoniac est égal à  $10 \times s$ , sous la pression  $76 - 25 = 51$ ; si le gaz était sous la pression atmosphérique, son volume serait donc  $s \frac{40 \times 51}{76}$ . — Après le passage des étincelles, le volume du mélange d'azote et d'hydrogène est  $x \times s$ , en désignant par  $x$  la longueur cherchée, exprimée en centimètres; la longueur de la partie de l'eudiomètre, qui est en dehors de la cuve à mercure, est  $10 + 25 = 35$  centimètres; la hauteur occupée par le mercure est donc  $35 - x$ , et par suite la pression du mélange gazeux est  $76 - (35 - x) = 41 + x$ . Si le gaz était sous la pression 76, il occuperait le volume  $s \frac{x(41 + x)}{76}$ . — Or, on sait

que le volume du mélange d'azote et d'hydrogène est le double du volume primitif du gaz ammoniac, ces deux volumes étant mesurés sous la même pression; on a donc

$$2 \times s \frac{40 \times 51}{76} = s \frac{x(41 + x)}{76},$$

ou

$$x^2 + 41x - 1020 = 0.$$

On doit rejeter la racine négative; on prendra donc le signe + devant le radical :

$$x = -20,5 + \sqrt{20,5^2 + 1020};$$

en faisant le calcul, on trouve  $x = 17^{\text{e}}$ ,2.

(\*) Cette méthode est applicable à la construction de baromètres dont on pourrait enlever le liquide, en voyage, pour éviter les chances de rupture, et qu'on remplirait seulement au moment de l'observation, sans se préoccuper d'en expulser complètement l'air : le tube pourrait être complètement métallique, en fer par exemple, sauf la partie supérieure, qui serait formée par un tube de verre assez court et parfaitement cylindrique (Anago, *Astronomie populaire*).

XIX. Un tube cylindrique vertical, de longueur  $l$  et de section  $b$ , est rempli de mercure; l'extrémité supérieure est bouchée, l'autre extrémité est effilée, et communiquée avec un cylindre de longueur  $L$  et de section  $B$ , rempli d'air sec sous la pression atmosphérique. On débouche le tube, et on demande quelle sera la hauteur du mercure dans le tube, quand l'écoulement s'arrêtera. La hauteur barométrique est  $H$ .

Solution. — Puisque le tube fermé à sa partie supérieure est rempli de mercure, sa longueur  $l$  doit être inférieure à la hauteur barométrique  $H$ .

Le volume de la masse gazeuse isolée dans le cylindre est  $Bl$ , sous la pression  $H$ . — Quand on débouche le tube, le mercure s'écoule; le volume de l'air étant réduit, sa force élastique augmente, et l'équilibre s'établit quand il ne reste plus dans le tube qu'une hauteur  $x$  de mercure. Alors la force élastique de l'air est  $H + x$ ; le volume de mercure qui a passé dans le cylindre est  $b(l - x)$ , et le volume occupé par l'air est  $Bl - b(l - x)$ . On a donc, en appliquant la loi de Mariotte :

$$(Bl - b(l - x))(H + x) = BlH.$$

Les deux racines de cette équation sont de signes contraires; la racine positive convient seule.

XX. Dans un récipient rempli d'air sec sous la pression de 750 millimètres, on fait le vide jusqu'à une pression  $x$ , et on fait entrer de l'hydrogène dans le récipient, jusqu'à ce que le mélange soit sous la pression de 750 millimètres. On fait encore une fois le vide, sous la pression  $x$ , et on fait de nouveau entrer de l'hydrogène jusqu'à ce que la pression du mélange soit de 750 millimètres. Trouver quelle doit être la valeur de  $x$ , pour que le poids de l'hydrogène soit la dixième partie du poids de l'air avec lequel il est mélangé. — La densité de l'hydrogène est 0,069.

Solution. — Après la première opération, il reste dans le récipient une fraction de l'air initial égale à  $\frac{x}{750}$ . — Quand on fait le vide la seconde fois, on laisse dans le récipient cette même fraction du mélange, et par conséquent, on laisse dans le récipient la fraction  $(\frac{x}{750})^2$  de l'air qui primitivement remplissait le récipient : la pression de l'air dans le récipient est donc :  $750 \times (\frac{x}{750})^2 = \frac{x^2}{750}$ . Par suite, la pression de l'hydrogène est :  $750 - \frac{x^2}{750}$ . Si l'on désigne par  $V$  le volume du récipient, et par  $a$  le poids de l'unité de volume d'air, les poids de l'air et de l'hydrogène sont alors respectivement :

$$\frac{Va}{750} \times \frac{x^2}{750}, \quad \frac{Va \times 0,069}{750} (750 - \frac{x^2}{750})$$

Ces deux poids doivent être dans le rapport de 10 à 1 : l'inconnue est donc déterminée par l'équation

$$x^2 = 10 \times 0,069 [750^2 - x^2].$$

On trouve, en effectuant les calculs,  $x = 479$  millimètres.

XXI. Dans une éprouvette graduée, placée sur la cuve à mercure, et contenant un volume  $x$  d'eau, sans air, on introduit un volume  $V$  d'un mélange d'acide carbonique et d'oxyde de carbone, sous la pression  $H$ . — Après un certain temps, le volume occupé par le gaz est devenu  $V_1$ , sous la pression  $H_1$ . De ces données, et des coefficients de solubilité  $c'$  et  $c''$  des deux gaz, déduire la composition du mélange.

Solution. — Soient  $x'$  et  $x''$  les pressions de l'acide carbonique et de l'oxyde de carbone dans le mélange, occupant le volume  $V$  avant la dissolution. On a :

$$(1) \quad x' + x'' = H.$$

Après la dissolution d'une partie de chacun des gaz, la force élastique de l'acide carbonique au-dessus de l'eau est  $f$ , celle de l'oxyde de carbone est  $f''$ ; et l'on a

$$(2) \quad f + f'' = H_1.$$

Avant la dissolution, l'acide carbonique occupait un volume  $V$ , sous la pression  $x'$ ; après la dissolution, une partie de ce gaz occupe le volume  $V_1$  sous la pression  $f$ , et l'autre partie peut être considérée comme occupant le volume  $c'v$  sous la même pression  $f$ ; on a donc

$$(3) \quad (V_1 + c'v) f = Vx'.$$

On aurait de même, en considérant l'oxyde de carbone,

$$(4) \quad (V_1 + c''v) f'' = Vx''.$$

Des équations (3) et (4) on tire les valeurs de  $f$  et de  $f''$ ; en les portant dans l'équation (2), on a une équation en  $x'$  et  $x''$ , qui, combinée avec l'équation (1), donne les valeurs de  $x'$  et de  $x''$  :

$$x' = \frac{(V_1 + c'v)(H_1 - V_1H_1 - c''vH_1)}{Vv(c' - c'')}; \quad x'' = \frac{(V_1 + c''v)(H_1 - V_1H_1 - c'vH_1)}{Vv(c'' - c')}$$

XXII. Un gros tube cylindrique vertical  $M$ , ouvert à sa partie supérieure, et un petit tube cylindrique vertical  $m$ , fermé à sa partie supérieure, communiquent entre eux, par leurs parties inférieures, au moyen d'un tube de jonction; le premier,  $M$ , a une section de 50 centimètres carrés; le second,  $m$ , a une section quelconque. On a versé du mercure dans l'appareil, et l'on a enfermé ainsi dans le tube  $m$  un certain volume d'air qui y occupe une longueur de 2<sup>m</sup>,15, les niveaux du liquide dans les deux branches étant dans le même plan horizontal. Quelle pression, en kilogrammes, devrait-on exercer sur le liquide du tube  $M$ , à l'aide d'un piston qui s'adapterait exactement dans ce tube, pour que l'air n'occupât plus, dans le tube  $m$ , qu'une longueur de 0<sup>m</sup>,52? — Le tube  $m$  est supposé assez étroit, par rapport à  $M$ , pour que le niveau du mercure n'ait pas sensiblement baissé dans  $M$ ; la température reste invariable pendant l'expérience, et la pression barométrique est de 760 millimètres.

Solution. — Menons un plan horizontal par la face inférieure du piston, quand l'air du tube  $m$  est réduit au volume indiqué dans l'énoncé : deux surfaces égales, prises dans ce plan, et situées l'une dans le cylindre  $M$ , l'autre dans le tube  $m$ , doivent supporter des pressions égales. Or, une surface de 1 centimètre carré, prise à ce niveau dans le tube, supporte : 1<sup>o</sup> la pression due au poids du mercure dont la hauteur est 2<sup>m</sup>,15 — 0<sup>m</sup>,52, ou 163; 2<sup>o</sup> la pression exercée par l'air comprimé, qui équivaut au poids d'une colonne de mercure ayant pour hauteur  $76 \times \frac{215}{52}$ . Cette surface supporte donc une pression totale exprimée par le poids d'une colonne de mercure ayant pour base 1 centimètre carré, et pour hauteur  $163 + 76 \times \frac{215}{52}$  ou  $\frac{21816}{52}$ . La valeur de cette pression, en grammes, est donc  $\frac{21816 \times 13,6}{52}$  ou  $\frac{557497,6}{52}$ . Donc enfin, le piston du tube  $M$ , qui a une surface de 50 centimètres carrés, supportera une pression de  $\frac{557497,6 \times 50}{52}$ , ou approximativement de 524<sup>m</sup>,5.

XXIII. Un corps de pompe cylindrique, auquel on veut donner une hauteur de 90 centimètres, est terminé inférieurement par un tuyau d'aspiration cylindrique, dont le diamètre intérieur est 53 millimètres, et dont la hauteur est 4<sup>m</sup>,80 au-dessus du niveau de l'eau dans laquelle il plonge; quel diamètre devra-t-on donner à ce corps de pompe, pour que l'eau s'élève, au premier coup de piston, jusqu'au sommet du tuyau d'aspiration? — On supposera la pression atmosphérique égale à 10 mètres d'eau.

Solution. — Soit  $x$  le diamètre du corps de pompe : supposons qu'il satisfasse à la

condition exprimée dans l'énoncé; l'air qui, avant le premier coup de piston, occupait le volume du tuyau d'aspiration et avait une force élastique représentée par une colonne d'eau de 10 mètres, occupera, quand le piston sera en haut de sa course, le volume du corps de pompe, et aura une force élastique représentée par une colonne d'eau de  $10^m - 4^m,8$ . Si l'on exprime que le produit de chacun de ces volumes de l'air par la pression correspondante est constant (141), on a

$$(10 - 4,8) \frac{\pi x^2}{4} \times 90 = 10 \frac{\pi (5,5)^2}{4} \times 48^0;$$

d'où l'on tire, en supprimant les facteurs communs, et effectuant les calculs :

$$x = \sqrt{\frac{(5,5)^2 \times 480 \times 10}{(10 - 4,8) \times 90}} = 11^m,2.$$

**XXIV.** Une fontaine de compression (fig. 157), de forme cylindrique, ayant une base de 5 décimètres carrés et une hauteur de 50 centimètres, contient de l'eau jusqu'à la moitié de sa hauteur; on y adapte, pour y comprimer de l'air, une pompe à main dont le corps de pompe a une section de 12 centimètres carrés et une hauteur de 40 centimètres. On a donné 20 coups de piston; trouver : 1° à quelle hauteur l'eau s'élèverait dans un tube étroit, ouvert à sa partie supérieure, qu'on substituerait à la pompe; 2° quelle pression en kilogrammes on devrait exercer sur une soupape placée à la partie supérieure du cylindre et ayant une surface de 15 centimètres carrés, pour la maintenir fermée.

*Solution.* — 1° Le volume de la partie du cylindre qui est comprise au-dessus de l'eau et occupée par l'air est, en centimètres cubes,  $500 \times 25$  ou 12500. Le volume du corps de pompe de la pompe à main est, en centimètres cubes,  $12 \times 40$ , et puisqu'on a donné 20 coups de piston, on a introduit dans le cylindre une quantité d'air qui occuperait, sous la pression atmosphérique, un volume de  $12 \times 40 \times 20$  ou 9600 centimètres cubes. Cet air acquiert, dans le cylindre, une force élastique représentée par une hauteur H de mercure qui, évaluée en centimètres, est

$$H = 76 \times \frac{9600}{12500} = \frac{7296}{125}.$$

Cette force élastique s'ajoute, dans le cylindre, à la pression de l'air qui s'y trouvait d'abord (150), pression qui est égale à la pression atmosphérique; mais, quand on ouvre le robinet pour laisser l'eau s'élever dans le tube adapté à l'appareil, la pression atmosphérique s'exerce aussi sur la surface du liquide dans ce tube; on peut donc considérer la colonne d'eau comme faisant simplement équilibre à la force élastique de l'air introduit dans le cylindre par la pompe à main. De là résulte que la hauteur de cette colonne sera

$$\frac{7296}{125} \times 15,6 = 795^m,8, \text{ ou } 7^m,958.$$

2° Sur une soupape ayant une surface de 15 centimètres carrés, l'excès de la pression intérieure sur la pression extérieure est exprimé, en kilogrammes, par

$$79,58 \times 0,15 = 11^m,907.$$

Telle sera aussi la pression qu'on devra exercer sur la soupape, pour la maintenir fermée.

**XXV.** Sous le récipient d'une machine pneumatique contenant de l'air sec à 0° et à la pression de 760 millimètres, on place un fléau de balance dont les bras sont égaux, et aux deux extrémités duquel sont suspendus deux cubes : l'un a 5 centimètres de côté et pèse dans l'air 26<sup>gr</sup>,5240, et l'autre, qui a 5 centimètres de côté, pèse dans l'air 26<sup>gr</sup>,2597; par suite de cette inégalité de poids, le fléau n'est pas horizontal. On raréfie l'air dans l'appareil et on demande quelle sera la pression

sous le récipient quand l'horizontalité sera établie. — La température sera supposée égale à 0° pendant toute l'expérience.

*Solution.* — Soit  $x$  la pression cherchée. Pour obtenir le poids apparent du premier cube, au moment où l'horizontalité sera établie, il suffira de déterminer d'abord son poids dans le vide, et d'en retrancher le poids de l'air qu'il déplace sous le récipient: or, le poids spécifique de l'air par rapport à l'eau, à 0° et sous la pression de 760 millimètres, est 0,0015; le poids du premier cube dans le vide est donc 26<sup>gr</sup>,5240 + 3<sup>3</sup> × 0,0015; le poids de l'air qu'il déplace sous le récipient à la fin de l'expérience est 3<sup>3</sup> ×  $\frac{0,0015 \times x}{760}$ : son poids apparent sous le récipient est donc définitivement

$$26^{\text{gr}},5240 + 3^3 \times 0,0015 \left(1 - \frac{x}{760}\right).$$

De même, le poids apparent du second cube, sous le récipient, est

$$26^{\text{gr}},2597 + 3^3 \times 0,0015 \left(1 - \frac{x}{760}\right).$$

En égalant entre elles ces deux expressions, on trouve  $x = 376^{\text{mm}}$ .

## PROBLÈMES SUR LA CHALEUR

**XXVI.** Une sphère de platine, pesée dans le mercure, a perdu de son poids 50 grammes à 20°, et 49<sup>gr</sup>,5415 à 60°. On demande de trouver, d'après ces données, le coefficient de dilatation cubique du platine, sachant que la densité du mercure à zéro est 13,6 et que le coefficient de dilatation absolue de ce liquide est  $\frac{1}{5550}$ .

*Solution.* — Désignons par V le volume de la sphère de platine à zéro, et par  $\alpha$  le coefficient de dilatation cubique du métal; le poids du mercure à zéro que cette sphère déplace étant 50 grammes, on a

$$V \times 13,6 = 50.$$

À 60 degrés, le volume de la sphère est devenu  $V(1 + 60\alpha)$ ; d'autre part, la densité du mercure est devenue

$$\frac{13,6}{1 + 60 \times \frac{1}{5550}}, \text{ ou } \frac{13,6 \times 185}{187};$$

et comme la perte de poids est maintenant de 49<sup>gr</sup>,5415, il vient

$$V(1 + 60\alpha) \frac{13,6 \times 185}{187} = 49,5415.$$

En remplaçant, dans cette équation,  $V \times 13,6$  par 50, et tirant la valeur de  $\alpha$ , on aura

$$\alpha = \frac{49,5415 \times 187 - 50 \times 185}{50 \times 185 \times 60} = \frac{11,2605}{555000} = 0,00002569.$$

**XXVII.** Quel est le rapport des poids  $x$  et  $y$  de mercure et de platine qu'il faut introduire, à la température de zéro degré, dans un vase de fer, pour que, dans ce vase, la dilatation apparente soit nulle, de zéro à une température quelconque  $t$ , cette dernière température étant inférieure à 100 degrés? — Densité du mercure, 13,6. Densité du platine, 21. Coefficient de dilatation cubique de mercure, entre zéro et 100 degrés, 0,0001815. Coefficient de dilatation cubique du platine, 0,0000257. Coefficient de dilatation cubique du fer, 0,0000565.

condition exprimée dans l'énoncé; l'air qui, avant le premier coup de piston, occupait le volume du tuyau d'aspiration et avait une force élastique représentée par une colonne d'eau de 10 mètres, occupera, quand le piston sera en haut de sa course, le volume du corps de pompe, et aura une force élastique représentée par une colonne d'eau de  $10^m - 4^m,8$ . Si l'on exprime que le produit de chacun de ces volumes de l'air par la pression correspondante est constant (141), on a

$$(10 - 4,8) \frac{\pi x^2}{4} \times 90 = 10 \frac{\pi (5,5)^2}{4} \times 48^0;$$

d'où l'on tire, en supprimant les facteurs communs, et effectuant les calculs :

$$x = \sqrt{\frac{(5,5)^2 \times 480 \times 10}{(10 - 4,8) \times 90}} = 11^m,2.$$

**XXIV.** Une fontaine de compression (fig. 157), de forme cylindrique, ayant une base de 5 décimètres carrés et une hauteur de 50 centimètres, contient de l'eau jusqu'à la moitié de sa hauteur; on y adapte, pour y comprimer de l'air, une pompe à main dont le corps de pompe a une section de 12 centimètres carrés et une hauteur de 40 centimètres. On a donné 20 coups de piston; trouver : 1° à quelle hauteur l'eau s'élèverait dans un tube étroit, ouvert à sa partie supérieure, qu'on substituerait à la pompe; 2° quelle pression en kilogrammes on devrait exercer sur une soupape placée à la partie supérieure du cylindre et ayant une surface de 15 centimètres carrés, pour la maintenir fermée.

*Solution.* — 1° Le volume de la partie du cylindre qui est comprise au-dessus de l'eau et occupée par l'air est, en centimètres cubes,  $500 \times 25$  ou 12500. Le volume du corps de pompe de la pompe à main est, en centimètres cubes,  $12 \times 40$ , et puisqu'on a donné 20 coups de piston, on a introduit dans le cylindre une quantité d'air qui occuperait, sous la pression atmosphérique, un volume de  $12 \times 40 \times 20$  ou 9600 centimètres cubes. Cet air acquiert, dans le cylindre, une force élastique représentée par une hauteur H de mercure qui, évaluée en centimètres, est

$$H = 76 \times \frac{9600}{12500} = \frac{7296}{125}.$$

Cette force élastique s'ajoute, dans le cylindre, à la pression de l'air qui s'y trouvait d'abord (150), pression qui est égale à la pression atmosphérique; mais, quand on ouvre le robinet pour laisser l'eau s'élever dans le tube adapté à l'appareil, la pression atmosphérique s'exerce aussi sur la surface du liquide dans ce tube; on peut donc considérer la colonne d'eau comme faisant simplement équilibre à la force élastique de l'air introduit dans le cylindre par la pompe à main. De là résulte que la hauteur de cette colonne sera

$$\frac{7296}{125} \times 15,6 = 795^m,8, \text{ ou } 7^m,958.$$

2° Sur une soupape ayant une surface de 15 centimètres carrés, l'excès de la pression intérieure sur la pression extérieure est exprimé, en kilogrammes, par

$$79,58 \times 0,15 = 11^m,907.$$

Telle sera aussi la pression qu'on devra exercer sur la soupape, pour la maintenir fermée.

**XXV.** Sous le récipient d'une machine pneumatique contenant de l'air sec à 0° et à la pression de 760 millimètres, on place un fléau de balance dont les bras sont égaux, et aux deux extrémités duquel sont suspendus deux cubes : l'un a 5 centimètres de côté et pèse dans l'air 26<sup>gr</sup>,5240, et l'autre, qui a 5 centimètres de côté, pèse dans l'air 26<sup>gr</sup>,2597; par suite de cette inégalité de poids, le fléau n'est pas horizontal. On raréfie l'air dans l'appareil et on demande quelle sera la pression

sous le récipient quand l'horizontalité sera établie. — La température sera supposée égale à 0° pendant toute l'expérience.

*Solution.* — Soit  $x$  la pression cherchée. Pour obtenir le poids apparent du premier cube, au moment où l'horizontalité sera établie, il suffira de déterminer d'abord son poids dans le vide, et d'en retrancher le poids de l'air qu'il déplace sous le récipient: or, le poids spécifique de l'air par rapport à l'eau, à 0° et sous la pression de 760 millimètres, est 0,0015; le poids du premier cube dans le vide est donc 26<sup>gr</sup>,5240 + 3<sup>3</sup> × 0,0015; le poids de l'air qu'il déplace sous le récipient à la fin de l'expérience est 3<sup>3</sup> ×  $\frac{0,0015 \times x}{760}$ : son poids apparent sous le récipient est donc définitivement

$$26^{\text{gr}},5240 + 3^3 \times 0,0015 \left(1 - \frac{x}{760}\right).$$

De même, le poids apparent du second cube, sous le récipient, est

$$26^{\text{gr}},2597 + 3^3 \times 0,0015 \left(1 - \frac{x}{760}\right).$$

En égalant entre elles ces deux expressions, on trouve  $x = 376^{\text{mm}}$ .

## PROBLÈMES SUR LA CHALEUR

**XXVI.** Une sphère de platine, pesée dans le mercure, a perdu de son poids 50 grammes à 20°, et 49<sup>gr</sup>,5415 à 60°. On demande de trouver, d'après ces données, le coefficient de dilatation cubique du platine, sachant que la densité du mercure à zéro est 13,6 et que le coefficient de dilatation absolue de ce liquide est  $\frac{1}{5550}$ .

*Solution.* — Désignons par V le volume de la sphère de platine à zéro, et par  $\alpha$  le coefficient de dilatation cubique du métal; le poids du mercure à zéro que cette sphère déplace étant 50 grammes, on a

$$V \times 13,6 = 50.$$

À 60 degrés, le volume de la sphère est devenu  $V(1 + 60\alpha)$ ; d'autre part, la densité du mercure est devenue

$$\frac{13,6}{1 + 60 \times \frac{1}{5550}}, \text{ ou } \frac{13,6 \times 185}{187};$$

et comme la perte de poids est maintenant de 49<sup>gr</sup>,5415, il vient

$$V(1 + 60\alpha) \frac{13,6 \times 185}{187} = 49,5415.$$

En remplaçant, dans cette équation,  $V \times 13,6$  par 50, et tirant la valeur de  $\alpha$ , on aura

$$\alpha = \frac{49,5415 \times 187 - 50 \times 185}{50 \times 185 \times 60} = \frac{11,2605}{555000} = 0,00002569.$$

**XXVII.** Quel est le rapport des poids  $x$  et  $y$  de mercure et de platine qu'il faut introduire, à la température de zéro degré, dans un vase de fer, pour que, dans ce vase, la dilatation apparente soit nulle, de zéro à une température quelconque  $t$ , cette dernière température étant inférieure à 100 degrés? — Densité du mercure, 13,6. Densité du platine, 21. Coefficient de dilatation cubique de mercure, entre zéro et 100 degrés, 0,0001815. Coefficient de dilatation cubique du platine, 0,0000257. Coefficient de dilatation cubique du fer, 0,0000565.

*Solution.* — Le volume de mercure est  $\frac{x}{15,6}$ ; sa dilatation, de 0° à la température  $t$ , est donc  $\frac{x}{15,6} \times 0,0001815 t$ . De même, la dilatation du platine, de zéro degré à  $t$ , est  $\frac{y}{21} \times 0,000257 t$ . Enfin, le volume du vase de fer, occupé par le platine et le mercure, est égal à la somme  $\frac{x}{15,6} + \frac{y}{21}$ ; la dilatation de ce volume, de 0 degré à  $t$ , est donc  $\left(\frac{x}{15,6} + \frac{y}{21}\right) \times 0,000566 t$ . — La différence entre la somme des deux premières dilatations et la dernière devra être nulle; on a donc

$$\frac{x}{15,6} \times 0,0001815 t + \frac{y}{21} \times 0,000257 t - \left(\frac{x}{15,6} + \frac{y}{21}\right) \times 0,000566 t = 0.$$

Dans cette équation,  $t$  disparaît comme facteur commun, ainsi qu'on pouvait le prévoir et on tire finalement

$$\frac{x}{y} = 0,0187.$$

**XXVIII.** Un thermomètre est plongé, jusqu'au 20° degré de son échelle, dans un liquide chaud; le mercure s'élève dans la tige jusqu'au 150° degré. Cette indication ne donnant pas la température exacte du liquide, puisque la portion de la colonne mercurielle comprise entre les divisions 20 et 150 n'est pas plongée dans le bain, on demande de calculer la correction qu'elle devra subir, en supposant que la température de la portion extérieure de la colonne mercurielle soit égale à celle de l'atmosphère environnante, savoir 15 degrés; on prendra pour coefficient de dilatation apparente du mercure dans le verre le nombre  $\frac{1}{6480}$ .

*Solution.* — Désignons par  $x$  la température réelle du bain, c'est-à-dire celle que marquerait le thermomètre si toute la tige était plongée;  $x$  se compose évidemment de 150 degrés, plus la dilatation apparente qu'éprouvent 150 — 20 ou 110 divisions de mercure, lorsque leur température s'élève de 15 degrés à  $x$  degrés. Donc

$$x = 150 + 110(x - 15) \frac{1}{6480};$$

d'où l'on tire

$$657 x = 84075,$$

ou

$$x = 151^{\circ},99.$$

**XXIX.** Trouver quel rapport on doit établir entre la hauteur du mercure et la longueur de la tige, dans le pendule de Graham (fig. 204), pour que la compensation ait lieu. — On considérera le poids de la tige et celui du cylindre de verre comme négligeables par rapport au poids du mercure.

*Solution.* — Représentons par  $L_0$  la longueur à zéro de la tige du pendule, augmentée de la hauteur de l'étrier, et par  $h_0$  la hauteur du mercure à zéro qu'il faut introduire dans l'éprouvette, pour que la distance du point de suspension au centre de gravité du liquide soit la même à zéro et à une température déterminée  $t$ . L'expression de cette distance, où la longueur du pendule à zéro, est évidemment  $L_0 - \frac{h_0}{2}$ , en négligeant l'épaisseur du fond de l'éprouvette.

Soient  $l$  le coefficient de dilatation linéaire de l'acier,  $y$  la hauteur encore inconnue du mercure dans l'éprouvette, à la température de  $t$  degrés. La longueur du pendule à cette température sera  $L_0(1 + lt) - \frac{y}{2}$ ; pour qu'elle soit égale à la longueur à zéro, il faut et il suffit que l'on ait

$$(1) \quad L_0 - \frac{h_0}{2} = L_0(1 + lt) - \frac{y}{2}.$$

Cette équation renferme deux inconnues, savoir  $h_0$  et  $y$ ; nous allons chercher à exprimer la seconde en fonction de la première et des coefficients de dilatation du verre et du mercure. Soit  $r$  le rayon de la section intérieure de l'éprouvette à zéro;  $\pi r^2 h_0$  est le volume du mercure à cette température; il devient  $\pi r^2 h_0(1 + mt)$  à  $t$  degrés,  $m$  étant le coefficient de dilatation absolue du mercure. Soit  $\delta$  le coefficient de dilatation linéaire du verre; en passant de zéro à  $t$  degrés, le rayon  $r$  devient  $r(1 + \delta t)$ , et la section  $\pi r^2$  devient  $\pi r^2(1 + \delta t)^2$  ou  $\pi r^2(1 + 2\delta t + \delta^2 t^2)$ . On peut ici négliger  $\delta^2 t^2$  à côté de  $2\delta t$ , à cause de l'extrême petitesse de  $\delta$ , et prendre simplement  $\pi r^2(1 + 2\delta t)$  pour l'expression de la section intérieure de l'éprouvette à  $t$  degrés. Mais, à cette température, la hauteur du mercure est  $y$ ; le volume du liquide est donc  $\pi r^2(1 + 2\delta t)y$ . — Nous avons ainsi deux expressions du volume du mercure à  $t$  degrés; en les égalant, nous obtiendrons une équation qui permettra de déterminer  $y$ . Cette équation est

$$\pi r^2 h_0(1 + mt) = \pi r^2(1 + 2\delta t)y;$$

on en tire immédiatement

$$y = h_0 \frac{1 + mt}{1 + 2\delta t}.$$

En substituant cette valeur dans l'équation (1), on a :

$$L_0 - \frac{h_0}{2} = L_0(1 + lt) - \frac{h_0(1 + mt)}{2(1 + 2\delta t)}.$$

Si l'on chasse les dénominateurs, qu'on fasse toutes les réductions, et qu'on néglige tous les termes qui renferment le produit des deux coefficients de dilatation, on arrive à la relation bien plus simple :

$$\frac{h_0}{L_0} = \frac{2l}{m - 2\delta}.$$

Ce résultat est indépendant de la température particulière  $t$ , pour laquelle nous avons mis le problème en équation. Donc la compensation aura lieu pour toute température, pourvu que, à zéro, le rapport entre la hauteur du mercure et la longueur de la tige, augmentée de celle de l'étrier, soit égal à la fraction  $\frac{2l}{m - 2\delta}$ , fraction dont la valeur est environ  $\frac{4}{6}$ .

**XXX.** Quel doit être le rayon d'un ballon sphérique, formé d'un taffetas qui pèse 230 grammes le mètre carré, pour que, plein d'hydrogène sec à 20 degrés et à la pression de 750 millimètres, il ait une force ascensionnelle nulle, lorsqu'il se trouve dans l'air sec à la même température et à la même pression? — Poids du litre d'air sec à zéro et sous la pression de 760 millimètres, 1<sup>er</sup>, 295; densité de l'hydrogène par rapport à l'air, 0,0695.

*Solution.* — Désignons par  $r$  le rayon du ballon exprimé en mètres; la surface de l'enveloppe étant  $4\pi r^2$ , le poids de l'enveloppe en grammes sera  $230 \times 4\pi r^2$ . Le poids de l'hydrogène, en grammes, dans les conditions données par l'énoncé, sera, on remarquant que, dans les circonstances normales, un mètre cube d'air pèse 1295 grammes,

$$\frac{4}{3}\pi r^3 \times 1295 \times 0,0695 \times \frac{750}{760} \times \frac{1}{1 + 0,00567 \times 20}.$$

Enfin le poids de l'air déplacé sera, en grammes,

$$\frac{4}{3}\pi r^3 \times 1295 \times \frac{750}{760} \times \frac{1}{1 + 0,00567 \times 20}.$$

Si maintenant on exprime que la somme des poids de l'enveloppe et de l'hydrogène diminué du poids de l'air, donne un résultat nul, on obtient l'équation



$$250 - \frac{1}{5}r \times 1295 \times \frac{750}{760} \times \frac{1}{1,0754} (1 - 0,0695) = 0;$$

d'où l'on tirera  $r = 0^m,678$ .

XXXI. On a, dans deux éprouvettes, d'une part 4 centimètres cubes d'un gaz à 7 degrés sous la pression de 56 centimètres de mercure; d'autre part, 6 centimètres cubes d'un autre gaz à 17 degrés sous la pression de 58 centimètres. On introduit ces deux gaz dans une troisième éprouvette, où le mélange prend une température de 15 degrés. On demande à quelle hauteur le mercure s'élèvera dans l'éprouvette, dont la section est de 1 centimètre carré, et dont la hauteur au-dessus du mercure est de 21 centimètres. — Le baromètre marque 76 centimètres. — On prendra pour coefficient de dilatation des gaz  $\frac{1}{273}$ , et on négligera les dilatations du mercure et du verre.

Solution. — Si le premier gaz était ramené à zéro, son volume, 4 centimètres cubes, demeurant invariable, sa pression deviendrait  $\frac{56}{1 + \frac{7}{273}} = \frac{275 \times 56}{280} = \frac{275}{5}$ . — Le volume

du deuxième gaz, 6 centimètres cubes, demeurant constant, sa pression, si on le refroidissait à zéro, deviendrait  $\frac{58}{1 + \frac{17}{273}} = \frac{275 \times 58}{290} = \frac{275}{5}$ . — Les deux gaz, mélangés à

la température zéro, et sous la pression  $\frac{275}{5}$ , qui leur est commune, occuperaient un volume égal à la somme de leurs volumes respectifs, c'est-à-dire 10 centimètres cubes.

Soit  $x$  la hauteur à laquelle s'élève le mercure, dans l'éprouvette qui contient le mélange à une température de 15 degrés; le volume du mélange est  $21 - x$ , et la pression  $76 - x$ . D'après la formule de Gay-Lussac, on doit avoir

$$10 \times \frac{275}{5} = \frac{(21 - x)(76 - x)}{1 + \frac{15}{273}}$$

ou, en simplifiant,

$$(21 - x)(76 - x) = 576.$$

Cette équation a deux racines, l'une supérieure à 76, qui est inadmissible, et l'autre inférieure à 21. On doit donc prendre le signe — devant le radical : on trouve  $x = 12$  centimètres.

XXXII. Dans une cloche graduée en centimètres cubes, à 0 degré, pleine de mercure, et placée sur une cuvette à mercure, on a introduit  $0^m,75$  d'éther : la température de la cloche étant portée à 80 degrés, on constate que tout le liquide s'est réduit en vapeur et que le volume occupé par cette vapeur est  $566^m,48$ ; le mercure s'élève à une hauteur de  $152^m,16$ ; la pression barométrique, ramenée à 0 degré, est  $750^m$ . Quelle est, à cette température, la densité de la vapeur d'éther par rapport à l'air? — Le coefficient de dilatation du mercure est  $\frac{1}{5550}$ ; et le coefficient de dilatation cubique du verre est  $0,0000276$  (\*).

Solution. — La pression barométrique étant ramenée à 0°, ramenons de même à 0° la colonne de mercure qui s'élève dans la cloche, et dont la température est 80 degrés : la valeur de cette colonne deviendra

$$152^m,16 \times \frac{1}{1 + \frac{80}{5550}} = 150^m.$$

(\*) Cette méthode de détermination de la densité d'une vapeur, est connue sous le nom de méthode de Gay-Lussac.

Donc la force élastique de la vapeur d'éther, évaluée par la hauteur d'une colonne de mercure qui serait à 0 degré, est  $750^m - 150^m = 600$  millimètres. — Le volume de cette vapeur qui occupe, à 80 degrés, un nombre de divisions égal à  $566,48$ , est, en centimètres cubes,  $566,48 (1 + 0,0000276 \times 80)$ ; le poids du même volume d'air, dans les mêmes conditions de température et de pression, est

$$566,48 (1 + 0,0000276 \times 80) \times 0,0015 \times \frac{600}{760} \times \frac{1}{1 + 0,00567 \times 80}.$$

La densité de la vapeur par rapport à l'air est donc

$$\frac{0,75}{566,48 (1 + 0,0000276 \times 80) \times 0,0015 \times \frac{600}{760} \times (1 + 0,00567 \times 80)} = 2,575.$$

XXXIII. Un récipient est rempli d'oxygène liquide à la température de  $-150^{\circ}$ . On élève la température à  $+500^{\circ}$ . Calculer la pression à l'intérieur du récipient, en supposant que la loi de Mariotte soit applicable. — On négligera la dilatation du récipient. — La densité de l'oxygène gazeux par rapport à l'air est 1,10; la densité absolue de l'oxygène liquide à  $-150^{\circ}$  est 1,05.

Solution. — Soit  $V$  le volume du récipient, exprimé en centimètres cubes. La masse de l'oxygène liquide qui le remplit est  $V \times 1^m,05$ .

Soit  $x$  la pression de l'oxygène gazeux à la température de  $500^{\circ}$ , cette pression étant évaluée en atmosphères. La masse de un centimètre cube d'oxygène, à 0°, sous la pression d'une atmosphère, est  $0,0015 \times 1,10 = 0^m,00165$ ; à  $500^{\circ}$ , et sous la pression  $x$ ,

la masse de  $V$  centimètres cubes est  $V \times \frac{0,00165 \times x}{1 + \frac{500}{273}}$ .

On a donc :

$$1,05 = \frac{0,00165 \times 273 \times x}{775},$$

d'où on tire  $x = 2081$  atmosphères.

Il serait facile d'évaluer en kilogrammes la pression supportée par chaque centimètre carré de la paroi du récipient. On sait, en effet, que la pression d'une atmosphère est de  $1^m,033$  par centimètre carré.

XXXIV. Un espace de 1 mètre cube de capacité, entretenu à la température de 20 degrés, renferme de l'air humide dont l'état hygrométrique est  $\frac{5}{4}$ . La température venant à s'abaisser jusqu'à zéro, on demande de trouver le poids de la vapeur qui devra se liquéfier. — On prendra pour poids du mètre cube d'air, dans les conditions normales de température et de pression,  $1^m,295$ ; pour densité de la vapeur, 0,622; on sait, d'ailleurs, que la tension maximum de la vapeur est, à 20 degrés, de  $17^m,591$ ; à zéro, de  $4^m,6$ .

Solution. — Le poids de la vapeur qui devra se liquéfier s'obtiendra en retranchant du poids de la vapeur contenue à 20 degrés dans l'espace donné, le poids de la vapeur que ce même espace contient à zéro quand il est saturé. — Or, à 20 degrés, l'état hygrométrique étant  $\frac{5}{4}$ , la force élastique de la vapeur est  $\frac{5}{4} \times 17^m,591$ , c'est-à-dire  $15^m,01525$ ; le poids de cette vapeur est donc

$$1^m,295 \times \frac{1}{1 + 0,00567 \times 20} \times \frac{15,01525}{760} \times 0,622;$$

d'autre part, le poids de la vapeur contenue dans 1 mètre cube d'air saturé à zéro est

$$1^m,295 \times \frac{4,6}{760} \times 0,622;$$

en retranchant l'une de l'autre ces deux quantités, et ayant égard aux facteurs communs, on trouve, pour le poids cherché,

$$\frac{1^{\text{re}},295 \times 0,622}{760} \left( \frac{15,01525}{1,0754} - 4,6 \right),$$

expression qui se réduit à

$$\frac{1^{\text{re}},295 \times 0,622 \times 8,10561}{760 \times 1,0754}.$$

En calculant cette expression par logarithmes, on trouve que le poids de la vapeur qui devra se liquéfier à zéro est de  $0^{\text{re}},007991$ , ou de  $7^{\text{e}},991$ .

**XXXV.** A la température de 20 degrés et sous la pression de 760 millimètres, on a introduit, dans un récipient, de l'air sec et du gaz hydrogène saturé d'humidité. On a fait passer ensuite une portion de ce mélange dans l'eudiomètre à eau, où elle s'est saturée de vapeur; l'analyse a montré que cette portion renfermait des volumes égaux d'air et d'hydrogène. Trouver, d'après ce résultat, quelle était la force élastique de la vapeur dans le récipient. — On supposera que l'analyse eudiométrique ait été faite sous la pression barométrique de 760 millimètres et à la température de 20 degrés; on prendra  $17^{\text{mm}},4$  pour la tension maximum de la vapeur à cette température.

*Solution.* — Désignons par  $V$  le volume qu'occuperait, sous la pression de 760 millimètres, l'air sec contenu dans le récipient, et par  $V'$  le volume qu'occuperait l'hydrogène saturé, sous la même pression;  $V + V'$  représentera la capacité du récipient. Soit  $f$  la tension de la vapeur renfermée dans cette capacité; si, du volume  $V + V'$  sous lequel sa tension est  $f$ , on réduisait la vapeur au volume  $V$ , elle atteindrait son point de saturation; sa tension serait alors  $17^{\text{mm}},4$ . Or on a, d'après la loi de Mariotte,

$$(1) \frac{f}{17^{\text{mm}},4} = \frac{V'}{V + V'};$$

cherchons donc, d'après les données de l'analyse, à déterminer  $\frac{V'}{V + V'}$ ; il sera facile d'en déduire  $f$ .

Soit 1 le volume du mélange saturé, dans l'eudiomètre; la tension de la vapeur étant de  $17^{\text{mm}},4$ , on peut regarder ce mélange comme contenant le volume 1 de gaz sec, sous la pression de  $760^{\text{mm}} - 17^{\text{mm}},4$ ; sous la pression de 760 millimètres, ce volume deviendrait  $\frac{760 - 17,4}{760}$ ; et si l'on en prend la moitié, on aura, pour la pression de 760 millimètres, le volume d'air, supposé sec, que contient l'eudiomètre. En résumé, on peut dire que, dans l'eudiomètre et sous la pression de 760 millimètres,

$$\text{Le volume de l'air sec était} \dots \dots \dots \frac{1}{2} \frac{760 - 17,4}{760},$$

$$\text{Le volume de l'hydrogène saturé était} \dots \dots \dots \frac{1}{2}.$$

Le rapport de ces deux quantités est évidemment égal à  $\frac{V'}{V}$ ; donc :

$$\frac{V'}{V} = \frac{760 - 17,4}{760};$$

d'où l'on déduit :

$$\frac{V'}{V + V'} \text{ ou } \frac{f}{17^{\text{mm}},4} = \frac{760}{760 \times 2 - 17,4},$$

et enfin

$$f = 17^{\text{mm}},4 \times \frac{760}{760 \times 2 - 17,4} = 8^{\text{mm}},50.$$

**XXXVI** L'enveloppe d'un ballon de baudruche pèse 200 grammes: la pression atmo-

sphérique étant de 760 millimètres, et la température de 20 degrés, on a introduit dans ce ballon 500 litres d'hydrogène saturé de vapeur d'eau, à la même température et sous la même pression. Quelle est la force ascensionnelle de ce ballon, en supposant que la fraction de saturation de l'air extérieur soit  $\frac{1}{2}$ ? — Densité de l'hydrogène par rapport à l'air, 0,069; densité de la vapeur d'eau par rapport à l'air, 0,622. Force élastique maximum de la vapeur d'eau à 20 degrés,  $17^{\text{mm}},4$ .

*Solution.* — La force élastique maximum de la vapeur d'eau à 20 degrés étant  $17^{\text{mm}},4$  et l'hydrogène étant saturé de vapeur, la force élastique du gaz, supposé sec, est  $760 - 17,4 = 742^{\text{mm}},6$ : donc, en observant que le poids d'un litre d'air, à 0 degré et sous la pression de 760 millimètres, est  $1^{\text{re}},295$ , on a pour le poids de l'hydrogène sec,

$$1^{\text{re}},295 \times 0,069 \times 500 \times \frac{742,6}{760} \times \frac{1}{1 + 0,00567 \times 20},$$

en prenant pour coefficient de dilatation du gaz le nombre 0,00567. De même, le poids de la vapeur d'eau qui sature le gaz, et dont la pression est  $17^{\text{mm}},4$ , est

$$1^{\text{re}},295 \times 0,622 \times 500 \times \frac{17,4}{760} \times \frac{1}{1 + 0,00567 \times 20}.$$

La somme de ces deux poids et du poids de l'enveloppe donnera le poids total du ballon.

Pour obtenir le poids de l'air déplacé, on remarquera que, la fraction de saturation de l'air extérieur étant  $\frac{1}{2}$ , la tension de la vapeur d'eau est  $\frac{17^{\text{mm}},4}{2}$  ou  $8^{\text{mm}},7$ ; la force élastique de l'air lui-même est donc  $760 - 8,7 = 751^{\text{mm}},3$ . De là résulte que le poids de l'air déplacé, supposé sec, est

$$1^{\text{re}},295 \times 500 \times \frac{751,3}{760} \times \frac{1}{1 + 0,00567 \times 20}.$$

De même, le poids de la vapeur d'eau contenue dans l'air déplacé sera

$$1^{\text{re}},295 \times 0,622 \times 500 \times \frac{8,7}{760} \times \frac{1}{1 + 0,00567 \times 20}.$$

La somme de ces deux poids donnera la poussée éprouvée par le ballon dans l'air.

En retranchant maintenant le poids total du ballon de la poussée qu'il éprouve, on obtiendra la valeur de la force ascensionnelle. On trouvera :

$$550^{\text{e}},542.$$

**XXXVII.** Une masse d'air qui occupe 50 mètres cubes, à la température de 5 degrés, et dont la fraction de saturation est 0,572, se mélange à une autre masse d'air dont le volume est 75 mètres cubes, la température 15 degrés, et la fraction de saturation 0,180; le volume du mélange est 125 mètres cubes, et sa température est 11 degrés. Quelle sera la fraction de saturation du mélange? — Les valeurs de la force élastique maximum de la vapeur d'eau à 5 degrés, 15 degrés, 11 degrés, sont respectivement  $6^{\text{mm}},55$ ;  $12^{\text{mm}},70$ ;  $9^{\text{mm}},79$ .

*Solution.* — Dans la première masse d'air, avant le mélange, la force élastique de la vapeur d'eau est, d'après les conditions de l'énoncé,  $6,55 \times 0,572$ . Donc, lorsque le mélange sera effectué, c'est-à-dire lorsque cette vapeur se sera échauffée de 5 degrés à 11 degrés, et qu'elle aura acquis, au lieu du volume de 50 mètres cubes, un volume de 125 mètres cubes, sa force élastique sera

$$6,55 \times 0,572 \left[ 1 + 0,00567 (11 - 5) \right] \frac{50}{125} = 1^{\text{mm}},527.$$

De même la force élastique de la vapeur contenue dans la seconde masse d'air deviendra, lorsque le mélange sera effectué,

$$12,7 \times 0,48 \left[ 1 + 0,00567 (15 - 11) \right] \frac{75}{125} = 5^{\text{mm}},711.$$

En faisant la somme de ces deux forces élastiques, on obtient la force élastique totale de la vapeur d'eau dans le mélange, savoir :  $5^{\text{mm}},258$ . Puisque la force élastique maximum à cette température est  $9^{\text{mm}},79$ , la fraction de saturation est

$$\frac{5,258}{9,79} = 0,535.$$

**XXXVIII.** Quelle est la masse de la quantité de mercure, qui, dans l'air, pèse  $575^{\text{gr}},485$ ? — La densité du mercure est 15,596; la densité du laiton des poids marqués est 8,3; le coefficient de dilatation cubique du laiton est 0,00051; le coefficient de dilatation absolue du mercure est 0,000180. La hauteur barométrique est 764 millimètres; la température est 10 degrés; la tension maximum correspondante est  $9^{\text{mm}},17$ ; enfin l'état hygrométrique actuel est 0,8.

*Solution.* — Désignons par  $a$  la masse du centimètre cube d'air, dans les circonstances actuelles, par  $D$  la densité du mercure à la température actuelle, par  $\Delta$  celle des poids marqués, nous avons vu (159) que la masse exacte du mercure est :

$$x = 575,485 \frac{1 + \frac{a}{D}}{1 + \frac{a}{\Delta}}$$

Il suffira de remplacer  $a$ ,  $D$  et  $\Delta$  par leurs valeurs, qui sont :

$$a = \frac{0,001275}{1 + \frac{10}{275}} \times \frac{764 - \frac{5}{8} \times 0,8 \times 9,17}{760}, \quad D = \frac{15,596}{1 + 10 \times 0,000180},$$

$$\Delta = \frac{8,3}{1 + 10 \times 0,00051}.$$

**XXXIX.** La terre étant couverte d'une couche de neige à zéro, de 2 centimètres d'épaisseur, quelle est l'épaisseur de la couche de pluie tombant à  $12^{\circ},5$  qui serait nécessaire pour en déterminer la fusion? — Densité de la neige par rapport à l'eau de pluie, 0,78; chaleur de fusion de la neige, 79,25.

*Solution.* — Si la densité de la neige était égale à celle de l'eau, une couche de neige de 1 centimètre d'épaisseur exigerait, pour se fondre, une couche de pluie à 1 degré ayant  $79^{\text{cal}},25$  d'épaisseur; donc 2 centimètres de neige exigeraient  $79^{\text{cal}},25 \times 2$  de pluie à 1 degré, ou  $\frac{79^{\text{cal}},25 \times 2}{12,5}$  de pluie à  $12^{\circ},5$ . Mais la neige ne pesant, à volume égal, que les 0,78 de ce que pèse la pluie, on voit en définitive que, pour fondre la même couche, il suffira d'une quantité de pluie à  $12^{\circ},5$  représentée par

$$0,78 \times \frac{79^{\text{cal}},25 \times 2}{12,5} = 9^{\text{cal}},89.$$

**XL.** Une couche de neige à zéro, de 1 centimètre d'épaisseur, étant donnée, combien devra-t-elle recevoir de chaleur du soleil, par mètre carré de superficie, pour se répandre dans l'air sous forme de vapeur saturante à 10 degrés? — Densité de la neige, 0,78; chaleur de vaporisation à 10 degrés, 600.

*Solution.* — Une couche de neige de 1 centimètre d'épaisseur et de 1 mètre carré de superficie, ayant pour densité 0,78, pèse 7,8 : pour la fondre à zéro, il faut lui donner  $79^{\text{cal}},25 \times 7,8$ . Pour échauffer, de zéro à 10 degrés, l'eau provenant de la fusion, il faut  $10^{\text{cal}} \times 7,8$ ; enfin, pour convertir cette eau en vapeur, il faut encore

$600^{\text{cal}} \times 7,8$ . En ajoutant ces trois nombres, on obtient la quantité de chaleur demandée, savoir :

$$(79,25 + 10 + 600) 7,8 \text{ ou } 567^{\text{cal}},15.$$

**XLI.** On verse 600 grammes d'un liquide dont la température est 85 degrés, dans une masse d'eau pesant 5 kilogrammes, et dont la température est 8 degrés; cette eau est contenue dans un calorimètre en laiton, du poids de 500 grammes. On trouve que la température finale du mélange est 15 degrés. — On sait d'ailleurs, par des expériences préliminaires, qu'il s'est perdu 5 calories par rayonnement ou par conductibilité, pendant la durée de l'expérience; la chaleur spécifique du laiton est 0,1. — On demande de calculer la chaleur spécifique du liquide?

*Solution.* — En se refroidissant de 85 à 15 degrés, le liquide soumis à l'expérience a abandonné  $600 \times c \times 70$  calories, en désignant par  $c$  la chaleur spécifique cherchée. La capacité calorifique de l'enveloppe du calorimètre est  $500 \times 0,1 = 50$ , et la capacité calorifique du calorimètre tout entier est 5050; en s'échauffant de 8 à 15 degrés, le calorimètre a donc absorbé  $5050 \times 7 = 21210$  calories. — La quantité de chaleur abandonnée par le liquide est égale à la somme de la quantité de chaleur absorbée par le calorimètre et de la quantité de chaleur perdue par rayonnement ou conductibilité; on a donc :

$$600 \times c \times 70 = 21210 + 5,$$

d'où l'on tire

$$c = 0,305.$$

**XLII.** Dans un vase plat, large et horizontal, on répand 500 grammes d'eau à 100 degrés. Il s'en dégage 50 grammes par évaporation subite: que devient la température de cette eau? — La chaleur de vaporisation de l'eau est de 557 calories.

*Solution.* — En se vaporisant, les 50 grammes d'eau ont absorbé  $50 \times 557 = 16110$  calories, et cette quantité de chaleur a été cédée par les 470 grammes d'eau qui sont demeurés à l'état liquide; ils se sont ainsi refroidis de  $\frac{16110}{470} = 54^{\circ},5$ . La température devient donc  $100 - 54,5 = 65^{\circ},7$ .

**XLIII.** Sur une plaque de liège, enduite de noir de fumée et disposée sur la platine d'une machine pneumatique, au-dessus d'une cuvette contenant de l'acide sulfurique (fig. 224), on a placé une masse d'eau pesant 10 grammes, à la température de 15 degrés; on a recouvert d'une cloche de verre, et on a fait le vide. Au bout d'un certain temps, il reste sur la plaque un résidu de glace à 0 degré. Quelle est la masse de cette glace? — La chaleur de vaporisation de l'eau, à basse température, est 600 calories; la chaleur de fusion de la glace est 80 calories. On négligera les pertes de chaleur par rayonnement ou par conductibilité.

*Solution.* — Soit  $x$  la masse de glace obtenue; l'évaporation de  $(10 - x)$  grammes d'eau a absorbé  $(10 - x) 600$  calories. D'autre part, le refroidissement de 15 à 0 degré et la solidification de l'eau ont dégagé, pour chaque gramme d'eau,  $15 + 80 = 95$  calories; le refroidissement et la solidification de  $x$  grammes d'eau correspondent donc à un dégagement de  $x \times 95$  calories. On a donc

$$x \times 95 = (10 - x) 600,$$

d'où

$$x = 8^{\text{gr}},655.$$

## PROBLÈMES SUR L'ÉLECTRICITÉ

**XLIV.** Deux sphères métalliques, dont les rayons sont respectivement 1 centimètre et 2 centimètres, ont été électrisées, puis mises en communication par un fil métallique long et fin. Cette communication étant interrompue et les centres des deux

sphères étant à une distance de 10 centimètres, la répulsion mutuelle des deux sphères est de 18 dynes. — Trouver le potentiel et les charges des deux sphères.

*Solution.* — Soit  $x$  la valeur du potentiel cherché; la charge de la sphère de rayon 1 est  $x$ ; celle de la sphère de rayon 2 est  $2x$ ; et l'on a, d'après la loi de Coulomb,

$$\frac{2x^2}{100} = 18, \quad \text{d'où} \quad x = 50.$$

Le potentiel est donc égal à 50; les charges des deux sphères sont respectivement 50 et 60.

**XLV.** Un courant fourni par une pile de 10 éléments Daniell passe dans un voltamètre, et dans un appareil à galvanoplastie. Dans le voltamètre, il se dégage 9 centimètres cubes de gaz par minute. On demande :

1° Quelle sera la masse de cuivre déposée dans la cuve à galvanoplastie, au bout d'une heure;

2° Quelle sera, pendant ce temps, la masse de zinc brûlée dans la pile tout entière;

3° Quelle est l'intensité du courant, évaluée en ampères;

4° Quelle est la résistance totale du circuit, évaluée en ohms.

Un courant de 1 ampère électrolyse  $0^{\text{m}},095$  d'eau par seconde; la force électromotrice d'un élément Daniell est de  $1^{\text{m}},08$ . — La masse spécifique de l'air est  $0^{\text{m}},001295$ ; la densité de l'hydrogène est 0,069. — Les équivalents du cuivre et du zinc sont respectivement 32 et 55.

*Solution.* — 1° Si dans le voltamètre il se dégage 9 centimètres cubes de gaz par minute, le volume d'hydrogène électrolysé pendant ce temps est de 6 centimètres cubes; et sa masse est  $6 \times 0,001295 \times 0,069 = 0^{\text{m}},000553$ . En une heure, le courant électrolyse donc une quantité d'hydrogène 60 fois plus grande, c'est-à-dire  $0^{\text{m}},0521$ . — Or, d'après les lois de Faraday, les masses d'hydrogène et de cuivre électrolysées, pendant le même temps et par le même courant, sont entre elles comme les équivalents chimiques 1 et 52. La masse de cuivre déposée au bout d'une heure dans l'appareil à galvanoplastie est donc de  $52 \times 0,0521 = 1^{\text{m}},027$ .

2° D'autre part, au dégagement de 1 gramme d'hydrogène, correspond la dissolution de 55 grammes de zinc dans chacun des éléments de pile: la masse de zinc brûlée, en une heure, dans toute la pile, est donc de  $10 \times 55 \times 0,0521 = 10^{\text{m}},395$ .

3° En multipliant par 9 le nombre 0,000553, qui représente la masse d'hydrogène dégagée par le courant pendant une minute, on obtient la quantité d'eau décomposée par le courant pendant le même temps; et le quotient du produit obtenu par le nombre 60, représente la masse d'eau décomposée en une seconde; ce nombre, exprimé en milligrammes, est  $0^{\text{m}},08025$ . L'intensité du courant, évaluée en ampères, est donc de

$$\frac{0,08025}{0,095} = 0^{\text{m}},865.$$

4° Pour calculer la résistance totale du circuit, nous remarquerons que l'on a, en général,  $i = \frac{E}{R}$ . En désignant par  $i$ ,  $E$  et  $R$  l'intensité du courant évaluée en ampères, la force électromotrice de la pile qui le produit, évaluée en volts, et la résistance totale du circuit, évaluée en ohms. Nous connaissons  $i = 0^{\text{m}},865$ ; la force électromotrice de chaque élément Daniell étant de  $1^{\text{m}},08$ , celle de la pile entière est  $10^{\text{m}},8$ ; on a donc, pour la résistance du circuit,

$$R = \frac{10,8}{0,865} = 12^{\text{m}},5.$$

## PROBLÈMES SUR L'ACOUSTIQUE

**XLVI.** Les plateaux d'une sirène portent chacun 25 trous; le plateau supérieur fait 2519 tours en deux minutes. Quelle est la note donnée par la sirène, sachant que le  $la_2$  correspond à 455 vibrations doubles par seconde? — Quelle est la longueur du tuyau ouvert, dont le son fondamental est à l'unisson avec celui de la sirène?

*Solution.* — Le nombre des vibrations effectuées en deux minutes est  $2519 \times 25$ ; en divisant ce nombre par 120, on obtient le nombre de vibrations effectuées en une seconde, qui caractérise la note donnée par la sirène: on trouve 489,575. L'intervalle de cette note au  $la$  normal est mesuré par la fraction  $\frac{489,575}{455} = 1,125 = \frac{9}{8}$ . La note est donc un  $ton$  au-dessus du  $la_2$ ; c'est un  $si_2$ .

La longueur d'onde  $\lambda$ , correspondante à cette note, s'obtient en faisant le quotient de la vitesse du son  $340^{\text{m}}$ , par le nombre de vibrations en une seconde (676); on a  $\lambda = \frac{340}{489,575}$ . Mais quand un tuyau ouvert donne le son fondamental, la longueur de l'onde sonore est le double de la longueur du tuyau (700). La longueur du tuyau, dont le son fondamental est le  $si_2$ , est donc:  $\frac{340}{2 \times 489,575} = 0^{\text{m}},347$ .

**XLVII.** La densité du platine étant prise égale à 22 et celle du fer à 7,8, on demande quel rapport il doit y avoir entre les longueurs de deux cordes, l'une en platine, l'autre en fer, et toutes les deux de même section, pour qu'elles soient à l'unisson quand on les tend également.

*Solution.* — Le nombre de vibrations que rend la première corde peut être représenté par  $\frac{K}{\sqrt{22}}$ ; le nombre de vibrations que rend la seconde par  $\frac{K}{\sqrt{7,8}}$ . Dans ces deux expressions, la constante  $K$  est la même. Exprimons que ces deux quantités sont égales: il vient

$$\frac{l}{l'} = \sqrt{\frac{7,8}{22}} = \frac{\sqrt{7,8 \times 22}}{22}.$$

On trouve pour valeur approchée de ce rapport 0,5951.

**XLVIII.** Une corde tendue par un poids  $P$  est à l'unisson d'un tuyau ouvert donnant le son fondamental. — 1° Quel doit être le poids tenseur  $P$ , pour que le son de la corde soit à l'octave aiguë du son fondamental du tuyau? — 2° Quel doit être le poids tenseur  $P'$  pour que le son de la corde soit à la quinte de l'octave aiguë du son fondamental du tuyau? — 3° Pourrait-on faire rendre au tuyau les trois sons que donne la corde, tendue successivement par les poids  $P$ ,  $P'$  et  $P''$ ?

*Solution.* — Soient  $n$ ,  $n'$  et  $n''$  les nombres de vibrations effectuées en une seconde par la corde tendue successivement par les poids  $P$ ,  $P'$  et  $P''$ . D'après les lois des vibrations des cordes, on a:

$$\frac{n}{\sqrt{P}} = \frac{n'}{\sqrt{P'}} = \frac{n''}{\sqrt{P''}}.$$

D'autre part, d'après l'énoncé, ces trois nombres de vibrations sont entre eux comme 1, 2 et 5, c'est-à-dire qu'on a

$$\frac{n}{1} = \frac{n'}{2} = \frac{n''}{5};$$

par conséquent,

$$P' = 4P, \quad \text{et} \quad P'' = 9P.$$

Les trois sons que rend successivement la corde sont le son fondamental et les deux

premiers harmoniques du tuyau ouvert (700) : ces harmoniques peuvent s'obtenir en réglant convenablement la pression de la soufflerie.

## PROBLÈMES SUR L'OPTIQUE

**XLIX.** Deux sources lumineuses S et S', dont les intensités propres sont I et I', ont été placées à une distance d l'une de l'autre. En quel point faut-il placer un écran en ligne droite avec les deux sources, pour qu'il reçoive autant de lumière de l'une que de l'autre? — Application : I = 11, d = 5 mètres.

*Solution.* — Représentons par x la distance de l'écran à la source S, que nous supposons de plus faible intensité que S'. Si l'écran est placé entre les deux sources, sa distance à la source S' est (d - x); et on doit avoir

$$\frac{1}{x^2} = \frac{I'}{(d-x)^2}$$

d'où l'on tire

$$x = \frac{d}{1 + \sqrt{\frac{I'}{I}}} = \frac{5}{1 + \sqrt{11}} = 1 \text{ mètre.}$$

Mais l'écran peut aussi être placé en dehors des deux sources, du côté de la source la moins intense. Soit alors y la distance de S à l'écran; la distance de l'écran à S' est d + y, et l'on a

$$\frac{1}{y^2} = \frac{I'}{(d+y)^2}$$

d'où

$$y = \frac{d}{\sqrt{\frac{I'}{I}} - 1} = \frac{5}{\sqrt{11} - 1} = 3 \text{ mètres.}$$

**L.** Deux miroirs plans AB et CD (fig. 706), inclinés l'un sur l'autre, ont leurs faces réfléchissantes en regard; un rayon lumineux SI se réfléchit d'abord sur AB, suivant IH; puis sur CD, suivant HR. Démontrer que l'angle  $\delta$ , formé par la direction du rayon incident avec celle du rayon deux fois réfléchi, est toujours double de l'angle  $\alpha$  des deux miroirs.

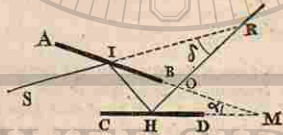


Fig. 706.

*Solution.* — Les triangles IOR et HOM ont leurs angles en O égaux comme opposés par le sommet; donc :

$$\text{OIR} + \delta = \text{OHM} + \alpha.$$

Mais OHM est égal à IHC, à cause de la réflexion sur le miroir CD; IHC est égal à la somme des angles intérieurs  $\alpha$  et HIM; enfin ce dernier angle, à cause de la réflexion sur le miroir AB, est égal à SIA, qui lui-même est égal à OIR. On voit donc que

$$\text{OHM} = \alpha + \text{OIR};$$

en ajoutant membre à membre ces deux égalités, et supprimant les parties communes, il vient enfin

$$\delta = 2\alpha.$$

**LI.** Devant un miroir sphérique concave, de 2 mètres de rayon, on place une flèche lumineuse de 1 décimètre de longueur, perpendiculairement à l'axe principal et à 3 mètres du miroir. Où se forme l'image, et quelle en est la grandeur?

On met ensuite un petit miroir plan au foyer principal du miroir sphérique, incliné de 45 degrés sur l'axe principal, et la face réfléchissante tournée vers ce miroir. Quelle image formeront les rayons réfléchis par le grand miroir sphérique, en tombant sur le petit miroir plan? Quelles en seront la grandeur et la situation? Où placer un écran pour la recevoir, ou bien une loupe pour l'observer et pour l'agrandir?

*Solution.* — En appliquant la formule générale (1) qui a été donnée (759), on trouve que l'image se forme à 1<sup>m</sup>,25 du miroir, ou à 0<sup>m</sup>,25 du foyer principal. D'autre part, la grandeur de l'image s'obtiendra à l'aide de la proportion (759)

$$\frac{i}{0,1} = \frac{1,25}{3}$$

La grandeur de l'image est donc de

$$0^m,025.$$

Plaçons maintenant le petit miroir plan au foyer F. L'image, au lieu de se former dans une position perpendiculaire à l'axe principal du miroir sphérique, à 0<sup>m</sup>,25 au delà du foyer, sera renvoyée, par le miroir plan, dans une position symétrique de la première par rapport à ce miroir. Au point F, menons la perpendiculaire à l'axe du miroir sphérique; l'image se trouvera à 0<sup>m</sup>,25 du point F, sur cette perpendiculaire; elle sera parallèle à l'axe, et sa grandeur sera toujours 0<sup>m</sup>,025.

Pour la recevoir sur un écran, il suffit de placer cet écran à l'endroit où cette image est renvoyée par le miroir plan, c'est-à-dire parallèlement à l'axe du miroir sphérique, à 0<sup>m</sup>,25 du foyer F.

Pour la grossir avec une loupe, il faut disposer cette loupe de façon que l'image soit placée entre la lentille et son foyer principal; cette dernière opération est facile, dès que l'on a déterminé la position de l'image renvoyée par le miroir plan.

**LII.** Deux miroirs concaves MN et MN' (fig. 707), dont les rayons sont respectivement de 1 mètre et de 1<sup>m</sup>,50, sont disposés en regard l'un de l'autre, de manière que leurs axes coïncident. La distance OO' est de 3 mètres. En quel point de l'axe commun devra-t-on placer un objet lumineux, pour que les images réelles de cet objet données par les deux miroirs soient égales?

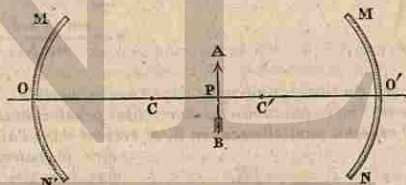


Fig. 707.

*Solution.* — Il est facile de voir que l'égalité des deux images réelles ne peut être obtenue, dans les conditions du problème, que si l'objet est placé dans l'intervalle des deux centres C et C'. La longueur de l'image donnée par le miroir O, à une distance p<sub>1</sub> du point O, est alors déterminée par les deux équations (759)

$$\frac{i}{AB} = \frac{p_1}{OP}, \quad \frac{1}{OP} + \frac{1}{p_1} = \frac{2}{CO},$$

d'où l'on déduit

$$i = AB \times \frac{OC}{2 \times OP - OC} = AB \frac{OC}{PO + PC}.$$

Quant à la longueur de l'image donnée par le miroir O', on trouverait de même

$$AB \frac{O'C'}{PO + PC'}$$

Pour que les deux images soient égales, il suffit qu'on ait

$$\frac{OC}{PO + PC} = \frac{O'C'}{PO + PC'}$$

premiers harmoniques du tuyau ouvert (700) : ces harmoniques peuvent s'obtenir en réglant convenablement la pression de la soufflerie.

## PROBLÈMES SUR L'OPTIQUE

**XLIX.** Deux sources lumineuses S et S', dont les intensités propres sont I et I', ont été placées à une distance d l'une de l'autre. En quel point faut-il placer un écran en ligne droite avec les deux sources, pour qu'il reçoive autant de lumière de l'une que de l'autre? — Application : I = 11, d = 5 mètres.

*Solution.* — Représentons par x la distance de l'écran à la source S, que nous supposons de plus faible intensité que S'. Si l'écran est placé entre les deux sources, sa distance à la source S' est (d - x); et on doit avoir

$$\frac{1}{x^2} = \frac{I'}{(d-x)^2}$$

d'où l'on tire

$$x = \frac{d}{1 + \sqrt{\frac{I'}{I}}} = \frac{5}{1 + \sqrt{11}} = 1 \text{ mètre.}$$

Mais l'écran peut aussi être placé en dehors des deux sources, du côté de la source la moins intense. Soit alors y la distance de S à l'écran; la distance de l'écran à S' est d + y, et l'on a

$$\frac{1}{y^2} = \frac{I'}{(d+y)^2}$$

d'où

$$y = \frac{d}{\sqrt{\frac{I'}{I}} - 1} = \frac{5}{\sqrt{11} - 1} = 3 \text{ mètres.}$$

**L.** Deux miroirs plans AB et CD (fig. 706), inclinés l'un sur l'autre, ont leurs faces réfléchissantes en regard; un rayon lumineux SI se réfléchit d'abord sur AB, suivant IH; puis sur CD, suivant HR. Démontrer que l'angle  $\delta$ , formé par la direction du rayon incident avec celle du rayon deux fois réfléchi, est toujours double de l'angle  $\alpha$  des deux miroirs.

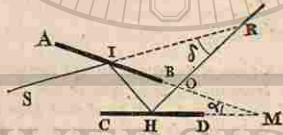


Fig. 706.

*Solution.* — Les triangles IOR et HOM ont leurs angles en O égaux comme opposés par le sommet; donc :

$$\text{OIR} + \delta = \text{OHM} + \alpha.$$

Mais OHM est égal à IHC, à cause de la réflexion sur le miroir CD; IHC est égal à la somme des angles intérieurs  $\alpha$  et HIM; enfin ce dernier angle, à cause de la réflexion sur le miroir AB, est égal à SIA, qui lui-même est égal à OIR. On voit donc que

$$\text{OHM} = \alpha + \text{OIR};$$

en ajoutant membre à membre ces deux égalités, et supprimant les parties communes, il vient enfin

$$\delta = 2\alpha.$$

**LI.** Devant un miroir sphérique concave, de 2 mètres de rayon, on place une flèche lumineuse de 1 décimètre de longueur, perpendiculairement à l'axe principal et à 3 mètres du miroir. Où se forme l'image, et quelle en est la grandeur?

On met ensuite un petit miroir plan au foyer principal du miroir sphérique, incliné de 45 degrés sur l'axe principal, et la face réfléchissante tournée vers ce miroir. Quelle image formeront les rayons réfléchis par le grand miroir sphérique, en tombant sur le petit miroir plan? Quelles en seront la grandeur et la situation? Où placer un écran pour la recevoir, ou bien une loupe pour l'observer et pour l'agrandir?

*Solution.* — En appliquant la formule générale (1) qui a été donnée (759), on trouve que l'image se forme à 1<sup>m</sup>,25 du miroir, ou à 0<sup>m</sup>,25 du foyer principal. D'autre part, la grandeur de l'image s'obtiendra à l'aide de la proportion (759)

$$\frac{i}{0,1} = \frac{1,25}{3}$$

La grandeur de l'image est donc de

$$0^m,025.$$

Plaçons maintenant le petit miroir plan au foyer F. L'image, au lieu de se former dans une position perpendiculaire à l'axe principal du miroir sphérique, à 0<sup>m</sup>,25 au delà du foyer, sera renvoyée, par le miroir plan, dans une position symétrique de la première par rapport à ce miroir. Au point F, menons la perpendiculaire à l'axe du miroir sphérique; l'image se trouvera à 0<sup>m</sup>,25 du point F, sur cette perpendiculaire; elle sera parallèle à l'axe, et sa grandeur sera toujours 0<sup>m</sup>,025.

Pour la recevoir sur un écran, il suffit de placer cet écran à l'endroit où cette image est renvoyée par le miroir plan, c'est-à-dire parallèlement à l'axe du miroir sphérique, à 0<sup>m</sup>,25 du foyer F.

Pour la grossir avec une loupe, il faut disposer cette loupe de façon que l'image soit placée entre la lentille et son foyer principal; cette dernière opération est facile, dès que l'on a déterminé la position de l'image renvoyée par le miroir plan.

**LII.** Deux miroirs concaves MN et MN' (fig. 707), dont les rayons sont respectivement de 1 mètre et de 1<sup>m</sup>,50, sont disposés en regard l'un de l'autre, de manière que leurs axes coïncident. La distance OO' est de 3 mètres. En quel point de l'axe commun devra-t-on placer un objet lumineux, pour que les images réelles de cet objet données par les deux miroirs soient égales?

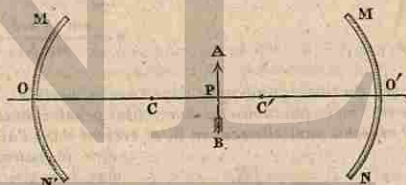


Fig. 707.

*Solution.* — Il est facile de voir que l'égalité des deux images réelles ne peut être obtenue, dans les conditions du problème, que si l'objet est placé dans l'intervalle des deux centres C et C'. La longueur de l'image donnée par le miroir O, à une distance p<sub>1</sub> du point O, est alors déterminée par les deux équations (759)

$$\frac{i}{AB} = \frac{p_1}{OP}, \quad \frac{1}{OP} + \frac{1}{p_1} = \frac{2}{CO},$$

d'où l'on déduit

$$i = AB \times \frac{OC}{2 \times OP - OC} = AB \frac{OC}{PO + PC}.$$

Quant à la longueur de l'image donnée par le miroir O', on trouverait de même

$$AB \frac{O'C'}{PO + PC'}$$

Pour que les deux images soient égales, il suffit qu'on ait

$$\frac{OC}{PO + PC} = \frac{O'C'}{PO + PC'}$$

En ajoutant ces deux rapports terme à terme, et égalant le résultat au premier rapport, il vient

$$\frac{OC}{PO+PC} = \frac{OC+OC'}{OO'+CC'}$$

si l'on substitue dans cette égalité les longueurs des différentes lignes qui y entrent, et si l'on remarque que PC est égal à PO-OC, on a

$$\frac{1,5}{2PO-1,5} = \frac{2,5}{5,5} = \frac{5}{7}$$

d'où l'on déduit facilement

$$PO = 1^m, 8.$$

III. Un prisme BAC (fig. 708), dont l'angle réfringent A est connu, est rencontré perpendiculairement à l'une de ses faces par un rayon lumineux RI qui se réfracte en H suivant HS. On mesure la déviation  $\delta$  que le rayon subit par cette réfraction. Déduire, de la connaissance des angles A et  $\delta$ , la valeur de l'indice de réfraction de la substance du prisme.

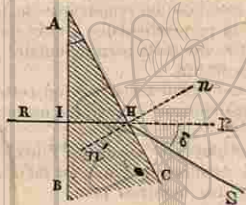


Fig. 708.

Solution. — Soit  $nn'$  la normale au point H; on a :

$$\frac{\sin SHn}{\sin RHn} = n,$$

or, l'angle SHn se compose de deux parties, l'une SHK, égale à  $\delta$ ; l'autre KHn, égale à A, puisque les angles KHn et A ont leurs côtés respectivement perpendiculaires. D'autre part, l'angle RHn, égal à KHn comme opposé par le sommet, est aussi égal à A; en substituant, il vient donc

$$n = \frac{\sin(A+\delta)}{\sin A}.$$

IV. Un tube cylindrique, dont l'axe est vertical, est rempli d'une substance réfringente: un rayon lumineux horizontal pénètre dans ce cylindre sous une incidence  $i$ , se réfléchit partiellement en H, et revient dans l'air suivant KR (fig. 709). Quelle doit être la valeur de l'angle d'incidence  $i$  pour que le rayon émergent soit parallèle au rayon incident?

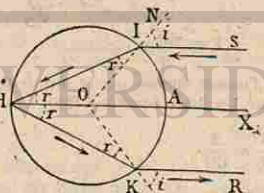


Fig. 709.

par  $n$  l'indice de réfraction de la substance du cylindre, on a

$$\sin i = n \sin r.$$

L'égalité des angles d'incidence et d'émergence est une conséquence de l'égalité des angles HIO et HKO; la figure est donc symétrique par rapport à la droite OX. Pour que les droites SI et KR soient parallèles, il faut et il suffit qu'elles soient parallèles à HO.

L'angle d'incidence cherché  $i$  doit être égal à l'angle HOA, dont la valeur est  $2r$ ; on a donc  $r = \frac{i}{2}$ , et la relation précédente devient

$$2 \sin \frac{i}{2} \cos \frac{i}{2} = n \sin \frac{i}{2}, \quad \sin \frac{i}{2} \left( \cos \frac{i}{2} - \frac{n}{2} \right) = 0.$$

Le problème comporte donc, en général, deux solutions :

1<sup>re</sup> solution. —  $\sin \frac{i}{2} = 0$ , ou  $i = 0$ . — Quel que soit l'indice du cylindre réfringent, le rayon XA, dont le prolongement passe par l'axe du cylindre, revient toujours sur lui-même, après avoir subi la réflexion au point H. Cette solution particulière ne fait jamais défaut.

2<sup>e</sup> solution. —  $\cos \frac{i}{2} = \frac{n}{2}$ . — D'une part, pour que la valeur de  $i$  soit réelle, on doit avoir  $\frac{n}{2} < 1$ , ou  $n < 2$ . — D'autre part, cette condition étant satisfaite, la valeur réelle de  $i$  ne convient à la question que si l'on a  $i < 90^\circ$ , et par suite  $\frac{i}{2} < 45^\circ$ , ou enfin  $\cos \frac{i}{2} > \frac{\sqrt{2}}{2}$ . Pour que le problème admette cette seconde solution, il faut donc qu'on ait

$$n > \sqrt{2} \quad \text{ou} \quad n > 1,42.$$

L'indice  $n$  étant compris entre ces deux limites, 1,42 et 2, plus la substance est réfringente, plus l'angle  $i$  est petit;  $n$  variant de 1,42 à 2, l'angle  $i$  décroît de 90 à 0 degré.

Les conditions du problème peuvent être réalisées avec un cylindre de verre massif, ayant pour indice 1,5. — Il serait impossible d'obtenir un rayon tel que SI, revenant sur lui-même, si on opérât avec un tube rempli d'eau, d'indice 1,55  $< 1,42$ , ou avec un cylindre taillé dans du diamant d'indice 2,45.

LV. Une droite lumineuse, de 1 centimètre de longueur, est placée à 2 mètres d'une lentille convergente, perpendiculairement à l'axe principal de cette lentille; la grandeur de l'image est alors égale à celle de l'objet. A quelle distance de la droite lumineuse faudrait-il rapprocher la lentille, pour que la nouvelle image eût 10 centimètres de hauteur?

Solution. — Lorsque l'image est égale à l'objet, la distance de la lentille à l'objet est le double de la longueur focale; on a donc  $f = 1$  mètre. Approchons la lentille à une distance  $p$  de l'objet, telle que l'image, se formant à une distance  $p'$  de la lentille, ait 10 centimètres de longueur; nous avons (793) les deux relations

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}, \quad \frac{p'}{p} = \frac{10}{1}.$$

En résolvant, on trouve  $p = 1^m, 1$ .

LVI. Un myope voit distinctement les objets situés à une distance au moins égale à 0<sup>m</sup>,20, et n'aperçoit pas aisément les objets éloignés. Avec des besicles, il voit distinctement les objets dont la distance est comprise entre 0<sup>m</sup>,60 et l'infini. Quelle est la distance focale des verres de ces besicles, et à quelle distance de l'œil se forme l'image des objets placés à l'infini?

Solution. — Les besicles du myope sont formées de lentilles divergentes, qui donnent d'un objet une image virtuelle rapprochée; soient  $f$  la longueur focale de ces lentilles,  $p$  la distance de l'objet,  $p'$  celle de l'image. On a, en général (798),

$$\frac{1}{p'} - \frac{1}{p} = \frac{1}{f}.$$

A l'objet situé à 0<sup>m</sup>,60, les besicles substituent une image virtuelle, située à 0<sup>m</sup>,20; on a donc

$$\frac{1}{0,20} - \frac{1}{0,60} = \frac{1}{f}; \quad \text{d'où} \quad f = 0^m,50.$$

C'est à cette distance de 0<sup>m</sup>,50 que se forme l'image virtuelle des objets placés à l'infini.

**LVII. Deux lentilles convergentes égales, ayant une distance focale de 1 mètre, sont placées à 1 mètre l'une de l'autre. Quelle position faut-il donner à un objet linéaire, perpendiculaire à l'axe commun des deux lentilles, pour que leur système forme : 1<sup>o</sup> une image réelle et renversée égale à l'objet, 2<sup>o</sup> une image réelle deux fois plus grande?**

*Solution.* — Soient O et O' les centres optiques des deux lentilles L et L' (fig. 710);

F et O' les foyers de la première, O et F' les deux foyers de la seconde. Construisons l'image d'un point A. Le rayon AI, mené parallèlement à l'axe principal, se réfracte à travers L suivant IO'; et ne subit aucune déviation en traversant la lentille L'. — Le rayon AOH traverse la première lentille sans déviation, et se réfracte suivant HA', parallèlement à l'axe principal de la seconde lentille. A'B' est donc l'image de AB. — Les deux triangles OAB et OO'H sont semblables, et donnent la relation

$$\frac{O'H}{AB} = \frac{OO'}{OB} \quad \text{ou} \quad \frac{A'B'}{AB} = \frac{OO'}{OB}.$$

Si l'on veut que l'image A'B' soit égale à l'objet AB, il faut que l'on ait OB = OO'; c'est-à-dire qu'il faut placer l'objet au foyer F.

Si l'on veut que A'B' = 2AB, il faut que OB =  $\frac{OO'}{2}$ ; l'objet sera alors placé à égale distance de la première lentille et de son foyer.

**LVIII. Deux lentilles, l'une convergente et l'autre divergente, dont les distances focales sont respectivement 1 et 2 mètres, sont placées l'une contre l'autre, de manière que leurs axes principaux coïncident. Un objet lumineux, de 10 centimètres de hauteur, est disposé à 1 mètre du système des deux lentilles, perpendiculairement à leur axe commun. Quelle sera la position et la grandeur de l'image?**

*Solution.* — Soit p la distance de l'objet au groupe des deux lentilles. Supposons que les rayons issus d'un point de l'objet traversent d'abord la lentille divergente, de longueur focale F; ils sortiront de cette lentille en divergeant du point correspondant P<sub>1</sub> de l'image virtuelle, située du même côté que l'objet, à une distance p<sub>1</sub>, donnée (798) par l'équation :

$$(1) \quad \frac{1}{p_1} + \frac{1}{p} = \frac{1}{F}.$$

Ces rayons traversent la lentille convergente, de longueur focale f, comme s'ils émanaient réellement du point P<sub>1</sub>; et ils vont converger en un point P', qui appartient à l'image de l'objet dans le système des deux lentilles; soit p' la distance de cette image au groupe des deux lentilles; on a (795) :

$$(2) \quad \frac{1}{p_1} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}.$$

Si nous retranchons l'équation (1) de l'équation (2), membre à membre, il vient :

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f} - \frac{1}{F}.$$

A la condition que l'on ait f < F, on voit que le système des deux lentilles accolées se comporte comme une lentille convergente, dont la longueur focale z s'obtiendrait par la relation

$$\frac{1}{z} = \frac{1}{f} - \frac{1}{F}.$$

D'après les conditions de l'énoncé, f = 1 et F = 2; on a donc

$$\frac{1}{z} = \frac{1}{1} - \frac{1}{2} = \frac{1}{2}, \quad \text{et} \quad z = 2 \text{ mètres.}$$

L'objet étant situé à une distance de 4 mètres, la distance p' de l'image est déterminée par la relation

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{z}; \quad \text{d'où} \quad p' = 4 \text{ mètres.}$$

La grandeur de l'image est égale à celle de l'objet.

**LIX. Un objet éclairé est à une distance s d'un tableau blanc, sur lequel on veut projeter son image. En essayant une lentille, on trouve qu'on peut lui donner deux positions pour lesquelles la projection a lieu, et que la distance de ces deux positions est d; quelle est la longueur focale de cette lentille?**

*Solution.* — Soit p la distance de la lentille à l'objet, lorsque la projection est effectuée par la lentille dans sa première position; la distance de la lentille à l'écran est alors s - p, et on a (795) :

$$(1) \quad \frac{1}{p} + \frac{1}{s-p} = \frac{1}{f}.$$

D'après cette même relation, il est évident que la lentille sera dans la deuxième position, lorsqu'elle sera à la distance s - p de l'objet et à la distance p de l'écran. Pour passer de la première position à la seconde, on aura donc déplacé la lentille, par rapport à l'objet éclairé, de la distance p à la distance s - p; le chemin parcouru par la lentille est donc (s - p) - p = s - 2p, et l'on a :

$$(2) \quad d = s - 2p, \quad \text{ou} \quad p = \frac{s-d}{2}.$$

En portant cette valeur de p dans l'équation (1), on trouve :

$$\frac{1}{f} = \frac{2}{s-d} + \frac{2}{s+d} = \frac{4s}{s^2 - d^2},$$

d'où l'on tire

$$f = \frac{s^2 - d^2}{4s}.$$

**LX. Un rayon lumineux, provenant d'un point fixe P (fig. 711), traverse une glace à faces parallèles G placée près de la source et inclinée à 45 degrés sur la direction du rayon; il se réfléchit sur un miroir plan m qui est situé au centre C d'un miroir concave M; le rayon suit donc le trajet PCICHQ, subissant, au retour, la réflexion sur la glace à faces parallèles; on le reçoit sur un écran E situé à une distance HQ = HP. On imprime alors au miroir plan m un rapide mouvement de rotation autour d'un axe passant par le centre C du miroir concave, et situé dans le plan du miroir m; on constate que le point Q, où le rayon réfléchi vient rencontrer l'écran,**



s'est déplacé en Q'. Connaissant le rayon R du miroir concave, la distance PC = D, la durée T de la rotation du miroir et le déplacement d = QQ', calculer la vitesse de la lumière.

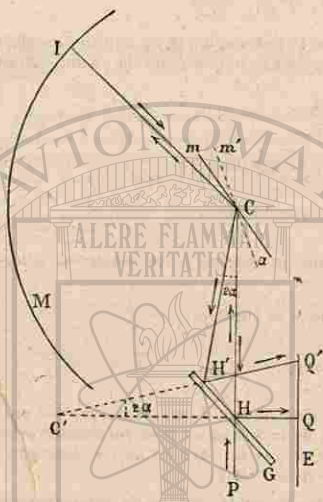


Fig. 711.

$HCH' = 2\alpha$ , et par suite  $QC'Q' = 2\alpha$ .

Cet angle  $QC'Q'$  peut se calculer, puisque, dans le triangle rectangle  $QC'Q'$ , on connaît la base  $QQ' = d$ , et la hauteur  $C'Q = CP = D$ . On a exactement  $\tan 2\alpha = \frac{d}{D}$  et en remarquant que le petit angle  $2\alpha$ , évalué en minutes, est proportionnel à sa tangente, et que d'autre part  $\tan 1' = \frac{1}{5458}$ , on a

$$2\alpha = 5458' \times \frac{d}{D}, \quad \alpha = 1719 \times \frac{d}{D}$$

En remplaçant  $\alpha$  par cette valeur dans l'équation (1), on en tire

$$V = \frac{45200}{1719} \frac{RD}{Td} \text{ (*)}$$

(\*) Cette méthode de détermination de la vitesse de la lumière, qui permet d'opérer sur une distance de quelques mètres seulement, est celle qui avait été employée par Foucault en 1850. Elle l'avait conduit à assigner à la vitesse de la lumière dans l'air la valeur 298,000 kilomètres, assez peu différente du résultat obtenu par Fizeau (335). Elle offre surtout l'avantage de s'appliquer également à la détermination de la vitesse de la lumière dans l'eau. Il suffit d'interposer sur le trajet Cl (fig. 711), un tube plein d'eau; on observe alors que le déplacement QQ' devient les quatre tiers de ce qu'il était primitivement; par suite, la vitesse de propagation dans l'eau n'est que les trois quarts de la vitesse dans l'air. — Ce résultat présente, au point de vue du choix entre la théorie de l'émission et celle des ondulatoires, une importance capitale.

## TABLE DES MATIÈRES

### NOTIONS PRÉLIMINAIRES

|   | Pages. |   | Pages. |
|---|--------|---|--------|
| <b>Notions de mécanique.</b>                                    |        |   |        |
| Mouvements. — Forces . . . . .                                  | 1      | TRAVAIL. — FORCE VIVE . . . . .                             | 12     |
| Mouvement uniforme. . . . .                                     | 1      | Travail moteur, travail résistant. . . . .                  | 15     |
| Mouvement varié. — Vitesse. . . . .                             | 2      | Principe des forces vives. . . . .                          | 14     |
| Mouvement uniformément varié. . . . .                           | 3      | Transmission du travail. . . . .                            | 15     |
| Principe de l'inertie. . . . .                                  | 4      | <b>Divers états des corps. — États divers de l'énergie.</b> |        |
| Forces. — Dynamomètres. . . . .                                 | 4      | Atomes. — Molécules. . . . .                                | 16     |
| Mouvements produits par les forces constantes. — Masse. . . . . | 6      | États physiques des corps. . . . .                          | 17     |
| <b>COMPOSITION DES FORCES. . . . .</b>                          |        |   |        |
| Centre des forces parallèles. . . . .                           | 10     | Énergie. — Conservation de l'énergie. . . . .               | 20     |
| Couples. . . . .  | 10     | <b>Unités C. G. S.</b>                                      |        |
| Composition des forces de direction quelconque. . . . .         | 11     | Du choix des unités. — Unités C. G. S. . . . .              | 22     |
| Équilibre. . . . .  | 12     | <b>Instruments de mesure.</b>                               |        |
|   |        | Vernier. — Cathétomètre. . . . .                            | 25     |

### LIVRE PREMIER

#### PESANTEUR ET HYDROSTATIQUE

|  |    |  |    |
|--|----|--|----|
| <b>CHAPITRE I. — Pesanteur.</b>              |    | Double pesée. . . . .  | 55 |
| Pesanteur. — Centre de gravité. . . . .      | 27 | Balances de précision. . . . .                                   | 56 |
| Direction de la pesanteur. . . . .           | 27 | <b>CHAPITRE II. — Hydrostatique des liquides.</b>                |    |
| Poids. — Centre de gravité. . . . .          | 28 | <b>ÉQUILIBRE DES LIQUIDES. — PRINCIPES FONDAMENTAUX. . . . .</b> |    |
| Divers cas d'équilibre. . . . .              | 30 | Transmission des pressions. . . . .                              | 58 |
| <b>CHUTE DES CORPS. . . . .</b>              |    | Égalité de pression en tous sens. . . . .                        | 59 |
| Chute des corps dans le vide. . . . .        | 32 | Équilibre d'un liquide pesant. . . . .                           | 60 |
| Machine d'Atwood. . . . .                    | 34 | Surface libre d'un liquide pesant. — Vases communicants. . . . . | 62 |
| Appareil du général Morin. . . . .           | 35 | Liquides superposés. . . . .                                     | 62 |
| <b>PENDULE. . . . .</b>                      |    | Applications. . . . .  | 64 |
| Mouvement du pendule simple. . . . .         | 42 | <b>PRESSIONS SUR LES PAROIS DES VASES. . . . .</b>               |    |
| Pendule composé. . . . .                     | 45 | Pression sur le fond horizontal. . . . .                         | 67 |
| L'intensité de la pesanteur. . . . .         | 46 | Pressions sur les parois latérales. . . . .                      | 70 |
| Application du pendule aux horloges. . . . . | 47 | Pression sur l'ensemble de la paroi. . . . .                     | 71 |
| <b>BALANCE. . . . .</b>                      |    |  |    |
| Mesure des poids et des masses. . . . .      | 49 |  |    |
| Conditions de justesse. . . . .              | 51 |  |    |
| Conditions de sensibilité. . . . .           | 55 |  |    |

s'est déplacé en Q'. Connaissant le rayon R du miroir concave, la distance PC = D, la durée T de la rotation du miroir et le déplacement d = QQ', calculer la vitesse de la lumière.



Fig. 711.

$HCH' = 2\alpha$ , et par suite  $QC'Q' = 2\alpha$ .

Cet angle  $QC'Q'$  peut se calculer, puisque, dans le triangle rectangle  $QC'Q'$ , on connaît la base  $QQ' = d$ , et la hauteur  $C'Q = CP = D$ . On a exactement  $\text{tg } 2\alpha = \frac{d}{D}$  et en remarquant que le petit angle  $2\alpha$ , évalué en minutes, est proportionnel à sa tangente, et que d'autre part  $\text{tang } 1' = \frac{1}{5458}$ , on a

$$2\alpha = 5458' \times \frac{d}{D}, \quad \alpha = 1719 \times \frac{d}{D}$$

En remplaçant  $\alpha$  par cette valeur dans l'équation (1), on en tire

$$V = \frac{45200}{1719} \frac{RD}{Td} \text{ (*)}$$

(\*) Cette méthode de détermination de la vitesse de la lumière, qui permet d'opérer sur une distance de quelques mètres seulement, est celle qui avait été employée par Foucault en 1850. Elle l'avait conduit à assigner à la vitesse de la lumière dans l'air la valeur 298,000 kilomètres, assez peu différente du résultat obtenu par Fizeau (335). Elle offre surtout l'avantage de s'appliquer également à la détermination de la vitesse de la lumière dans l'eau. Il suffit d'interposer sur le trajet Cl (fig. 711), un tube plein d'eau; on observe alors que le déplacement QQ' devient les quatre tiers de ce qu'il était primitivement; par suite, la vitesse de propagation dans l'eau n'est que les trois quarts de la vitesse dans l'air. — Ce résultat présente, au point de vue du choix entre la théorie de l'émission et celle des ondulations, une importance capitale.

## TABLE DES MATIÈRES

### NOTIONS PRÉLIMINAIRES

|   | Pages. | Pages.  |
|---|--------|---|
| <b>Notions de mécanique.</b>                                    |        |   |
| Mouvements. — Forces . . . . .                                  | 1      | TRAVAIL. — FORCE VIVE . . . . . 12                          |
| Mouvement uniforme. . . . .                                     | 1      | Travail moteur, travail résistant. . . . . 15               |
| Mouvement varié. — Vitesse. . . . .                             | 2      | Principe des forces vives. . . . . 14                       |
| Mouvement uniformément varié. . . . .                           | 3      | Transmission du travail. . . . . 15                         |
| Principe de l'inertie. . . . .                                  | 4      | <b>Divers états des corps. — États divers de l'énergie.</b> |
| Forces. — Dynamomètres. . . . .                                 | 4      | Atomes. — Molécules. . . . . 16                             |
| Mouvements produits par les forces constantes. — Masse. . . . . | 6      | États physiques des corps. . . . . 17                       |
|   |        | Énergie. — Conservation de l'énergie. . . . . 20            |
| COMPOSITION DES FORCES. . . . .                                 | 8      | <b>Unités C. G. S.</b>                                      |
| Centre des forces parallèles. . . . .                           | 10     | Du choix des unités. — Unités C. G. S. . . . . 22           |
| Couples. . . . .  | 10     | <b>Instruments de mesure.</b>                               |
| Composition des forces de direction quelconque. . . . .         | 11     | Vernier. — Cathétomètre. . . . . 25                         |
| Équilibre. . . . .  | 12     |   |

### LIVRE PREMIER

#### PESANTEUR ET HYDROSTATIQUE

|  |    |   |
|--|----|---|
| <b>CHAPITRE I. — Pesanteur.</b>              |    | Double pesée. . . . . 55  |
| Pesanteur. — Centre de gravité. . . . .      | 27 | Balances de précision. . . . . 56                                   |
| Direction de la pesanteur. . . . .           | 27 | <b>CHAPITRE II. — Hydrostatique des liquides.</b>                   |
| Poids. — Centre de gravité. . . . .          | 28 | Équilibre des liquides. — Principes fondamentaux. . . . . 58        |
| Divers cas d'équilibre. . . . .              | 30 | Transmission des pressions. . . . . 58                              |
| CHUTE DES CORPS. . . . .                     | 32 | Égalité de pression en tous sens. . . . . 59                        |
| Chute des corps dans le vide. . . . .        | 32 | Équilibre d'un liquide pesant. . . . . 60                           |
| Machine d'Atwood. . . . .                    | 34 | Surface libre d'un liquide pesant. — Vases communicants. . . . . 62 |
| Appareil du général Morin. . . . .           | 35 | Liquides superposés. . . . . 62                                     |
| PENDULE. . . . .                             | 42 | Applications. . . . . 64  |
| Mouvement du pendule simple. . . . .         | 42 | PRESSIONS SUR LES PAROIS DES VASES. . . . . 67                      |
| Pendule composé. . . . .                     | 45 | Pression sur le fond horizontal. . . . . 67                         |
| L'intensité de la pesanteur. . . . .         | 46 | Pressions sur les parois latérales. . . . . 70                      |
| Application du pendule aux horloges. . . . . | 47 | Pression sur l'ensemble de la paroi. . . . . 71                     |
| BALANCE. . . . .                             | 49 |   |
| Mesure des poids et des masses. . . . .      | 49 |   |
| Conditions de justesse. . . . .              | 51 |   |
| Conditions de sensibilité. . . . .           | 55 |   |

|  | Pages. |
|--|--------|
| Tourniquet hydraulique . . . . .   | 72     |
| PRINCIPE D'ARCHIMÈDE. . . . .  | 75     |
| Poussée éprouvée par un corps plongé dans un liquide. — Poids apparent. . . . .  | 76     |
| Équilibre des corps flottants . . . . .  | 76     |
| CAPILLARITÉ. — Phénomènes capillaires  | 77     |
| Lois des ascensions et des dépressions   | 78     |
| <b>CHAPITRE III. — Densités. — Aréomètres.</b>                                   |        |
| DENSITÉS. — POIDS SPÉCIFIQUES. . . . .   | 80     |
| Définitions . . . . .  | 80     |
| DÉTERMINATION EXPÉRIMENTALE DES DENSITÉS DES CORPS SOLIDES ET LIQUIDES . . . . . | 81     |
| Méthode du flacon . . . . .  | 81     |
| Méthode de la balance hydrostatique. . . . .                                     | 85     |
| Méthode des aréomètres. . . . .  | 84     |
| Tables de densités . . . . .   | 86     |
| ARÉOMÈTRES À POIDS CONSTANT. . . . .   | 87     |
| Aréomètres de Baumé . . . . .  | 87     |
| Alcoomètre centésimal. . . . .   | 88     |
| Volumètres. — Densimètres. . . . .   | 90     |
| <b>CHAPITRE IV. — Pesanteur de l'air et des gaz. — Baromètre.</b>                |        |
| Transmission des pressions dans les gaz. — Pression atmosphérique. . . . .       | 91     |
| Expériences de Torricelli, de Pascal. . . . .                                    | 92     |
| Mesure de la pression atmosphérique. . . . .                                     | 94     |
| Effets de la pression atmosphérique. . . . .                                     | 96     |
| Baromètre à cuvette . . . . .  | 97     |
| Baromètre de Fortin. . . . .   | 99     |
| Baromètre fixe. . . . .  | 102    |
| Corrections barométriques . . . . .  | 102    |
| Baromètres à siphon. . . . .   | 105    |
| Baromètre à cadran. . . . .  | 104    |
| Baromètres métalliques. . . . .  | 105    |
| Mesure des hauteurs par le baromètre. . . . .                                    | 106    |
| <b>CHAPITRE V. — Force élastique des gaz.</b>                                    |        |
| LOI DE MARIOTTE. — Expériences de Mariotte. . . . .                              | 107    |
| Recherches relatives à la loi de Mariotte. — Expériences de Regnault. . . . .    | 110    |
| Compressibilité des gaz sous de fortes pressions. . . . .                        | 114    |
| MESURE DE LA FORCE ÉLASTIQUE DES GAZ. — MANOMÈTRES. . . . .                      | 116    |
| Manomètres industriels. . . . .  | 117    |
| Manomètres de Regnault. . . . .  | 119    |
| MÉLANGE DES GAZ. . . . .   | 120    |
| Loi du mélange des gaz. . . . .  | 121    |
| MÉLANGE DES LIQUIDES ET DES GAZ. . . . .   | 122    |
| Lois de Dalton. . . . .  | 125    |
| Actions des solutions salines sur les gaz . . . . .                              | 125    |
| EXTENSION DU PRINCIPE D'ARCHIMÈDE AUX GAZ. — AÉROSTATS. . . . .                  | 126    |
| Baroscope . . . . .  | 126    |
| Corrections des pesées. . . . .  | 127    |
| Aérostats. — Force ascensionnelle. . . . .                                       | 128    |
| <b>CHAPITRE VI. — Pompes à gaz et à liquides. — Siphon.</b>                      |        |
| MACHINES SERVANT À BARÉTIER ET À COMPRIMER LES GAZ. . . . .                      | 132    |
| Machine pneumatique. . . . .   | 132    |
| Machine pneumatique de Bianchi. . . . .  | 139    |
| Machine pneumatique à mercure. . . . .   | 141    |
| Pompe à main. . . . .  | 145    |
| Pompe de compression. . . . .  | 144    |
| POMPES À LIQUIDES. . . . .   | 148    |
| Pompe aspirante. . . . .   | 148    |
| Pompe foulante. . . . .  | 150    |
| Pompe aspirante et foulante. . . . .   | 152    |
| Pompe aspirante et élévatoire. . . . .   | 155    |
| Pressé hydraulique. . . . .  | 154    |
| SIPHON. — VASE DE MARIOTTE. . . . .  | 137    |

## LIVRE II

## CHALEUR

| <b>CHAPITRE I. — Dilatation.</b>                                    |     |
|---|-----|
| DILATATION DES CORPS PAR LA CHALEUR. . . . .                        | 161 |
| THERMOMÈTRE. — Température. . . . .                                 | 164 |
| Échelles thermométriques . . . . .                                  | 165 |
| Construction et graduation du thermomètre à mercure. . . . .        | 167 |
| Déplacement du zéro. . . . .  | 170 |
| Thermomètre à alcool. . . . .                                       | 170 |
| Sensibilité des thermomètres. . . . .                               | 171 |
| Choix de la substance thermométrique. — Thermomètre normal. . . . . | 172 |
| Degré de température . . . . .                                      | 175 |

| <b>CHAPITRE II. — Mesure des dilatations.</b>   |     |
|---|-----|
| DILATATIONS DES CORPS SOLIDES. . . . .  | 175 |
| Dilatation linéaire. — Formules. . . . .  | 175 |
| Méthode de Lavoisier et de Laplace. . . . .   | 176 |
| Coefficients de dilatation linéaire. . . . .  | 178 |
| Dilatation cubique. — Formules. . . . .   | 178 |
| Dilatation des enveloppes. . . . .  | 184 |
| DILATATIONS DES LIQUIDES. . . . .   | 181 |
| Dilatations apparentes et absolues. . . . .   | 181 |
| Dilatation absolue du mercure. . . . .  | 181 |
| Dilatation absolue des autres liquides. . . . .   | 185 |
| Procédé du thermomètre à poids. . . . .   | 184 |
| Procédé du thermomètre à tige. . . . .  | 186 |
| Dilatation des liquides très volatils. . . . .  | 188 |
| Maximum de densité de l'eau. . . . .  | 188 |
| Thermomètre à poids appliqué à l'étude de la dilatation des solides. . . . .                            | 189 |
| DILATATIONS DES GAZ. . . . .  | 190 |
| Lois de Gay-Lussac. — Formules. . . . .   | 190 |
| Expériences de Gay-Lussac. . . . .  | 192 |
| Expériences de Regnault. . . . .  | 194 |
| Coefficients de dilatation des gaz sous pression constante. . . . .                                     | 196 |
| <b>CHAPITRE III. — Densités des gaz.</b>  |     |
| Densités des gaz par rapport à l'air. . . . .   | 198 |
| Méthode de Regnault. . . . .  | 199 |
| Poids du litre d'air. . . . .   | 202 |
| Table des densités des gaz. . . . .   | 204 |
| <b>CHAPITRE IV. — Applications des dilatations.</b>   |     |
| CORPS SOLIDES. — Corrections des mesures linéaires. . . . .   | 205 |
| Pendules compensateurs. . . . .   | 205 |
| Thermomètre de Bréguet. . . . .   | 207 |
| CORPS LIQUIDES. — Réduction des hauteurs barométriques à zéro. . . . .                                  | 208 |
| Thermomètre à poids. . . . .  | 209 |
| CORPS GAZEUX. — Thermomètre à air de Regnault. . . . .  | 210 |
| Thermomètre de Dulong et Petit. . . . .   | 211 |
| CORRECTIONS AUX DENSITÉS. . . . .   | 215 |
| Détermination des densités à zéro. . . . .  | 215 |
| <b>CHAPITRE V. — Changements d'état des corps.</b>  |     |
| FUSION ET SOLIDIFICATION . . . . .  | 215 |
| Phénomène de la fusion. — Points de fusion. — Chaleur de fusion. . . . .                                | 215 |
| Solidification. — Surfusion. . . . .  | 217 |
| Changements de volume accompagnant la fusion ou la solidification. . . . .                              | 219 |
| Influence de la pression sur le point de fusion. — Regel. . . . .                                       | 220 |
| Dissolution des solides dans les liquides. — Mélanges réfrigérants. . . . .                             | 222 |
| Cristallisation. — Sursaturation. . . . .   | 225 |
| <b>CHAPITRE VI. — Propriétés des vapeurs.</b>   |     |
| MESURE DE LA FORCE ÉLASTIQUE DES VAPEURS DANS LE VIDE. . . . .  | 226 |
| Tension maximum des vapeurs. . . . .  | 227 |
| Maximum de tension de la vapeur d'eau aux différentes températures. . . . .                             | 228 |
| Tensions des autres vapeurs. . . . .  | 235 |
| MÉLANGE DES GAZ ET DES VAPEURS . . . . .  | 234 |
| Loi du mélange des gaz et des vapeurs . . . . .   | 235 |
| DENSITÉS DES VAPEURS . . . . .  | 256 |
| Procédé de Dumas. . . . .   | 256 |
| Applications . . . . .  | 258 |
| <b>CHAPITRE VII. — Formation des vapeurs. — Condensation des vapeurs et des gaz.</b>                    |     |
| ÉVAPORATION . . . . .   | 240 |
| Froid produit par l'évaporation. — Appareils Carré . . . . .  | 241 |
| ÉBULLITION . . . . .  | 244 |
| Température minimum de l'ébullition sous une pression déterminée. . . . .                               | 245 |
| Marmite de Papin. . . . .   | 247 |
| Vaporisation totale. . . . .  | 247 |
| Expériences de M. Donny, de M. Dufour, de M. Gernez, relatives aux conditions de l'ébullition. . . . .  | 248 |
| Ébullition des solutions salines. . . . .   | 253 |
| Point normal d'ébullition. . . . .  | 255 |
| Chaleur de vaporisation. . . . .  | 254 |
| CALÉFACTION. . . . .  | 254 |
| LIQÉFACTION DES VAPEURS ET DES GAZ. . . . .   | 257 |
| Distillation . . . . .  | 257 |
| Liquéfaction par refroidissement. . . . .   | 258 |
| Liquéfaction par compression. . . . .   | 258 |
| Liquéfaction par refroidissement et compression. . . . .  | 260 |
| Température critique. — Liquéfaction des gaz réputés permanents. — Expériences de M. Cailletet. . . . . | 261 |

|   | Pages. |
|---|--------|
| <b>CHAPITRE VIII. — Hygrométrie.</b>                                  |        |
| État hygrométrique. . . . .   | 265    |
| Hygromètre chimique. . . . .  | 266    |
| Hygromètre à cheveu. . . . .  | 268    |
| Hygromètres de condensation. . . . .                                  | 271    |
| Psychromètre. . . . .   | 275    |
| <b>CHAPITRE IX. — Calorimétrie.</b>                                   |        |
| Unité de chaleur. — Calorie. . . . .                                  | 275    |
| MESURE DES CHALEURS SPÉCIFIQUES . . . . .                             | 276    |
| Méthode de la fusion de la glace. —                                   |        |
| Calorimètre de Bunsen. . . . .  | 277    |
| Méthode des mélanges. — Appareils                                     |        |
| de Regnault, de M. Berthelot. . . . .                                 | 279    |
| Chaleurs spécifiques des corps solides                                |        |
| et liquides. . . . .  | 282    |
| Chaleurs spécifiques des gaz sous pres-                               |        |
| cion constante. . . . .   | 285    |
| Chaleurs spécifiques des gaz à volume                                 |        |
| constant. — Rapport des deux cha-                                     |        |
| leurs spécifiques. . . . .  | 284    |
| Expérience de Clément et Desormes. . . . .                            | 286    |
| Loi de Dulong et Petit. — Loi de Neu-                                 |        |
| mann. — Loi de Wœstyn. . . . .  | 288    |
| MESURE DES CHALEURS DE FUSION ET DE                                   |        |
| VAPORISATION . . . . .  | 290    |
| Chaleurs de fusion. . . . .   | 290    |
| Chaleurs de vaporisation. . . . .                                     | 292    |
| MESURE DES CHALEURS DE COMBINAISON. . . . .                           | 294    |
| Quantités de chaleurs correspondan-                                   |        |
| tes aux phénomènes chimiques. . . . .                                 | 294    |
| Chaleurs de combustion. . . . .                                       | 296    |
| <b>CHAPITRE X. — Chauffage et machines à vapeur.</b>                  |        |
| DIVERS MODS DE CHAUFFAGE. . . . .                                     | 297    |
| Appareils usuels. . . . .   | 297    |
| Chauffage des grands édifices. . . . .                                | 298    |
| CHAUDIÈRES À VAPEUR. . . . .  | 299    |
| Chaudières à bouilleurs. . . . .                                      | 299    |
| Alimentation. — Injecteur Giffard. . . . .                            | 301    |
| Chaudières tubulaires. . . . .  | 304    |
| MACHINES À VAPEUR. . . . .  | 304    |
| Organes principaux. . . . .   | 304    |
| Condenseur. . . . .   | 305    |
| Détente. . . . .  | 306    |
| Distribution de la vapeur. — Tiroir. . . . .                          | 306    |
| Machines à basse, moyenne et haute                                    |        |
| pression. . . . .   | 307    |
| Cheval-vapeur. . . . .  | 308    |
| Organes régulateurs du mouvement. . . . .                             | 308    |
| Pompes adjointes à la machine. . . . .                                | 309    |
| Mouvement du tiroir. — Excentrique. . . . .                           | 311    |
| Machines diverses. — Locomotives. . . . .                             | 311    |
| Machines à gaz. . . . .   | 314    |
| <b>CHAPITRE XI. — Notions sur la théorie mécanique de la chaleur.</b> |        |
| ÉQUIVALENCE ENTRE LE TRAVAIL MÉCANIQUE                                |        |
| ET LA CHALEUR. . . . .  | 315    |
| Apparition de chaleur accompagnant                                    |        |
| la disparition d'une force vive. . . . .                              | 315    |
| Notion de l'équivalence. . . . .                                      | 316    |
| Expériences de Joule. . . . .   | 317    |
| Expériences de Hirn. . . . .  | 320    |
| Équivalent mécanique de la chaleur . . . . .                          | 321    |
| INTERPRÉTATION MÉCANIQUE DES EFFETS                                   |        |
| PRODUITS PAR LA CHALEUR. . . . .                                      | 321    |
| La chaleur envisagée comme un mode                                    |        |
| de mouvement. . . . .   | 321    |
| Effets de la chaleur sur un gaz, à                                    |        |
| pression constante. — Travail exté-                                   |        |
| rieur. — Chaleur sensible. . . . .                                    | 322    |
| Effets de la chaleur sur un gaz sous                                  |        |
| volume constant. . . . .  | 324    |
| Détermination de l'équivalent méca-                                   |        |
| nique par les propriétés des gaz. . . . .                             | 325    |
| Effets de la chaleur sur les solides,                                 |        |
| les liquides. — Travail intérieur. . . . .                            | 326    |
| Changements d'état. — Chaleur de                                      |        |
| fusion. — Chaleur de vaporisation. . . . .                            | 327    |
| CONSERVATION ET TRANSFORMATIONS DE                                    |        |
| L'ÉNERGIE. . . . .  | 328    |
| Énergie actuelle, énergie potentielle,                                |        |
| énergie totale. . . . .   | 328    |
| Transformations de l'énergie dans les                                 |        |
| phénomènes physiques. . . . .   | 329    |
| Transformations de l'énergie dans les                                 |        |
| phénomènes chimiques. . . . .   | 330    |
| Coefficient économique théorique                                      |        |
| des machines thermiques. — Prin-                                      |        |
| cipe de Carnot. . . . .   | 332    |
| Coefficient économique réel. . . . .                                  | 335    |
| Origine de la chaleur et du mouve-                                    |        |
| ment chez les animaux. . . . .  | 334    |
| Absorption de la chaleur solaire pour                                 |        |
| le développement des végétaux. . . . .                                | 335    |
| Le Soleil est la source de tout mou-                                  |        |
| vement à la surface de la Terre. . . . .                              | 336    |

## LIVRE III

## ÉLECTRICITÉ ET MAGNÉTISME

|   | Pages. |
|---|--------|
| <b>CHAPITRE I. — Électricité statique.</b>    |        |
| PRINCIPES FONDAMENTAUX. . . . .               | 337    |
| Électrisation par frottement. . . . .         | 337    |
| Corps conducteurs et corps mauvais            |        |
| conducteurs. . . . .                          | 337    |
| Distinction des deux électricités. . . . .    | 339    |
| Hypothèse des fluides électriques. —          |        |
| Théories de Franklin, de Symmer. . . . .      | 341    |
| LOIS DES ACTIONS ÉLECTRIQUES. — DISTRI-       |        |
| BUTION — DÉPERDITION. . . . .                 | 342    |
| Lois de Coulomb. . . . .                      | 342    |
| Distribution de l'électricité. . . . .        | 345    |
| Propriétés des pointes. . . . .               | 347    |
| Notions sur la déperdition. . . . .           | 348    |
| DÉVELOPPEMENT D'ÉLECTRICITÉ PAR IN-           |        |
| FLUENCE. . . . .                              | 349    |
| Expériences fondamentales. . . . .            | 349    |
| Étincelle électrique. . . . .                 | 352    |
| Mouvements des corps légers. . . . .          | 355    |
| ÉLECTROSCOPES. — NOTION DU POTENTIEL.         |        |
| — ÉLECTROMÈTRES. . . . .                      | 355    |
| Emploi du pendule électrique. . . . .         | 355    |
| Électroscope à feuilles d'or. . . . .         | 356    |
| Potentiel. — Niveau électrique. —             |        |
| Température électrique. . . . .               | 357    |
| Mesure des potentiels. . . . .                | 358    |
| Électromètre à quadrants. . . . .             | 359    |
| Capacités électriques. . . . .                | 361    |
| Potentiel en un point extérieur. . . . .      | 365    |
| Théorème de Newton. . . . .                   | 365    |
| Surfaces de niveau. — Lignes de               |        |
| force. — Champ électrique. . . . .            | 365    |
| MACHINES ÉLECTRIQUES. . . . .                 | 367    |
| Sources électriques. . . . .                  | 367    |
| Machine de Ramsden. . . . .                   | 368    |
| Machine de Nairne. . . . .                    | 372    |
| Électrophore. . . . .                         | 375    |
| Machine de Holtz. . . . .                     | 374    |
| Machine de Carré. . . . .                     | 378    |
| CONDENSATION DE L'ÉLECTRICITÉ. — APPA-        |        |
| RELS CONDENSATEURS. . . . .                   | 379    |
| Principe de la condensation. . . . .          | 379    |
| Condensateur à lame de verre. . . . .         | 380    |
| Condensateur sphérique à lame d'air. . . . .  | 382    |
| Décharge successive et décharge in-           |        |
| stantanée. . . . .                            | 385    |
| Bouteille de Leyde. — Batteries. . . . .      | 384    |
| Résidus après la décharge. . . . .            | 388    |
| Influence du diélectrique. . . . .            | 389    |
| Électroscope condensateur de Volta. . . . .   | 390    |
| EFFETS DES DÉCHARGES ÉLECTRIQUES. . . . .     | 391    |
| Effets généraux. — Énergie d'un con-          |        |
| ducteur électrisé. . . . .                    | 391    |
| Effets mécaniques. . . . .                    | 392    |
| Effets calorifiques. . . . .                  | 394    |
| Effets lumineux. . . . .                      | 395    |
| Effets chimiques. . . . .                     | 398    |
| Effets physiologiques. . . . .                | 399    |
| <b>CHAPITRE II. — Magnétisme.</b>             |        |
| PRINCIPES GÉNÉRAUX DU MAGNÉTISME . . . . .    | 401    |
| Aimants. — Pôles. . . . .                     | 401    |
| Action de la terre sur un aimant. . . . .     | 402    |
| Actions réciproques des pôles de deux         |        |
| aimants. . . . .                              | 405    |
| Hypothèse de l'aimant terrestre. . . . .      | 404    |
| Aimantation temporaire du fer; ai-            |        |
| mantation permanente de l'acier. . . . .      | 406    |
| Théorie de Coulomb. — Définition              |        |
| précise des pôles. . . . .                    | 408    |
| Lois des actions magnétiques. . . . .         | 410    |
| Champ magnétique. — Lignes de                 |        |
| force. . . . .                                | 411    |
| MAGNÉTISME TERRESTRE. . . . .                 | 412    |
| Action directrice de la Terre. . . . .        | 412    |
| Déclinaison et inclinaison. . . . .           | 414    |
| Boussoles de déclinaison. . . . .             | 415    |
| Boussole d'inclinaison. . . . .               | 419    |
| Boussole marine. . . . .                      | 421    |
| PROCÉDÉS D'AIMANTATION. — CONSERVA-           |        |
| TION DU MAGNÉTISME. . . . .                   | 422    |
| Simple touche. — Touche séparée.              |        |
| — Double touche. . . . .                      | 422    |
| Influence des variations de tempéra-          |        |
| ture. . . . .                                 | 425    |
| Aimantation par l'action de la Terre. . . . . | 424    |
| Conservation des aimants. — Armu-             |        |
| res et contacts. . . . .                      | 424    |
| Aimants de Jamin. . . . .                     | 426    |

|   | Pages. |
|---|--------|
| <b>CHAPITRE III. — Électricité dynamique. — Piles électriques.</b>  |        |
| PHÉNOMÈNES GÉNÉRAUX. . . . .  | 427    |
| Expérience de Galvani. . . . .  | 427    |
| Théorie et expériences de Volta. . . . .  | 428    |
| <b>PILES A UN SEUL LIQUIDE. . . . . 431</b>   |        |
| Principe des piles. — Courant électrique. . . . .   | 431    |
| Pile de Volta. . . . .  | 434    |
| Modifications de la pile de Volta. . . . .  | 435    |
| Emploi du zinc amalgamé. . . . .  | 438    |
| Décomposition de l'eau par un courant. — Théorie de Grotthuss. . . . .                                      | 438    |
| Décomposition de l'eau à l'intérieur de la pile. — Causes de variation des piles à un seul liquide. . . . . | 440    |
| Pile au bichromate de potasse. . . . .  | 441    |
| <b>PILES A DEUX LIQUIDES SÉPARÉS. . . . . 442</b>   |        |
| Pile de Daniell. . . . .  | 442    |
| Piles de Grove et de Bunsen. . . . .  | 444    |
| Pile de Leclanché. . . . .  | 445    |
| <b>PILES THERMO-ÉLECTRIQUES. . . . . 446</b>  |        |
| Expérience de Seebeck. . . . .  | 446    |
| Diverses piles thermo-électriques. . . . .  | 447    |
| Thermo-multiplicateur de Melloni. . . . .   | 449    |
| <b>EFFETS CHIMIQUES DES COURANTS. . . . . 450</b>   |        |
| Décomposition des composés binaires. . . . .  | 451    |
| Décomposition des sels oxygénés. . . . .  | 452    |
| Lois de Faraday. . . . .  | 455    |
| Effets secondaires. — Électrolyse des sels alcalins. . . . .  | 454    |
| Phénomènes de polarisation. — Piles secondaires. — Accumulateurs. . . . .                                   | 456    |
| Galvanoplastie. — Dorure. — Argenture. — Cuifrage. . . . .  | 458    |
| <b>EFFETS CALORIFIQUES, LUMINEUX ET PHYSIOLOGIQUES. . . . . 462</b>   |        |
| Arc voltaïque. . . . .  | 462    |
| <b>CHAPITRE IV. — Lois des courants.</b>  |        |
| INTENSITÉS DES COURANTS. — LOIS D'OHM. . . . .  | 465    |
| Volttamètre. . . . .  | 465    |
| Expérience d'Ersted. — Règle d'Ampère. — Principe des rhéomètres. . . . .                                   | 466    |
| Résistance des conducteurs, résistance de la pile. . . . .  | 468    |
| Lois d'Ohm. . . . .   | 469    |
| UNITÉS ÉLECTRIQUES. . . . .   | 471    |
| Unités pratiques: ohm, volt, ampère. . . . .  | 471    |
| Unités absolues électro-magnétiques. . . . .  | 474    |
| <b>MESURE DES RÉSISTANCES. — ASSOCIATION DES ÉLÉMENTS DE PILE. . . . . 475</b>                              |        |
| Coefficients de résistance. . . . .   | 475    |
| Constantes d'une pile. . . . .  | 477    |
| Association des éléments de pile. . . . .   | 478    |
| Courants dérivés. . . . .   | 481    |
| Pont de Wheatstone. . . . .   | 485    |
| <b>CHAPITRE V. — Electro-magnétisme.</b>  |        |
| GALVANOMÈTRES. . . . .  | 485    |
| Multiplicateur de Schweigger. . . . .   | 485    |
| Galvanomètre de Nobili. . . . .   | 488    |
| Galvanomètre de W. Thomson. . . . .   | 489    |
| Galvanomètre de M. Bourbouze. . . . .   | 491    |
| Galvanomètres aperiodiques. . . . .   | 492    |
| <b>ACTIONS DES COURANTS SUR LES COURANTS ET ACTIONS RÉCIPROQUES. . . . . 495</b>                            |        |
| Loi générale. . . . .   | 495    |
| Expériences diverses. . . . .   | 491    |
| <b>CHAPITRE VI. — Electro-dynamique.</b>  |        |
| <b>ACTIONS DES COURANTS SUR LES COURANTS. 498</b>   |        |
| Principes des courants parallèles, des courants angulaires, des courants sinusoïdaux. . . . .               | 498    |
| Expériences diverses. . . . .   | 501    |
| <b>ACTION DE LA TERRE SUR LES COURANTS. 505</b>   |        |
| L'action de la Terre est assimilable à celle d'un courant indéfini. . . . .                                 | 505    |
| Conducteurs astatiques. . . . .   | 507    |
| <b>SOLÉNOÏDES. — THÉORIE DU MAGNÉTISME D'AMPÈRE. . . . . 508</b>  |        |
| Propriétés des solénoïdes. . . . .  | 508    |
| Théorie du magnétisme d'Ampère. . . . .   | 509    |
| Applications de cette théorie. . . . .  | 510    |
| <b>CHAPITRE VII. — Aimantation par les courants. — Télégraphie électrique.</b>                              |        |
| DÉVELOPPEMENT DU MAGNÉTISME PAR LES COURANTS. — ÉLECTRO-AIMANTS. . . . .                                    | 515    |
| Aimantation par les courants. . . . .   | 515    |
| Électro-aimants. . . . .  | 514    |
| Sonneries électriques. . . . .  | 517    |
| TÉLÉGRAPHIE ÉLECTRIQUE. . . . .   | 518    |
| Lignes télégraphiques. . . . .  | 519    |
| Télégraphe de Morse. . . . .  | 520    |
| Télégraphe de Bréguet. . . . .  | 525    |

|  | Pages. |   | Pages. |
|--|--------|---|--------|
| Télégraphie sous-marine. — Câbles. . . . .                       | 527    | TÉLÉPHONE ET MICROPHONE. . . . .                            | 545    |
| Siphon-recorder. . . . .   | 528    | Téléphone de Bell. . . . .                                  | 543    |
|  |        | Système Ader. . . . .                                       | 547    |
| <b>CHAPITRE VIII. — Courants d'induction.</b>                    |        |   |        |
| PHÉNOMÈNES GÉNÉRAUX. . . . .                                     | 550    | MACHINES MAGNÉTO-ÉLECTRIQUES ET DYNAMO-ÉLECTRIQUES. . . . . | 549    |
| Induction volta-électrique. . . . .                              | 550    | Machine de Clarke. . . . .                                  | 549    |
| Induction magnéto-électrique. . . . .                            | 552    | Machine de l'Alliance. . . . .                              | 553    |
| Induction telluro-électrique. . . . .                            | 554    | Principe des machines de Gramme. . . . .                    | 534    |
| Loi de Lenz. . . . .   | 555    | Machine magnéto-électrique. . . . .                         | 537    |
| Comparaison des deux courants induits direct et inverse. . . . . | 556    | Machine dynamo-électrique. . . . .                          | 538    |
| Extra-courants. . . . .  | 557    | Machine à courants alternatifs. . . . .                     | 560    |
| BOBINE D'INDUCTION. . . . .                                      | 540    | Transport de la force à distance. . . . .                   | 561    |
| Bobine de Ruhmkorff. . . . .                                     | 540    | Appareils divers. . . . .                                   | 565    |
| Effluve. — Tubes de Geissler. . . . .                            | 544    | ECLAIRAGE ÉLECTRIQUE. . . . .                               | 564    |
|  |        | Régulateurs. . . . .  | 565    |
|  |        | Bougie Jablochhoff. . . . .                                 | 567    |
|  |        | Lampes à incandescence. . . . .                             | 569    |

## LIVRE IV

## ACOUSTIQUE

|  |     |   |     |
|--|-----|---|-----|
| <b>CHAPITRE I. — Production et propagation du son.</b>                     |     | Gamme tempérée. . . . .   | 568 |
| PRODUCTION DU SON. . . . .   | 571 | Diapason normal. . . . .  | 599 |
| Mouvement vibratoire. . . . .  | 572 | <b>CHAPITRE III. — Vibrations des gaz. — Tuyaux sonores.</b>                  |     |
| Caractères distinctifs des sons. . . . .                                   | 575 | Tuyaux à bouche. . . . .  | 600 |
| PROPAGATION DES SONS. . . . .  | 574 | Loi des longueurs. . . . .  | 602 |
| Ondes sonores. . . . .   | 574 | Nœuds et ventres de vibration. . . . .  | 605 |
| Le son ne se propage pas dans le vide. . . . .                             | 575 | Lois des harmoniques des tuyaux. . . . .                                      | 607 |
| VITESSE DE PROPAGATION DU SON. . . . .                                     | 576 | Détermination de la vitesse du son dans les gaz et dans les liquides. . . . . | 609 |
| Vitesse dans l'air. . . . .  | 577 | Tuyaux à anche. . . . .   | 609 |
| Vitesse dans l'eau, dans la fonte. . . . .                                 | 578 | Instruments à vent. . . . .   | 610 |
| Propagation dans un tuyau cylindrique indéfini. — Longueur d'onde. . . . . | 579 | <b>CHAPITRE IV. — Vibrations des corps solides.</b>                           |     |
| Vitesse dans un milieu élastique. . . . .                                  | 584 | VIBRATIONS DES CORDES. . . . .  | 615 |
| RÉFLEXION DU SON. — Écho. — Résonance. . . . .                             | 586 | Lois des vibrations transversales. . . . .                                    | 615 |
| <b>CHAPITRE II. — Hauteur des sons. Intervalles musicaux.</b>              |     | Harmoniques. . . . .  | 616 |
| APPAREILS POUR COMPTER LES VIBRATIONS. . . . .                             | 589 | Instruments à corde. . . . .  | 617 |
| Sirène. . . . .  | 589 | Vibrations longitudinales. . . . .  | 618 |
| Roues dentées. . . . .   | 592 | VIBRATIONS DES VERGES, DES PLAQUES, etc. . . . .                              | 619 |
| Compteurs graphiques. . . . .  | 592 | Vibrations transversales des verges. . . . .                                  | 619 |
| INTERVALLES MUSICAUX. — GAMME. . . . .                                     | 594 | Vibrations longitudinales. . . . .  | 619 |
| Intervalle de deux sons. . . . .   | 594 | Vitesse du son dans les solides. . . . .                                      | 620 |
| Gamme. — Accord parfait. . . . .   | 595 | Vibrations des plaques; lignes nodales. — Cloches. — Membranes. . . . .       | 621 |
| Dièses et Bémols. . . . .  | 597 |   |     |

|   | Pages. |
|---|--------|
| CHAPITRE V. — <b>Timbres des sons.</b>                        |        |
| Causes générales du timbre . . . . .                          | 624    |
| Renforcement. — Résonnateurs. . . . .                         | 625    |
| Timbres des divers instruments ou de la voix humaine. . . . . | 628    |
| Phonographe. . . . .  | 629    |
| CHAPITRE VI. — <b>Mécanisme de l'audition.</b>                |        |
| Description de l'oreille. . . . .                             | 632    |
| Fonctions des diverses parties. . . . .                       | 634    |

## LIVRE V

## OPTIQUE

|   |     |
|---|-----|
| CHAPITRE I. — <b>Propagation de la lumière. — Photométrie.</b>                |     |
| PROPAGATION DE LA LUMIÈRE. . . . .  | 635 |
| Définitions. — Hypothèses de l'émission et des ondulations. . . . .           | 635 |
| Propagation rectiligne. — Ombre. — Pénombre. . . . .                          | 636 |
| Images dans la chambre obscure. . . . .                                       | 639 |
| PHOTOMÉTRIE . . . . .   | 640 |
| Intensités propres des sources . . . . .                                      | 641 |
| Photomètres de Foucault, de Rumford . . . . .                                 | 642 |
| CHAPITRE II. — <b>Réflexion de la lumière.</b>                                |     |
| RÉFLEXION PAR LES SURFACES PLANES. . . . .                                    | 644 |
| Réflexion régulière. — Lois. . . . .  | 644 |
| Images dans les miroirs plans. . . . .  | 647 |
| Réflexion à la surface des corps transparents . . . . .                       | 649 |
| Réflexion irrégulière ou diffusion. . . . .                                   | 650 |
| Miroirs étamés. . . . .   | 650 |
| Miroirs parallèles, miroirs inclinés . . . . .                                | 651 |
| MIROIRS SPHÉRIQUES. . . . .   | 654 |
| Miroirs concaves. Foyer principal. . . . .                                    | 654 |
| Foyer d'un point sur l'axe principal. . . . .                                 | 656 |
| Axes secondaires. . . . .   | 659 |
| Images dans les miroirs concaves. . . . .                                     | 661 |
| Images aériennes. . . . .   | 667 |
| Miroirs convexes. . . . .   | 668 |
| Détermination de la distance focale principale d'un miroir sphérique. . . . . | 670 |
| CHAPITRE III. — <b>Réfraction de la lumière.</b>                              |     |
| PRINCIPES GÉNÉRAUX . . . . .  | 672 |
| Lois de la réfraction. . . . .  | 672 |
| Construction d'Huyghens. . . . .  | 674 |
| Réfraction par une lame à faces parallèles. . . . .                           | 675 |
| Angle limite. — Réflexion totale . . . . .                                    | 678 |
| Réfractions atmosphériques. . . . .   | 681 |
| RÉFRACTION AU TRAVERS DES PRISMES . . . . .                                   | 682 |
| Déviations produites par un prisme. . . . .                                   | 685 |
| Minimum de déviation. . . . .   | 685 |
| LENTILLES SPHÉRIQUES. . . . .   | 687 |
| Lentilles convergentes. — Foyer principal. . . . .                            | 688 |
| Foyers des divers points d'un objet. . . . .                                  | 690 |
| Centre optique. — Axes secondaires. . . . .                                   | 691 |
| Formule des lentilles. . . . .  | 695 |
| Images produites par les lentilles convergentes. . . . .                      | 697 |
| Lentilles divergentes. . . . .  | 700 |
| CHAPITRE IV. — <b>Dispersion.</b>   |     |
| DÉCOMPOSITION ET RECOMPOSITION DE LA LUMIÈRE. . . . .                         | 703 |
| Spectre solaire. . . . .  | 705 |
| Les couleurs du spectre sont simples et inégalement réfrangibles. . . . .     | 704 |
| Recomposition de la lumière blanche. — Disque de Newton. . . . .              | 705 |
| Aberration de réfrangibilité des lentilles. — Achromatisme. . . . .           | 708 |
| Couleurs complémentaires. — Couleurs des corps. . . . .                       | 709 |
| Propriétés calorifiques, chimiques et phosphorogéniques du spectre. . . . .   | 740 |
| Les couleurs diffèrent par la rapidité du mouvement vibratoire. . . . .       | 741 |
| ÉTUDE DES SPECTRES DE DIVERSES ORIGINES. — ANALYSE SPECTRALE. . . . .         | 742 |
| Méthode de Newton pour obtenir un spectre pur. . . . .                        | 742 |
| Raies du spectre solaire. . . . .   | 745 |
| Spectroscope. . . . .   | 744 |

|   | Pages. |
|---|--------|
| Spectres des lumières artificielles. . . . .  | 745    |
| Analyse spectrale. . . . .  | 746    |
| Renversement des raies. . . . .   | 747    |
| Interprétation des raies du spectre solaire, d'après M. Kirchhoff. . . . .                                  | 748    |
| Raies telluriques. . . . .  | 749    |
| Résultats relatifs à l'étude physique des corps célestes. . . . .   | 749    |
| CHAPITRE V. — <b>Vision. — Instruments d'optique. — Vitesse de la lumière.</b>                              |        |
| VISION . . . . .  | 720    |
| Structure de l'œil. — Formation des images au fond de l'œil. . . . .  | 720    |
| Vision à différentes distances. — Distance minimum de la vision. . . . .                                    | 722    |
| Principales espèces de vues. — Besicles. . . . .  | 724    |
| Estimation de la distance et de la grandeur d'un objet par le diamètre apparent et l'angle optique. . . . . | 726    |
| Appréciation du relief. . . . .   | 728    |
| INSTRUMENTS D'OPTIQUE . . . . .   | 728    |
| Microscope solaire. . . . .   | 728    |
| Loupe. — Loupes composées. . . . .  | 750    |
| Microscope composé. . . . .   | 755    |
| Champ du microscope, point oculaire. . . . .  | 756    |
| Lunette astronomique. . . . .   | 757    |
| Réticule. — Fixation de l'axe optique. . . . .  | 759    |
| Champ de la lunette, point oculaire. . . . .  | 740    |
| Oculaires composés. . . . .   | 741    |
| Lunette terrestre. . . . .  | 742    |
| Lunette de Galilée. . . . .   | 744    |
| Avantages relatifs des divers systèmes de lunettes. . . . .   | 745    |
| Télescope de Newton. . . . .  | 746    |
| Télescope de Foucault. . . . .  | 747    |
| Télescope de Gregory. . . . .   | 748    |
| Avantages relatifs des lunettes et des télescopes. . . . .  | 749    |
| Phares. — Lentilles à échelons. . . . .   | 750    |
| VITESSE DE LA LUMIÈRE. . . . .  | 751    |
| Déterminations anciennes. . . . .   | 751    |
| Méthode de M. Fizeau. . . . .   | 752    |
| CHAPITRE VI. — <b>Notions sommaires sur la photographie.</b>  |        |
| Chambre noire pour la photographie. . . . .   | 755    |
| Daguerrétypie. . . . .  | 756    |
| Production des clichés. . . . .   | 757    |
| Épreuves positives aux sels d'argent. . . . .   | 758    |
| Épreuves au charbon. . . . .  | 759    |
| Photoglyptie. — Photogravure. . . . .   | 759    |

## APPENDICE AU LIVRE V

## PROPAGATION DE LA CHALEUR

|   |     |
|---|-----|
| CHAPITRE I. — <b>Chaleur rayonnante.</b>                                  |     |
| PROPAGATION PAR RAYONNEMENT. . . . .                                      | 761 |
| La chaleur traverse le vide. . . . .                                      | 761 |
| La chaleur traverse certains corps sans les échauffer. . . . .            | 762 |
| Propagation rectiligne. . . . .   | 762 |
| Intensités d'une même source à différentes distances. . . . .             | 762 |
| Appareil de Melloni. . . . .  | 763 |
| ÉMISSION. — Pouvoirs émissifs. . . . .                                    | 764 |
| Refroidissement. — Loi de Newton. . . . .                                 | 765 |
| RÉFLEXION, TRANSMISSION ET ABSORPTION. . . . .                            | 766 |
| Lois de la réflexion. — Miroirs ardents. . . . .                          | 766 |
| Pouvoirs réflecteurs. . . . .   | 768 |
| Diffusion. . . . .  | 769 |
| Transmission. — Corps diathermanes et corps athermanes. . . . .           | 769 |
| Décomposition par le prisme. — Radiations lumineuses et obscures. . . . . | 769 |
| Pouvoirs diathermanes. . . . .  | 770 |
| Applications. . . . .   | 772 |
| Absorption. — Pouvoirs absorbants. . . . .                                | 773 |
| Égalité des pouvoirs émissifs et absorbants. . . . .                      | 774 |
| Équilibre mobile de température. . . . .                                  | 775 |
| Réflexion apparente du froid. . . . .                                     | 775 |
| Identité de la chaleur et de la lumière. . . . .                          | 776 |
| CHAPITRE II. — <b>Conductibilité.</b>                                     |     |
| Conductibilité des solides. . . . .                                       | 777 |
| Coefficients de conductibilité. . . . .                                   | 778 |
| Courants produits dans les liquides ou dans les gaz. . . . .              | 779 |
| Conductibilité des liquides. . . . .                                      | 780 |
| Conductibilité des gaz. . . . .   | 780 |
| Applications. . . . .   | 781 |

## LIVRE VI

## MÉTÉOROLOGIE

|   | Pages. |   | Pages. |
|---|--------|---|--------|
| RÉPARTITION DE LA TEMPÉRATURE A LA SURFACE DE LA TERRE . . . . .                      | 785    | Relations des variations barométriques avec les variations de températures et avec les météores aqueux. | 802    |
| Observations thermométriques . . . . .  | 785    | Moyenne barométrique. — Influence de la position géographique. . . . .                                  | 803    |
| Variations de la température pendant le jour et pendant l'année. . . . .              | 786    | MÉTÉORES AQUEUX . . . . .   | 804    |
| Saisons météorologiques . . . . .   | 787    | Variations de l'état hygrométrique.   | 804    |
| Influence de l'altitude . . . . .   | 787    | Rosée. — Gelée blanche. . . . .   | 804    |
| Lignes isothermes, isothermes et isochimènes . . . . .                                | 788    | Givre ou frimas. . . . .  | 806    |
| Climats . . . . .   | 788    | Brouillards. — Nuages. . . . .  | 806    |
| Influence de la latitude. . . . .   | 790    | Pluie. — Neige. — Grêle. — Verglas. . . . .   | 809    |
| Climats maritimes et continentaux. . . . .  | 792    | ÉLECTRICITÉ ATMOSPHÉRIQUE. . . . .  | 811    |
| DES VENTS. — Causes principales. . . . .  | 794    | État électrique de l'air. . . . .   | 811    |
| Vents périodiques. — Brises, moussons. . . . .  | 795    | Identité entre les phénomènes de la foudre et ceux de l'électricité. . . . .                            | 812    |
| Vents constants. — Alizés. . . . .  | 795    | Nuages positifs et négatifs. . . . .  | 814    |
| Influence des contre-alizés et du Gulf-stream sur la température de l'Europe. . . . . | 796    | Foudre. — Éclairs. — Tonnerre. . . . .  | 814    |
| Vitesse des vents. . . . .  | 797    | Effets produits par la foudre. . . . .  | 816    |
| Trombes. — Cyclones. . . . .  | 798    | Paratonnerres . . . . .   | 817    |
| Lois des tempêtes. . . . .  | 798    | VARIATIONS DU MAGNÉTISME TERRESTRE . . . . .  | 820    |
| Service météorologique. . . . .   | 799    | Variations en un même lieu. . . . .   | 820    |
| Bourrasques ou dépressions. . . . .   | 800    | Variations à la surface du globe. . . . .   | 821    |
| OBSERVATIONS BAROMÉTRIQUES . . . . .  | 802    | MÉTÉORES LUMINEUX. . . . .  | 825    |
| Variations barométriques. . . . .   | 802    | Arc-en-ciel . . . . .   | 825    |
|   |        | Halos. — Couronnes. . . . .   | 825    |

## PROBLÈMES

|  |     |
|--|-----|
| PROBLÈMES SUR LA PESANTEUR ET L'HYDROSTATIQUE. . . . . | 827 |
| PROBLÈMES SUR LA CHALEUR. . . . .                      | 837 |
| PROBLÈMES SUR L'ÉLECTRICITÉ. . . . .                   | 845 |
| PROBLÈMES SUR L'ACOUSTIQUE. . . . .                    | 847 |
| PROBLÈMES SUR L'OPTIQUE. . . . .                       | 848 |



16423. — Paris, imprimerie A. Lahure, rue de Fleurus, 9.

BIBLIOTECA

000162



1030000374



