

PRÉCIS
DE PHYSIQUE

DU MÊME AUTEUR

NOTIONS ÉLÉMENTAIRES DE PHYSIQUE ET DE CHIMIE, pour la classe de sixième, 1 vol. in-18 de 287 pages, avec 201 figures dans le texte..... 3 fr.

COURS DE PHYSIQUE à l'usage des classes de lettres, divisé en 4 parties, 4 volumes in-18, avec très nombreuses figures.

CLASSE DE TROISIÈME: Pesanteur, hydrostatique, chaleur. 2 fr. 80

CLASSE DE SECONDE: Acoustique, optique, chaleur rayonnante 2 fr. 25

CLASSE DE RHÉTORIQUE: Électricité et magnétisme..... 2 fr. 25

CLASSE DE PHILOSOPHIE; Revision et compléments..... 2 fr. 25

COURS DE PHYSIQUE, pour la classe de mathématiques spéciales. Deuxième édition. 1 vol. grand in-8, avec 361 figures dans le texte 12 fr.

TRAITÉ DE PHYSIQUE ÉLÉMENTAIRE, de Ch. Drion et È. Fernet, entièrement revu et modifié par M. È. Fernet, 9^e édition, 1 vol. petit in-8 de 856 pages avec 708 figures dans le texte 8 fr.

PRÉCIS
DE PHYSIQUE

PAR

É. FERNET

ANCIEN PROFESSEUR AU LYCÉE SAINT-LOUIS
INSPECTEUR GÉNÉRAL DE L'INSTRUCTION PUBLIQUE,
RÉPÉTITEUR A L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE

DOUZIÈME ÉDITION

AVEC 284 FIGURES DANS LE TEXTE

PARIS

G. MASSON, ÉDITEUR

LIBRAIRE DE L'ACADÉMIE DE MÉDECINE

120, Boulevard Saint-Germain, en face de l'École de Médecine

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

PRÉCIS DE PHYSIQUE

PRÉLIMINAIRES

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 sa trajectoire ; il faut connaître encore la loi suivant laquelle il la parcourt. — Dans chacun des cas simples que nous avons à examiner, il est facile, comme on va le voir, 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 la position du point mobile, d'un point fixe pris sur la trajectoire. Une pareille relation prend le nom d'*équation du mouvement sur la trajectoire*.

2. Mouvement uniforme. — Le mouvement est dit *uniforme*, lorsque les espaces parcourus dans des temps égaux sont égaux, quels que soient ces temps.

On appelle *vitesse* d'un mouvement uniforme l'espace parcouru dans l'unité de temps. — L'unité de temps ordinairement adoptée est la seconde sexagésimale.

Désignons par v la vitesse d'un mouvement uniforme déterminé, cette vitesse étant exprimée en mètres. — Si, pour plus de simplicité, on convient de compter les espaces à partir du point où se trouvait le mobile à l'instant pris pour origine du temps, on voit immédiatement que l'espace parcouru e , au bout d'un temps t mesuré en secondes, est

$$(1) \quad e = vt.$$

Réciproquement, cette formule permet de déterminer la vitesse v d'un mouvement uniforme, si l'on connaît la valeur e de l'espace parcouru au bout d'un temps t ; car elle donne

$$(2) \quad v = \frac{e}{t}.$$

3. Mouvement varié. — Vitesse moyenne entre deux instants déterminés. — Vitesse à un instant déterminé. — On dit qu'un point est animé d'un *mouvement varié*, lorsque les espaces parcourus en des temps égaux ne sont pas égaux.

Soit AB (fig. 1) la trajectoire d'un mobile situé en A à l'instant pris pour origine du temps, et animé d'un mouvement varié. Soit AM l'espace parcouru au bout d'un temps t ; désignons-le par e . Soit Am l'espace par-

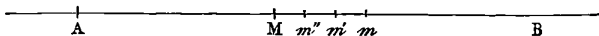


Fig. 1.

couru au bout du temps $t + \theta$; désignons-le par $e + \varepsilon$. L'espace Mm ou ε sera l'espace parcouru pendant l'intervalle de temps θ . On conçoit que le mobile aurait pu parcourir ce même espace, d'un mouvement uniforme, dans le même intervalle de temps, à la condition d'avoir une vitesse convenable, qui serait $\frac{\varepsilon}{\theta}$. Cette vitesse est ce qu'on nomme la *vitesse moyenne* du mobile entre les deux instants t et $t + \theta$: elle s'obtient, comme on voit, en divisant l'accroissement ε de l'espace parcouru, par l'accroissement θ du temps.

Considérons maintenant, au lieu de l'accroissement θ du temps t , un accroissement plus petit θ' ; l'espace parcouru AM se sera accru seulement de $Mm' = \varepsilon'$, et la vitesse moyenne entre le temps t et le temps $t + \theta'$ sera $\frac{\varepsilon'}{\theta'}$. De même, pour un accroissement de temps θ'' , l'accroissement d'espace étant $Mm'' = \varepsilon''$, la vitesse moyenne entre le temps t et le temps $t + \theta''$ serait $\frac{\varepsilon''}{\theta''}$, et ainsi de suite.

Ces quotients $\frac{\theta}{\varepsilon}, \frac{\varepsilon'}{\theta'}, \frac{\varepsilon''}{\theta''} \dots$ tendent en général vers une limite déterminée, quand on fait décroître indéfiniment les intervalles $\theta, \theta', \theta'' \dots$: cette limite est ce qu'on nomme la *vitesse à l'instant t*. Nous appellerons donc *vitesse à un instant déterminé* la limite vers laquelle tend le rapport de l'accroissement ε de l'espace à l'accroissement θ du temps, lorsque θ converge vers zéro.

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

4. Mouvement uniformément varié. — On dit qu'un point est animé d'un *mouvement uniformément varié*, lorsque sa vitesse varie de quantités égales en des temps égaux, quels que soient ces temps. — Le mouvement est *uniformément accéléré* ou *uniformément retardé*, selon que ces variations augmentent la vitesse ou la diminuent.

On appelle *accélération*, dans un pareil mouvement, la variation de la vitesse dans l'unité de temps. Elle est exprimée en unités de longueur, comme la vitesse. — Si l'on considère, en particulier, le cas où la vitesse reste constamment positive, on voit que le mouvement sera uniformément accéléré ou uniformément retardé, selon que l'accélération sera positive ou négative. — Nous allons examiner successivement chacune de ces deux espèces de mouvement.

1° Considérons un mobile animé d'un mouvement uniformément accéléré, depuis l'instant pris pour origine du temps. Soit v_0 sa vitesse initiale, et γ l'accélération; 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, qui donne la vitesse à chaque instant, peut se transformer en une autre qui donne l'espace parcouru e , espace que nous supposons compté à partir du point où se trouvait le mobile à l'origine du temps. On en déduit, en effet, par un raisonnement pour lequel nous renverrons aux Traités de mécanique, l'équation équivalente

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

Remarque. — Si l'on considère le cas particulier où la vitesse initiale v_0 est nulle, c'est-à-dire où le mobile part du repos, les deux formules précédentes deviennent

$$\begin{aligned} v &= \gamma t \\ e &= \frac{\gamma t^2}{2}; \end{aligned}$$

c'est-à-dire que *les vitesses sont proportionnelles aux temps, et les espaces parcourus sont proportionnels aux carrés des temps.* — L'une ou l'autre de ces deux lois suffit pour caractériser le mouvement.

2° Si l'on considère un mouvement uniformément retardé, en désignant par v la vitesse à l'origine du temps, et par γ la diminution de la vitesse dans l'unité de temps, on aura immédiatement, pour valeur de la vitesse au bout du temps t ,

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

d'où l'on déduit la valeur de l'espace parcouru e , compté à partir du point où se trouvait le mobile à l'origine du temps, et pris positivement dans le sens de la vitesse initiale v_0 ,

$$e = v_0 t - \frac{\gamma t^2}{2}.$$

On trouvera plus loin des applications de ces principes, dans les mouvements des corps sous l'action de la pesanteur.

5. Principe de l'inertie. — *Un corps matériel 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 matériel en repos, si aucune cause extérieure n'agit sur lui, demeure en repos : c'est ce qu'on peut appeler *l'inertie dans le repos* ;

2° Qu'un point matériel en mouvement, si aucune cause extérieure 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 Galilée : 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. — On appelle *force* toute cause capable de produire le mouvement, ou d'en modifier la nature.

L'existence d'une force 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'une force agit sur lui dans le sens même du mouvement, etc. — Ces effets des forces, se manifestant par la production ou les modifications du mouvement, peuvent être désignés sous le nom d'*effets dynamiques*.

Lorsque les points soumis à l'action des forces sont assujettis de manière à rester immobiles, l'existence de ces forces se manifeste par d'autres effets, que nous nommerons *effets statiques*. — C'est ainsi, par exemple, qu'un corps pesant, placé en repos sur un plan rigide horizontal, détermine sur ce plan une *pression*. Le même corps, suspendu à l'extrémité d'un fil et en repos, produit une *tension* du fil. Enfin, le même corps, suspendu à l'extrémité d'un ressort comme celui de la figure 2, détermine une *flexion* du ressort. — Ces divers effets peuvent évidemment servir, comme les précédents, à constater les effets des forces. Les uns et les autres permettent, comme on va le voir, d'en obtenir la mesure.

7. Mesure des forces. — On dit 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 sera confirmé par la vérification de ses conséquences : *Lorsque plusieurs forces agissent simultanément sur un point matériel, l'action de chacune d'elles est la même que si elle agissait seule.*

On dit alors qu'une force F est *double* d'une autre force f , lorsqu'elle produit, dans les mêmes conditions, le même effet que deux forces égales à f , agissant simultanément. — De même, 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 appelle *dynamomètres* des instruments qui sont destinés à mesurer les forces par les effets de flexion qu'elles font éprouver à un ressort élastique.

L'un des plus simples se compose d'une lame d'acier ABC (*fig. 2*) ayant la forme d'un V : à l'extrémité de chacune de ses branches A, C, est fixé un arc métallique qui traverse une ouverture pratiquée dans l'autre branche. — Supposons qu'on soutienne l'instrument par l'anneau D qui termine l'un de ces arcs, et qu'on suspende un poids de 1 kilogramme au crochet E qui termine l'autre arc. Le ressort ABC fléchit, et la grandeur de la force qui a déterminé cette flexion peut être caractérisée par la position du point de l'arc MD qui correspond maintenant à l'ouverture A. — Si donc on attache l'anneau à un point fixe, à l'aide d'une corde S (*fig. 3*), et qu'on applique au crochet une force quelconque B, par l'intermédiaire d'une autre corde R, et si la flexion est encore la même, la force agissant sur l'instrument sera dite *égale à un kilogramme*.

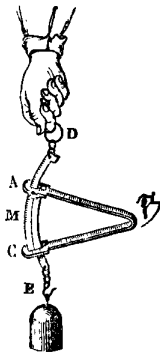


Fig. 2.

En suspendant successivement au crochet 2, 3, 4... poids d'un kilogramme (*fig. 2*), et marquant à chaque fois le point de l'arc MD qui correspond à l'ouverture A, on obtiendra une *graduation* de l'instrument. —

On pourra ensuite mesurer, par les flexions du ressort, des forces agissant sur le même instrument dans des directions quelconques (*fig. 3*). Une force sera dite de 5 kilogrammes, par exemple, lorsqu'elle produira sur le ressort la même flexion que 5 poids de 1 kilogramme, agissant verticalement sur lui.

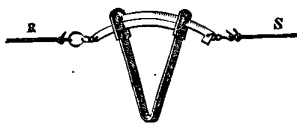


Fig. 3.

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 vérifié par la vérification de ses conséquences : *L'action d'une force sur un point matériel est indépendante du mouvement dont ce point est animé : elle est la même que si ce point était en repos.*

Ce principe étant admis, supposons qu'une force F, en agissant sur un point matériel primitivement au repos, lui imprime au bout d'une seconde une vitesse γ : si la force cessait alors d'agir, le point continuerait à se mouvoir, d'un mouvement rectiligne et uniforme, avec la vitesse γ (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 communiquera, au bout de ce temps, une nouvelle vitesse γ s'ajoutant à la première, en sorte que la vitesse au bout de deux secondes sera 2γ ; et ainsi de suite. Donc, au bout du temps t , la vitesse sera

$$v = \gamma t.$$

La démonstration s'applique également 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 constantes F et F' , et supposons qu'elles aient une commune mesure f , en sorte 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 représenter l'accélération par α . Donc, si n forces égales à f agissent simultanément sur le même mobile, puisque l'action de chacune d'elles est indépendante de celle des autres, 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 point, l'accélération produite sera $n'\alpha$. On a donc, en désignant par γ et γ' les accélérations imprimées par F et par F' ,

$$\gamma = n\alpha, \quad \gamma' = n'\alpha;$$

on en déduit

$$\frac{\gamma}{\gamma'} = \frac{n}{n'}$$

et par suite

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

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 γ'' qu'elle produirait serait encore le même : on a donc, pour toutes les forces appliquées à un même corps,

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

La valeur m de ce rapport constant est ce qu'on nomme la *masse* du corps.

Nous appellerons donc *masse* d'un corps *le nombre constant qui exprime le rapport d'une force constante quelconque à l'accélération qu'elle imprime à ce corps*. — La valeur de ce nombre dépend : 1° du choix de l'unité de force : l'unité ordinairement adoptée est le kilogramme ; 2° du choix de l'unité de longueur et du choix de l'unité de temps, puisque l'accélération est la variation éprouvée par la vitesse dans l'unité de temps : l'unité de longueur ordinairement adoptée est le mètre, l'unité de temps est la seconde.

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 tombant librement, 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 seule*.

Enfin, on peut se demander quelle est l'unité de masse déterminée par les divers choix d'unités qui viennent d'être indiquées. — Or, si l'on considère un corps dont la masse soit exprimée par 1 , on devra avoir, pour ce corps, $P = g$. L'unité de masse est donc la masse d'un corps dont le poids en un lieu déterminé est exprimé, en unités de poids, par le nombre qui exprime l'accélération de la chute libre, en unités de longueur, dans le même lieu. Par exemple, l'accélération de la chute des corps à Paris est, comme on le verra, $9^m,8088$; l'unité de masse est donc la masse d'un corps qui pèse, à Paris, $9^{kl},8088$.

12. Mesure des forces constantes, par les accélérations qu'elles produisent. — Outre l'emploi des *dynamomètres*, qui permettent de mesurer les forces constantes par les flexions qu'elles produisent sur un ressort en équilibre (8), nous avons maintenant un moyen de mesurer les forces par l'observation des mouvements qu'elles impriment à un corps soumis à leur action. Soit un corps dont on connaisse préalablement le poids P , en un lieu déterminé : en divisant le nombre P par le nombre g qui exprime l'accélération due à la pesanteur dans le même lieu, on connaîtra sa masse $m = \frac{P}{g}$. Dès lors, si l'on peut observer l'accélération γ 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 γ , la relation

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

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

$$F = m\gamma.$$

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 directement 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 représentera géométriquement une force par une droite partant du point d'application, dirigée suivant la direction même de la force, et égale à autant de fois l'unité de longueur que la force contient de fois l'unité de force.

Lorsqu'une force appliquée à un point A d'un corps solide (fig. 4) le

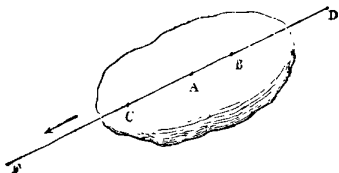


Fig. 4.

sollicite dans la direction AF, on voit aisément que l'effet de cette force ne serait pas changé si l'on supposait son point d'application transporté en un autre point C ou B du corps, situé sur la même direction : il en serait encore de même si on supposait la force appliquée en un point D

extérieur au corps, pourvu que l'on supposât, en même temps, ce point lié invariablement au corps. En d'autres termes, *le point d'application d'une force peut toujours être supposé transporté en un point quelconque de sa direction, pourvu qu'on suppose, en même temps, ce point lié invariablement au premier.*

14. Énoncé des règles de la composition des forces appliquées en un même point. — Lorsque plusieurs forces sont appliquées en un même point, on démontre, en Mécanique, que ces forces peuvent toujours être remplacées par une force unique ou *résultante*, produisant, à elle seule, le même effet que toutes les autres agissant simultanément.

Les règles à suivre, pour obtenir la résultante de plusieurs forces appliquées en un même point, peuvent s'énoncer de la manière suivante :

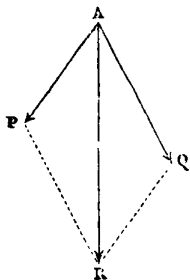


Fig. 5.

1° Deux forces appliquées en un point, dans la même direction et dans le même sens, ont une résultante égale à leur somme, et agissant dans la même direction et dans le même sens que les forces proposées.

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

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

3° Deux forces P, Q (fig. 5) 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, il suffit de composer d'abord deux des forces proposées 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 est la résultante du système tout entier.

15. **Énoncé des règles de la composition des forces parallèles.** — 1° Deux forces parallèles et de même sens P, Q (fig. 6), appliquées en deux points A, B d'un corps solide, ont une résultante R qui leur est parallèle, dirigée dans le même sens qu'elles, égale en gran-

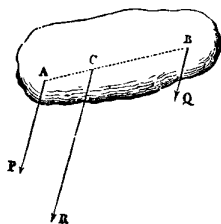


Fig. 6.

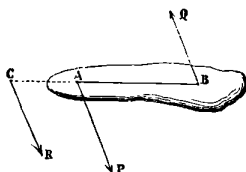


Fig. 7.

deur à leur somme, et placée de manière que sa direction partage la droite AB en deux parties AC, BC , qui soient inversement proportionnelles aux intensités de ces forces P et Q .

2° Deux forces parallèles de sens contraire et inégales, P, Q (fig. 7), 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 qu'elle rencontre le prolongement de la droite AB en un point C , tel que les distances AC, BC soient inversement proportionnelles aux intensités de ces forces P et Q .

Pour obtenir la résultante d'un nombre quelconque de forces parallèles et de même sens $p, p', p'' \dots$ (fig. 8), appliquées en divers points A, B, C, \dots d'un corps solide, il suffit de composer d'abord 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 est la résultante du système.

16. **Centre des forces parallèles.** — Soit un système de forces parallèles et dirigées dans le même sens, $p, p', p'' \dots$ (fig. 8), appliquées aux points A, B, C, \dots d'un corps solide. Supposons qu'on change la direc-

tion commune de ces forces (comme l'indiquent les forces marquées sur la figure en traits discontinus), sans changer ni leurs points d'application, ni leur parallélisme, ni leurs rapports d'intensité. On voit immédiatement que le point D de la droite AB, par lequel passe la première résultante partielle r , ne sera pas changé, puisque la position de ce point est simplement 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 doit passer toujours la résultante définitive. 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 dirigées dans le 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 de ces forces, sans changer leur parallélisme, ni leurs rapports d'intensité.

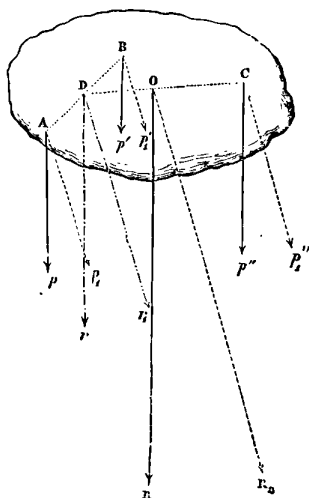


Fig. 8.

On appelle donc *centre des forces parallèles*, pour un système déterminé de forces parallèles et dirigées dans le 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 de ces forces, sans changer leur parallélisme, ni leurs rapports d'intensité.

17. Travail d'une force dont le point d'application se déplace dans la direction de la force elle-même. — Kilogrammètre. — Pour caractériser complètement l'effet produit par une force dont le point d'application se déplace, on doit tenir compte, non-seulement de la grandeur de cette force, mais aussi du déplacement qu'éprouve son point d'application. — De là la notion du *travail*. Nous en dirons quelques mots, en nous bornant au cas très-simple où le point d'application se déplace dans la direction même de la force.

Soient deux poids P et P', à élever à une même hauteur; si l'on considère comme ayant une valeur déterminée le travail effectué pour élever le poids 1 à cette même hauteur, il est évident que le travail effectué en élevant le poids P aura une valeur égale à la première multipliée par P, et que le travail effectué en élevant le poids P' aura une valeur égale à la première multipliée par P'. Donc les travaux effectués en élevant différents poids à une même hauteur sont proportionnels à ces poids.

Soit un même poids à élever successivement à deux hauteurs différentes H et H'; si l'on considère comme ayant une certaine valeur le travail ef-

fectué en élevant ce poids à la hauteur 1, le travail effectué en l'élevant à la hauteur H aura une valeur égale à la première multipliée par H, et le travail effectué en l'élevant à la hauteur H' aura une valeur égale à la première multipliée par H'. Donc les *travaux effectués en élevant un même poids à différentes hauteurs sont proportionnels à ces hauteurs*.

Dès lors, soit T le travail effectué en élevant un poids P à une hauteur H, et T' le travail effectué en élevant un poids P' à une hauteur H'; cherchons le rapport de T à T'. Appelons T₁ le travail qui correspondrait à l'élévation du poids P' à la hauteur H; on aura, d'après ce qui précède,

$$\frac{T}{T_1} = \frac{P}{P'}$$

et aussi

$$\frac{T_1}{T'} = \frac{H}{H'}$$

En multipliant ces égalités membre à membre, et supprimant le facteur commun T₁, il vient

$$\frac{T}{T'} = \frac{PH}{P'H'}$$

Donc *les travaux effectués en élevant des poids différents à des hauteurs différentes sont entre eux comme les produits de chacun des poids par la hauteur à laquelle il a été élevé*.

Convenons maintenant de prendre pour *unité de travail* le travail effectué en élevant 1 kilogramme à une hauteur de 1 mètre. Cette unité de travail est ce qu'on nomme le *kilogrammètre*. En faisant P' = 1 et H' = 1 dans la relation précédente, il vient

$$\frac{T}{1 \text{ kilogrammètre}} = \frac{P \times H}{1}$$

C'est-à-dire que la mesure, en kilogrammètres, du travail effectué en élevant P kilogrammes à H mètres, est égale au produit du poids par la hauteur.

En général, *le travail d'une force constante, dont le point d'application se déplace dans la direction de la force, a pour mesure, en kilogrammètres, le produit de la force exprimée en kilogrammes par le déplacement exprimé en mètres*.

Lorsque le déplacement a lieu dans le même sens où agit la force, le travail est dit *moteur*. Lorsque le déplacement a lieu en sens inverse de la direction de la force, le travail est dit *résistant*. — Ainsi, lorsqu'un corps pesant est animé d'un mouvement vertical de haut en bas, le travail de son poids est un travail moteur; lorsqu'il est animé d'un mouvement vertical de bas en haut, le travail de son poids est un travail résistant.

LIVRE PREMIER. — PESANTEUR ET HYDROSTATIQUE

CHAPITRE PREMIER

NOTIONS GÉNÉRALES SUR LA PESANTEUR

18. Pesanteur.—On nomme *pesanteur* la cause générale qui sollicite les corps à tomber vers la terre, et qui détermine ce mouvement quand les corps sont abandonnés à eux-mêmes. — Si quelques-uns paraissent, dans certaines circonstances, se soustraire à l'action de la pesanteur, comme la fumée, ou les gaz avec lesquels on gonfle les aérostats, ce ne sont là que des exceptions apparentes, qui sont expliquées plus loin.

19. Direction des forces dues à l'action de la pesanteur. — **Verticale.** — Quelque petites que soient les parties dans lesquelles on partage un corps, elles sont *pesantes* ; elles tombent, si aucun obstacle ne s'oppose à leur chute. — Cette remarque conduit à admettre que les particules les plus petites dans lesquelles on peut décomposer les corps par la pensée, sont sollicitées chacune par une force due à la pesanteur.

Or, si l'on prend divers corps pesants, tels que M (*fig. 9*), et que l'on suspende chacun d'eux par un fil flexible AM, ces divers fils étant placés au voisinage les uns des autres, on constate qu'ils se placent tous parallèlement entre eux. — Dès lors, chacun des fils AM prenant évidemment la direction de la force P qui sollicite le corps qui y est suspendu, on est conduit à considérer la pesanteur comme donnant naissance, par son action sur divers points matériels peu éloignés les uns des autres, à des forces qui sont toutes parallèles entre elles.

L'instrument simple qui est formé par un fil flexible, fixé à l'une de ses extrémités A (*fig. 9*) et supportant à l'autre extrémité un corps pesant M, prend le nom de *fil à plomb*. — En chaque point de l'espace A, on appelle *verticale* la direction que prend le fil à plomb passant par ce point.

Les verticales menées aux différents points de la terre sont toujours *perpendiculaires à la surface des eaux tranquilles* : d'où il résulte que leurs directions prolongées iraient toutes passer par le centre de la terre. — Donc deux verticales ne sont jamais rigoureusement parallèles ; mais, quand on considère des verticales menées par des points peu éloignés,



Fig. 9.

tels que les divers points d'un corps d'une petite étendue, elles doivent être regardées comme parallèles: nous admettrons ce parallélisme dans tout ce qui va suivre.

20. Poids, centre de gravité. — Les forces dues à l'action que la pesanteur exerce sur les diverses parties d'un corps étant considérées comme parallèles, on peut leur appliquer les règles de la composition de ces forces (15); elles ont donc une résultante qui leur est parallèle, dirigée dans le même sens qu'elles, et égale à leur somme. C'est cette résultante qui constitue le *poids* du corps. — On appelle donc *poids* d'un corps, la *résultante des actions de la pesanteur sur toutes les parties de ce corps*. C'est une force *verticale*, égale à la *somme* des forces composantes.

Supposons maintenant qu'après avoir déterminé la position de la résultante R (fig. 10) des forces verticales p, p', p'', \dots appliquées aux différents points A, B, C, \dots d'un corps solide, dans une position initiale déterminée, nous venons à faire tourner ce corps de manière à lui donner une position différente. Les forces dues à l'action de la pesanteur étant toujours verticales occuperont alors, par rapport au corps, des positions différentes p_1, p'_1, p''_1, \dots , mais on sait que leur résultante passera toujours par un point constant du corps (16). Ce point prend ici le nom de *centre de gravité*. — On appelle donc *centre de gravité* d'un corps, le *point par lequel passe constamment la résultante des actions de la pesanteur sur ses divers points*, quelle que soit la position que l'on donne à ce corps dans l'espace.

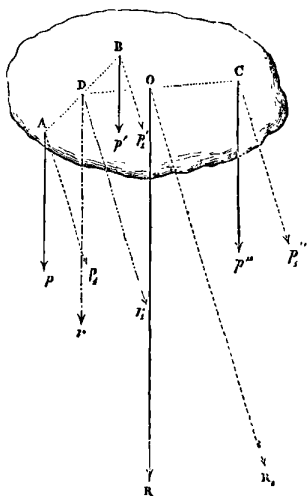


Fig. 10.

La considération du *poids* et du *centre de gravité* simplifiera évidemment la solution de toutes les questions dans lesquelles on devra tenir compte de l'action de la pesanteur sur un corps solide: — En effet, au lieu d'avoir à considérer le corps comme soumis à l'action de forces agissant sur tous ses points, on le considérera comme soumis à l'action d'une force unique, son poids, et l'on supposera cette force appliquée en son centre de gravité.

21. Détermination expérimentale du centre de gravité.

— Quand il s'agit d'un corps homogène et ayant une forme symétrique,

il est facile de déterminer géométriquement son centre de gravité, par de simples considérations de symétrie.

Mais, quelles que soient la structure du corps et sa forme, le centre de gravité peut se déterminer par l'expérience, de la manière suivante. — On suspend le corps, par l'un de ses points A, à l'extrémité d'un fil BA (fig. 11) :

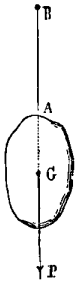


Fig. 11.

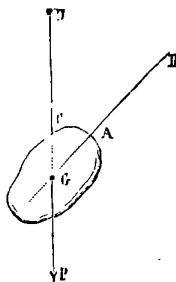


Fig. 12.

quand l'équilibre est établi, il est évident que le fil est tendu suivant la direction même de la force P qui le sollicite : donc le prolongement du fil doit passer par le centre de gravité du corps. Si l'on suspend maintenant le corps par un autre point C (fig. 12), le centre de gravité doit encore se trouver sur le prolongement du fil DC. Comme il y a toujours un centre de gravité, ces deux droites se rencontrent toujours, et leur point d'intersection fait connaître ce centre de gravité G.

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. C'est ce qui arrive, par exemple, pour un anneau, dont le centre de gravité est au centre de figure. — Alors, si l'on veut encore remplacer, pour la solution d'une question quelconque, l'ensemble des forces qui agissent sur tous les points du corps par une force unique appliquée au centre de gravité, on devra raisonner comme si ce point était lié invariablement au corps lui-même.

22. Détermination expérimentale du poids. — Poids relatifs des corps. — Le poids d'un même corps, c'est-à-dire la résultante des actions de la pesanteur sur ses divers points, éprouve de légères variations d'un point à un autre du globe. Ces variations ne peuvent être constatées avec précision que par l'observation du *pendule*, comme on le verra plus loin.

Nous indiquerons d'abord comment on obtient les rapports des poids de divers corps *en un même lieu*. — Dans la plupart des cas, on compare les poids des divers corps, c'est-à-dire les forces qui résultent des actions exercées sur eux par la pesanteur, à l'action exercée dans le même lieu sur un corps dont on prend le poids pour unité. On a choisi en France le *gramme*, c'est-à-dire le poids d'un centimètre cube d'eau distillée, à la température de 4 degrés centigrades. — On appelle alors *poids relatif* d'un corps le *nombre de grammes et de fractions de gramme qui est équivalent à son poids*.

Pour déterminer les poids relatifs des corps, on fait usage de la balance. IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

USAGE DE LA BALANCE.

23. **Balance.**— La partie principale de la balance est une barre rigide ou fléau AB (*fig. 15*) ; cette barre est traversée, en son milieu C, par un couteau d'acier trempé, qui fait saillie des deux côtés et dont l'arête inférieure repose, de part et d'autre, sur deux petits plans d'acier trempé ou d'agate ; l'un de ces plans est représenté, sur la figure, en avant du fléau ;

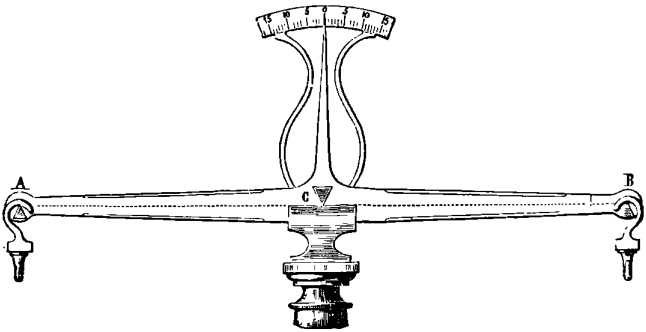


Fig. 15.

l'autre est en arrière. Le fléau peut osciller librement autour de cette arête ; à chacune de ses extrémités, est suspendu un plateau destiné à recevoir les corps, ou les poids marqués dont on doit avoir une collection jointe à la balance. — Pour donner aux plateaux le plus de mobilité possible, et pour faire que chacun d'eux repose toujours sur le fléau par le même point, on a fixé, aux extrémités A et B du fléau, deux couteaux qui tournent en haut leurs arêtes vives, et sur lesquels s'appuient les crochets qui supportent les plateaux. Une aiguille fixée perpendiculairement au fléau, en son milieu, se meut avec lui et parcourt un arc de cercle gradué, fixé à la colonne qui supporte l'appareil : le zéro de la graduation correspond à la position horizontale du fléau.

Les arêtes des trois couteaux A, C, B étant parallèles et situées dans un même plan, nous les supposerons réduites à trois points situés en ligne droite ; et nous appellerons *bras du fléau* les distances du couteau C à chacun des couteaux A et B.

24. **Méthode ordinaire de pesée.** — La méthode de pesée la plus simple consiste à déposer dans l'un des plateaux le corps dont on cherche le poids, et à placer successivement des poids marqués dans l'autre plateau, jusqu'à ce qu'on parvienne, après quelques tâtonnements,

à faire que le fléau s'arrête dans la position horizontale. — On admet alors que la somme des poids marqués qui se trouvent dans le second plateau représente le poids du corps qui est dans le premier.

En faisant usage de cette méthode, on admet donc :

1° Que la balance est *juste*, c'est-à-dire que le fléau se tient horizontal quand les poids placés dans les plateaux sont égaux.

2° Que la balance est *sensible*, c'est-à-dire qu'un poids très-petit, ajouté ou retranché dans le second plateau, dérangerait le fléau de la position horizontale.

Nous allons indiquer comment on peut réaliser ces conditions dans la construction de la balance, et surtout comment on peut vérifier, par l'expérience, si elles sont en effet réalisées.

25. Conditions de justesse. — Constatation expérimentale de la justesse.— Pour qu'une balance soit juste, c'est-à-dire pour que son fléau se tienne horizontal quand les poids placés dans les plateaux sont égaux, on démontre qu'elle doit satisfaire aux deux conditions géométriques suivantes, conditions que le constructeur doit chercher à réaliser : 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.

La balance une fois construite, il est facile de 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 en équilibre dans la position horizontale, c'est que, dans cette position, le centre de gravité de la partie mobile se trouve dans la verticale du point de suspension : on peut donc affirmer que ce centre de gravité est sur une perpendiculaire à la ligne du fléau passant par le point de suspension, ce qui constitue la première condition de justesse. — S'il n'en était pas ainsi, on pourrait toujours corriger le défaut de l'instrument, en ajoutant, *une fois pour toutes*, une charge suffisante du côté qui paraîtrait trop léger.

2° Pour vérifier la seconde condition de justesse, c'est-à-dire l'égalité des bras, on place un corps quelconque dans l'un des plateaux, et on ajoute progressivement de la grenaille de plomb ou du sable dans l'autre plateau, jusqu'à ce que l'aiguille s'arrête au zéro. L'équilibre étant ainsi établi, on transporte dans le plateau de droite la charge qui était à gauche, et réciproquement : si l'aiguille revient au zéro, on peut affirmer que les bras sont égaux. En effet, si l'un des bras, AC par exemple, 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 mesurer, on aurait placé la plus petite en A, c'est-à-dire du

côté du bras le plus petit, et l'équilibre aurait été détruit. — Donc, si le fléau reste horizontal, les bras sont égaux et la balance est définitivement juste.

26. Conditions de sensibilité. — On cherche ordinairement, en construisant une balance, à lui donner une sensibilité *constante*, c'est-à-dire à faire que, l'équilibre étant établi, l'addition d'un poids déterminé fasse toujours incliner le fléau du même angle, quelle que soit la valeur absolue de la charge primitive. — La théorie démontre que, pour cela, la condition géométrique nécessaire et suffisante est *que les trois couteaux soient en ligne droite*.

On cherche, en outre, à donner à la balance *le plus de sensibilité possible*; c'est-à-dire à faire 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. — La théorie démontre qu'il faut, pour cela, *que les bras du fléau soient aussi longs et aussi légers que possible, et le centre de gravité du fléau aussi voisin que possible du point de suspension*.

Une fois la balance construite, on évaluera son degré de sensibilité en établissant d'abord l'équilibre comme il a été dit, puis cherchant quel est le poids qu'il faut ajouter dans l'un des plateaux pour faire incliner le fléau d'un angle appréciable. S'il suffit, par exemple, d'un milligramme, on dira que la balance est *sensible au milligramme*.

Il est très-rare qu'une balance ayant une grande sensibilité absolue puisse conserver cette sensibilité sous des charges un peu grandes. Des charges considérables font fléchir le fléau, et les trois couteaux ne restent plus en ligne droite. On construit alors, pour les divers usages, des balances de dimensions diverses. — Les unes sont spécialement destinées à peser des poids de quelques grammes; elles ont un fléau très-léger et très-faible, et peuvent facilement être rendues sensibles au milligramme, ou au demi-milligramme. — Les autres, destinés aux poids de plusieurs kilogrammes, ont un fléau plus lourd et plus résistant, qui peut supporter des charges assez grandes sans fléchir: ces balances sont alors tout au plus sensibles au centigramme; mais une erreur de quelques centigrammes sur un poids de plusieurs kilogrammes a peu d'importance, en sorte que ces balances peuvent avoir une *sensibilité relative* comparable à celle des balances les plus délicates, à condition qu'on les emploie toujours à évaluer des poids assez considérables.

27. Méthode de la double pesée. — 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.

On place dans l'un des plateaux le corps à peser, et on lui fait équilibre au moyen d'une *tare* placée dans l'autre plateau, c'est-à-dire au moyen d'une quantité de grenaille de plomb ou de sable, qu'on règle de ma

nière que l'aiguille vienne s'arrêter au zéro. On enlève ensuite le corps, et l'on met des poids marqués à sa place, dans le même plateau, jusqu'à ce que l'aiguille revienne s'arrêter au zéro. La somme de ces poids représente exactement le poids du corps, indépendamment de la justesse de la balance : en effet, le corps et les poids ont fait successivement équilibre à la tare, dans des conditions identiques. — Pour que le résultat ait quelque précision, il faut que la balance soit sensible, afin qu'il n'y ait pas d'indécision quant au nombre exact des poids à employer pour rétablir l'équilibre.

28. Balance de précision. — Les balances dont on fait usage dans les laboratoires ou dans l'industrie, pour les pesées précises, offrent quelques détails de construction qui sont destinés surtout à assurer et à conserver la *sensibilité*.

Les oscillations du fléau étant accusées par les mouvements de l'aiguille sur son cadran, elles seront évidemment d'autant plus appréciables que le rayon du cercle sera plus grand, c'est-à-dire que l'aiguille sera plus longue. Pour accroître la longueur de l'aiguille sans augmenter la hauteur de l'instrument, on emploie une aiguille descendante *ab* (fig. 14),

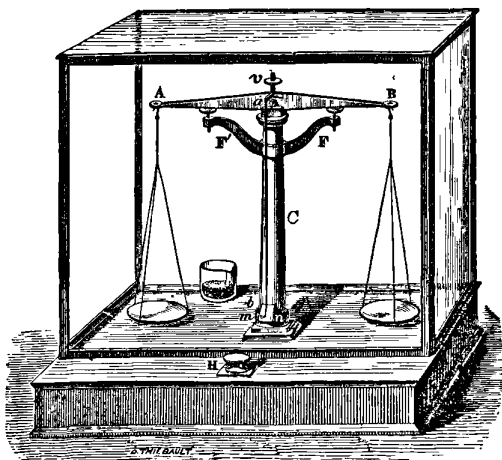


Fig. 14.

dont l'extrémité se meut sur un petit arc de cercle divisé *mn*, fixé à la partie inférieure de la colonne.

Les plans d'agate qui doivent supporter les couteaux autour desquels s'effectue le mouvement du fléau sont fixés à l'extrémité d'une tige qui

est intérieure à la colonne C de la balance : lorsqu'on soulève cette tige, au moyen d'un système de leviers qui correspond au bouton H extérieur à la cage, les plans d'agate soulèvent eux-mêmes le fléau, qui oscille alors librement. Au contraire, lorsqu'on laisse descendre cette tige, le fléau est retenu dans sa descente par les deux fourchettes fixes F, F', et, la tige continuant à s'abaisser, les couteaux restent à une certaine distance des plans d'agate : on évite ainsi que les couteaux ne s'usent par le frottement, quand la balance n'est pas en expérience.

Une virole métallique *v*, mobile sur un pas de vis, permet de régler, dans certaines limites, la sensibilité de la balance, en faisant varier un peu la distance du centre de gravité du fléau au point d'appui (26).

Une cage de verre environne la balance, et la préserve des mouvements qui pourraient être produits par les courants d'air. — On évite que les pièces d'acier ne s'oxydent, en maintenant toujours dans la cage un vase contenant de la chaux vive ou de l'acide sulfurique, afin de dessécher l'air intérieur.

CHUTE DES CORPS

29. 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'ils mettent, pour venir rencontrer le sol, des temps très-différents. Ces différences sont dues uniquement à la résistance de l'air : c'est ce que prouve l'expérience suivante.

Un tube de verre (*fig. 15*), ayant environ 2 mètres de long, et fermé à ses deux extrémités par des montures de cuivre, contient divers corps tels que des grains de plomb, de petits morceaux de papier, des barbes de plume. On fait le vide dans ce tube, en adaptant sur la machine pneumatique la monture à robinet qui est à l'une des extrémités ; puis, après avoir fermé le robinet, on saisit le tube avec les deux mains, et, en le retournant brusquement, on fait tomber les corps dans toute sa longueur. On constate qu'ils arrivent tous *au même instant* à l'extrémité inférieure. — Si l'on ouvre 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 le plomb : le retard est d'autant plus marqué qu'on a laissé rentrer plus d'air.

30. Détermination expérimentale des lois de la chute des corps. — Puisque tous les corps prennent, dans le vide, sous l'influence de la pesanteur, des mouvements identiques, il suffit d'étudier les lois de la chute pour *un seul corps*. Mais la détermination directe de ces lois, par une expérience qui consisterait à mesurer les espaces parcourus au bout

de temps successifs par un corps tombant dans le vide, présenterait des difficultés pratiques que l'on conçoit sans peine. — On a eu recours à



Fig. 15.

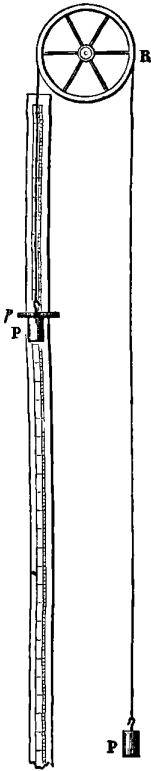


Fig. 16.



Fig. 17.



Fig. 18.



Fig. 19.

divers artifices, parmi lesquels nous étudierons la machine d'Atwood et l'appareil du général Morin.

31. **Machine d'Atwood.** — La machine d'Atwood se compose essentiellement d'une poulie très-légère R (fig. 16), sur la gorge de laquelle passe un fil de soie, supportant à ses deux extrémités des poids égaux P, P. On fait en sorte que le mouvement de cette poulie, autour de son axe, ne développe que des frottements négligeables; nous suppo-

serons, en indiquant la théorie de l'expérience, que ces frottements soient nuls. — Le système étant en repos, si l'on place un poids additionnel p sur l'un des poids, sur celui de gauche par exemple, le système se met en mouvement; mais comme la seule action de la force p doit mettre en mouvement, en même temps, les deux poids fixés aux extrémités du fil, on conçoit que ce mouvement doit être plus lent que celui de la chute libre. — Nous allons l'étudier d'abord, nous verrons ensuite comment il peut conduire aux lois de la chute libre.

Pour observer le mouvement, on emploie une règle verticale divisée (fig. 17), le long de laquelle descend le poids $P + p$. Il est maintenu au zéro de cette règle, jusqu'au moment où le battement d'une horloge jointe à l'appareil marque le commencement d'une seconde déterminée; le poids est alors abandonné; on cherche, par des tâtonnements, et en recommençant plusieurs fois l'expérience, en quel point de la règle on doit placer une plaque horizontale B, fixée à un curseur qui s'applique sur la règle, pour qu'elle soit frappée par ce poids à l'instant où l'on entend le battement de l'horloge qui termine cette seconde. La mesure de la distance qui sépare cette plaque du zéro donne l'espace e_1 parcouru au bout d'une seconde. — On détermine de la même manière, et en répétant les mêmes tâtonnements, les espaces e_2, e_3, \dots parcourus en 2, 3... secondes (fig. 18 et 19). En comparant entre eux ces résultats, on trouve que les espaces e_1, e_2, e_3, \dots sont entre eux comme les nombres 1, 4, 9... c'est-à-dire comme les carrés des temps. C'est ce qu'on appelle la loi des espaces.

On peut également déterminer, par une expérience directe, la loi des vitesses. — Pour cela, on emploie un autre curseur, portant un anneau A (fig. 20), qui laisse passer le poids P sans le toucher, mais qui arrête le poids additionnel p , dont la forme est allongée. On place d'abord l'anneau à la division e_1 , de manière que le poids additionnel p soit enlevé au bout d'une seconde; à partir de ce moment, le poids P continue à descendre d'un mouvement uniforme, avec la vitesse qu'il possédait au moment de la suppression du poids p (5, 2°). On cherche donc en quel point on doit placer la plaque B, pour qu'elle soit rencontrée une seconde après la suppression du poids p ; la distance des points A et B donne l'espace parcouru en une seconde, avec ce mouve-

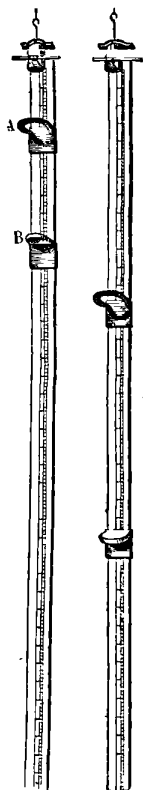


Fig. 20. Fig. 21.

ment 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. 21). On trouve alors 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* (*).

On a donc ainsi deux lois expérimentales, dont une seule suffirait pour établir que le mouvement du poids additionnel, dans la machine d'Atwood, est *uniformément accéléré* (4, 1^o, Rem.). — Il est facile d'en conclure que le mouvement d'un corps tombant en chute libre est de même espèce. En effet, soit γ l'accélération dans l'expérience précédente : c'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 tout le système suspendu aux deux extrémités du fil. Si ce même système tombait en chute libre, il serait sollicité par la force $2P + p$, et si l'on désigne par g l'accélération de ce mouvement, on aura, d'après le principe de la proportionnalité des forces aux accélérations qu'elles imprimant à un même système (10) :

$$\frac{g}{\gamma} = \frac{2P + p}{p},$$

d'où l'on tire :

$$g = \gamma \frac{2P + p}{p}.$$

Donc l'accélération g est constante, aussi bien que γ , seulement elle a une valeur beaucoup plus grande. — On voit donc 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'en déterminer plus facilement les lois, et cela, sans avoir à se préoccuper de l'influence de la résistance de l'air.

On peut enfin remarquer que, *théoriquement*, la valeur numérique de l'accélération g est déterminée par ces expériences, puisqu'on peut mesurer γ comme on vient de le voir. Mais, en réalité, cette mesure de g n'aurait aucune précision, à cause des erreurs inhérentes au mode d'expérimentation. — La machine d'Atwood doit être considérée comme servant exclusivement à vérifier les *lois* du mouvement.

(*) Si, prenant les résultats numériques fournis par ces expériences, on compare la vitesse v_1 à l'espace 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 précédentes (4, 1^o, Rem.), il vient

$$v_1 = \gamma \quad e_1 = \frac{\gamma}{2}$$

et par suite $v_1 = 2e_1$. LILLIAD - Université Lille 1

32. Appareil du général Morin. — Un cylindre de bois vertical (fig. 22) est animé d'un mouvement de rotation uniforme autour de son axe TT' . Sa surface est couverte d'une feuille de papier. Au niveau de sa base supérieure se trouve un corps pesant, de forme cylindro-conique D , qui porte un crayon horizontal dont la pointe appuie légèrement sur le papier et trace ainsi un cercle horizontal lorsque D est immobile. — Si l'on vient à décrocher brusquement ce corps pendant que le cylindre est en mouvement, le crayon trace une courbe $CMNPB$ sur la feuille qui couvre la surface du cylindre.

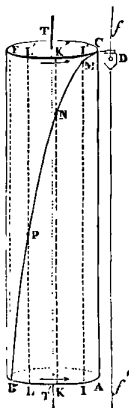


Fig. 22.

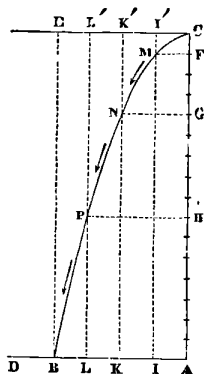


Fig. 25.

Coupons maintenant cette feuille suivant la verticale CA qui passe par le point de départ C du crayon, et développons-la sur un plan (fig. 25);

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, et soient M, N, P, \dots , les points où elles rencontrent la courbe. Lorsque, pendant l'expérience, le crayon s'est trouvé en M , la génératrice $I'I$ 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 $K'K$ qui avait pris la place de CA . Or, puisque le mouvement de rotation était uniforme, ces substitutions ont eu lieu à des intervalles de temps égaux, ou, en d'autres termes, les temps qu'il a fallu pour que le crayon arrivât aux points M, N, P, \dots peuvent être considérés comme mesurés par les distances CI', CK', CL', \dots , c'est-à-dire qu'ils sont entre eux comme les nombres 1, 2, 3... D'autre part, les espaces décrits verticalement par le crayon à ces mêmes instants sont $IM, K'N, L'P, \dots$; 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 1, 2, 3...

Donc les espaces parcourus en chute libre sont proportionnels aux carrés des temps : cette loi suffit pour caractériser un mouvement uniformément accéléré (4, 1^o, Rem.). — L'effet produit par la résistance de l'air est ici négligeable, à cause de la grande densité du corps.

L'appareil du général Morin, pas plus que la machine d'Atwood, ne peut servir à mesurer avec précision la valeur numérique de g ; cette mesure s'effectue à l'aide du pendule.

PENDULE

33. Pendule. — On donne le nom de *pendule simple* à un instrument idéal, pratiquement irréalisable, qui se composerait d'un point matériel suspendu à l'extrémité d'un fil sans poids, parfaitement flexible et inextensible. — Pour se rapprocher de ces conditions, on peut employer une petite sphère pesante M (fig. 24), suspendue à un fil aussi flexible et aussi fin que possible : ce fil sera fixé à son autre extrémité A .

L'instrument est en équilibre sous l'action de la pesanteur, lorsque le fil est vertical (19) ; mais si on l'amène dans la position AM' et qu'on

l'abandonne ensuite, l'équilibre n'existe plus. 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, dans le plan $M'AM$, 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

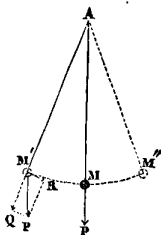


Fig. 24.

poids, agissant maintenant en sens contraire du mouvement, diminue peu à peu la vitesse ; celle-ci devient nulle en un point M'' qui, d'après la théorie, est le point symétrique de M' par rapport à AM . La sphère revient alors vers M , puis en M' , et accomplit ainsi une série de mouvements alternatifs. — On nomme *oscillation* le mouvement du pendule, de l'une des positions extrêmes AM' à la position extrême opposée AM'' ; l'*amplitude* de l'oscillation est l'angle $M'AM''$.

34. Isochronisme des petites oscillations. — Lorsqu'on fait osciller un pendule, on reconnaît que, contrairement à la théorie, les amplitudes des oscillations successives ne restent pas égales, mais vont en diminuant peu à peu : ce résultat est dû à la résistance de l'air et à celles qui se développent toujours au point de suspension, de quelque manière que le fil soit assujéti. — Malgré la diminution d'amplitude, la *durée* de chacune des oscillations reste constante. Cette loi, découverte par Galilée en observant les oscillations d'une lampe suspendue à la voûte de la cathédrale de Pise, n'est applicable qu'à des oscillations d'amplitudes très-petites. On l'énonce ordinairement, en disant que les oscillations

très-petites sont isochrones. — On la vérifie par l'expérience en faisant osciller un pendule, et déterminant, avec une montre à secondes, la durée de 100 oscillations ; puis, plus tard, la durée de 100 autres, et ainsi de suite.

C'est cette loi de l'isochronisme qui explique comment on régularise le mouvement des horloges, en rendant ce mouvement solidaire de celui d'un balancier qui oscille comme un pendule.

35. Application du pendule à la détermination des variations d'intensité de la pesanteur. — La théorie mathématique du pendule établit que la durée d'une oscillation très-petite est donnée par la formule

$$(1) \quad t = \pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

dans laquelle t est la durée de l'oscillation exprimée en secondes, π le rapport de la circonférence au diamètre, l la longueur du pendule en mètres, et g l'accélération que prennent les corps tombant en chute libre, dans le lieu même de l'expérience.

Supposons donc que l'on connaisse d'une manière précise la *longueur* l d'un pendule, c'est-à-dire la distance du point de suspension A au centre de la sphère M (*fig. 24*), et que l'on détermine avec soin la durée t d'une oscillation (ce qu'on fera en observant le temps que met le pendule à faire un très-grand nombre d'oscillations) ; la formule (1) permettra de calculer avec précision la valeur de g , pour le lieu où l'expérience aura été faite. — Or l'expérience, répétée ensuite en un lieu suffisamment éloigné du premier, *avec le même pendule*, fournira une autre valeur de la durée t' , et par suite une autre valeur de l'accélération g' . — Ainsi de suite, pour les différents points de la terre. — On en conclut que les accélérations dues à la pesanteur varient aux divers points du globe.

D'autre part, les accélérations produites par la pesanteur sur un même corps, en différents lieux, sont proportionnelles aux forces développées par l'action qu'elle exerce encore sur lui (1). — De là résulte qu'on peut considérer les valeurs de g comme mesurant les *intensités de la pesanteur* aux divers points du globe.

L'observation du pendule a montré que l'intensité de la pesanteur va en augmentant quand on s'éloigne de l'équateur terrestre pour se rapprocher des pôles : d'après les mesures de Borda, sa valeur exacte est, à l'équateur, 9^m,7800 ; à Paris, 9^m,8088 ; à la latitude de 80°, 9^m,8295. — L'observation du pendule a montré également que, à latitude égale, l'intensité de la pesanteur va en décroissant à mesure qu'on s'élève à une plus grande hauteur au-dessus de la surface de la mer.

CHAPITRE II

HYDROSTATIQUE

36. Définition des liquides et des gaz. — Les *corps solides*, dont nous nous sommes occupés jusqu'ici, peuvent être définis par ce caractère, qu'il existe entre leurs diverses parties une liaison telle, qu'elles conservent toujours, à une même température, une position invariable les unes par rapport aux autres. — En d'autres termes, on appelle *solide* un corps qui conserve toujours *une forme et un volume constants*, à une même température.

Un *corps liquide* est un corps dont le volume reste constant, mais dont la forme dépend toujours de celle du vase qui le contient; tels sont le mercure, l'eau. — Ces propriétés peuvent être interprétées en considérant une masse d'eau, par exemple, comme formée de molécules qui peuvent glisser les unes autour des autres, en conservant les mêmes distances moyennes, et de façon que le système se moule toujours sur la surface intérieure des vases dans lesquels cette masse d'eau sera placée.

Un *corps gazeux* est un corps dont la forme et le volume sont essentiellement variables, et qui tend généralement à occuper en totalité l'espace dans lequel il peut s'étendre; tels sont l'air, l'hydrogène. — Un gaz exerce en effet toujours, sur les parois des enveloppes qui le contiennent, un effort qui tend à les agrandir, et qu'on nomme la *tension* ou la *force élastique* du gaz.

Cette propriété des gaz est mise en évidence par l'expérience suivante. Une vessie fermée par un robinet *r* (fig. 25), et contenant un peu d'air, est placée sous une cloche dont l'intérieur communique avec les conduits d'une machine pneumatique; lorsque, en faisant fonctionner la machine, on enlève l'air qui entoure la vessie, on la voit se gonfler jusqu'à remplir presque complètement la cloche: donc, si la vessie ne se distendait pas lorsqu'elle était à l'air libre, c'est que la tension du gaz qu'elle contient était équilibrée par celle du gaz environnant. — La vessie s'affaisse de



Fig. 25.

nouveau dès qu'on laisse rentrer l'air dans la cloche, par le robinet R.

Ces résultats de l'expérience peuvent s'interpréter en considérant un gaz comme formé de molécules qui tendent toujours à s'écartier les unes des autres, de sorte que leur ensemble, occupant toujours tout l'espace qui lui est offert, exerce encore une pression sur les obstacles qui empêchent son volume de s'accroître davantage.

57. La force élastique d'un gaz augmente quand on diminue son volume. — Nous verrons plus loin quelle est la relation précise qu'on peut établir entre les valeurs de la force élastique d'une même masse gazeuse et les volumes qu'elle peut acquérir. L'expérience suivante montre simplement que la force élastique d'un gaz *augmente* quand on *diminue* son volume. Un tube de verre épais AB (fig. 26) est

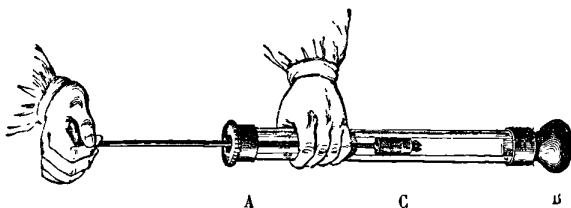


Fig. 26. — Briquet à air.

mastiqué dans une monture qui ferme l'extrémité B : par l'autre extrémité, on introduit un piston C garni de cuir et bien graissé ; on enferme ainsi dans l'appareil un certain volume d'air. On constate d'abord que, si l'on appuie avec la main sur la tige du piston, on peut l'enfoncer assez loin dans le tube, ce qui prouve que le volume des gaz diminue, pour des pressions qui ne feraient pas varier d'une manière appréciable le volume d'un liquide. On observe, en outre, que la résistance offerte par le gaz s'accroît à mesure qu'on en réduit le volume.

Cet appareil a reçu le nom de *briquet à air*, parce qu'une compression brusque de l'air produit une élévation de température, qui peut allumer un morceau d'amadou fixé à la face intérieure du piston.

38. Fluides en général. — But de l'hydrostatique. — Les liquides et les gaz se ressemblent par ce caractère, que leur *forme* est essentiellement 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 *fluides*.

Mais d'autre part, il y a, entre les liquides et les gaz, une différence essentielle. — Des variations de pression considérables ne font éprouver aux liquides que des variations de volume imperceptibles. Au contraire,

les accroissements de pression font toujours éprouver aux gaz des diminutions de volume qui leur sont sensiblement proportionnelles, ainsi qu'on le verra plus loin. — Aussi, désigne-t-on souvent les liquides sous le nom de *fluides incompressibles*, et les gaz sous le nom de *fluides élastiques*.

L'hydrostatique est l'étude des fluides en général, considérés à l'état d'équilibre. — Nous nous occuperons d'abord des principes relatifs à l'équilibre des liquides.

ÉQUILIBRE DES LIQUIDES

59. Principe fondamental. Transmission des pressions.

— *Lorsqu'une pression déterminée s'exerce sur une portion plane de la surface d'un liquide, elle se transmet avec la même intensité à toute portion de paroi plane ayant une surface égale.*

Ce principe, qui est dû à Pascal, peut être vérifié approximativement par l'expérience, de la manière suivante. — Soient deux tubes cylindriques verticaux A et B (fig. 27), contenant chacun un piston P, p, et réunis

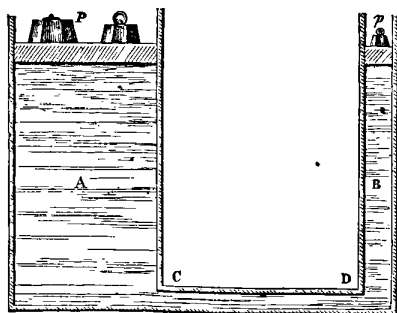


Fig. 27.

à leur base par un tube de communication CD; l'espace compris intérieurement entre les pistons est plein d'eau. Si la surface du piston P est, par exemple, 100 fois plus grande que celle du piston p, et si l'on place sur le piston p un poids de 4 kilogrammes, il faudra, pour empêcher le piston P de s'élever dans le cylindre A, le charger d'un poids 100 fois plus grand, c'est-à-dire d'un poids de

400 kilogrammes. — Donc chacune des parties égales à p, dans lesquelles on peut décomposer par la pensée le piston P, éprouve une pression qui est la centième partie de 400 kilogrammes, c'est-à-dire la pression même qui s'exerce sur le piston p.

Nous avons donné, à l'enveloppe ACDB qui contient le liquide, une forme particulière : cette forme est telle que, d'une part, la pression exercée sur le piston p puisse être produite par un poids placé sur ce piston, et que, d'autre part, la pression supportée par le piston P puisse être équilibrée par l'addition d'un poids. Mais le principe est général.

— Soit un liquide placé dans une enveloppe de forme quelconque MNPQ (fig. 28) qu'il remplit complètement. Supposons que la paroi MN offre une ouverture garnie d'un piston p , dont la surface soit de 20 centimètres carrés, et qu'on exerce, *perpendiculairement à la surface de ce piston*, une pression de 4 kilogrammes, c'est-à-dire une pression égale à la pression verticale qu'exercerait un poids de 4 kilogrammes placé sur une surface horizontale. Un piston p' , adapté à une ouverture de la paroi NP et ayant une surface de 60 centimètres carrés, c'est-à-dire triple de la précédente, supportera intérieurement et *perpendiculairement à sa surface* une pression triple, en sorte que, pour la maintenir en équilibre, il faudra exercer extérieurement et *perpendiculairement à sa surface* une pression de 12 kilogrammes. De même, un piston p'' , placé en un autre point quelconque de l'enveloppe et offrant une surface de 10 centimètres carrés, sera maintenu en équilibre par une pression de 2 kilogrammes. — Tout ce qui

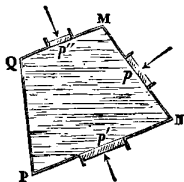


Fig. 28.

vient d'être dit n'est d'ailleurs rigoureusement vrai qu'autant qu'on peut négliger les pressions dues au poids du liquide lui-même ; si ces pressions ne sont pas négligeables, on doit considérer la pression totale que supporte une portion de paroi, comme la résultante de la pression transmise et de la pression due au poids du liquide. — On verra plus loin comment cette dernière pression peut s'évaluer.

Enfin, dans tous les cas, les vérifications expérimentales du genre de celles que nous venons d'indiquer sont toujours assez grossières, à cause des frottements qui s'exercent à la surface des pistons : on doit considérer le principe de la *transmission des pressions* comme démontré plutôt par la vérification de ses diverses conséquences que par des expériences directes.

40. Application du principe précédent à la presse hydraulique. — L'appareil de la figure 27 n'est autre que la *presse hydraulique*, réduite à ses éléments essentiels. Il nous reste à indiquer quelques-uns des détails de construction qui la rendent applicable aux usages industriels.

Le petit piston, fixé à la partie inférieure de la tige KF (fig. 29), est mis en mouvement au moyen d'un levier GH mobile autour du point H ; le cylindre ou *corps de pompe* dans lequel se meut ce piston plonge dans un réservoir d'eau R ; les mouvements alternatifs du piston ont pour effet d'aspirer l'eau du réservoir dans le corps de pompe, quand le piston s'élève, et de refouler cette eau, quand le piston s'abaisse, dans un tube latéral qu'on aperçoit en avant de la figure ; ce tube vient s'ouvrir dans le cylindre qui contient le gros piston. Le gros piston porte à sa partie supérieure, un plateau

C; au-dessus du plateau, se trouve une plate-forme D, invariablement reliée au cylindre par des colonnes de fonte E, E. Les objets que l'on veut soumettre à l'action de la presse sont placés entre C et D; lorsque, en faisant manœuvrer avec la main l'extrémité G du levier, on refoule successivement l'eau du réservoir dans le gros cylindre, le plateau C s'élève,

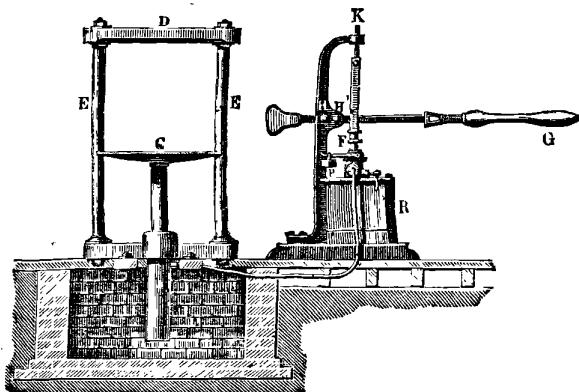


Fig. 29. — Presse hydraulique.

et comprime ces corps contre la plate-forme D. — La pression qu'on exerce en G donne naissance, grâce à l'emploi du levier, à une pression plus grande sur le piston F, puisque ces pressions sont inversement proportionnelles aux deux bras du levier : d'autre part, la pression exercée sur le plateau F produit sous le gros piston une pression beaucoup plus grande encore, puisque les pressions sont directement proportionnelles aux surfaces de ces pistons. On voit donc que, avec un effort relativement faible, on peut exercer des pressions extrêmement considérables.

Il est facile de concevoir l'importance d'éviter ici les fuites, qui pourraient laisser échapper l'eau sur le contour du gros piston. Pour y parvenir, on fait usage d'un *piston plongeur*, c'est-à-dire d'une masse cylindrique de métal, d'une hauteur presque égale à celle du tube dans lequel elle doit se mouvoir. Elle ne touche pas la paroi interne du cylindre, mais elle traverse à frottement une garniture particulière, assujettie à l'intérieur du renflement qu'on voit à la partie supérieure. Cette garniture, qui a



Fig. 50.

été imaginée par l'ingénieur anglais Bramah, est représentée en coupe verticale par la figure 50. C'est une couronne de cuir, dont les bords

ont été repoussés au maillet, de façon à lui donner la forme d'une sorte de gouttière renversée. L'eau, en pressant à l'intérieur de cette gouttière, applique son bord interne contre la surface du piston, et son bord externe contre la paroi du cylindre; et cela, avec d'autant plus de force que la pression exercée dans l'appareil est plus grande.

41. Équilibre d'un liquide soumis à la seule action de la pesanteur. — Horizontalité de la surface. — Un liquide en repos, dans un vase ouvert de forme quelconque, se dispose toujours de façon que sa surface libre soit plane. L'observation montre, en outre, que cette surface est perpendiculaire à la direction du fil à plomb, c'est-à-dire que c'est une surface *horizontale*.

Or, l'action de la pesanteur, qui s'exerce sur toutes les molécules d'un liquide, détermine toujours, alors même qu'on n'exerce sur lui aucune action extérieure, une pression qui se transmet aux parties inférieures de la masse. On conçoit donc que, eu égard à cette action, le fond ou les parois latérales des vases doivent supporter des pressions qui dépendent de leur profondeur au-dessous de la surface libre. — C'est ce que nous allons constater par l'expérience.

42. Pression sur le fond horizontal d'un vase.

— *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 liquide ayant pour base la surface du fond du vase, et pour hauteur la hauteur du liquide au-dessus de cette surface.* —

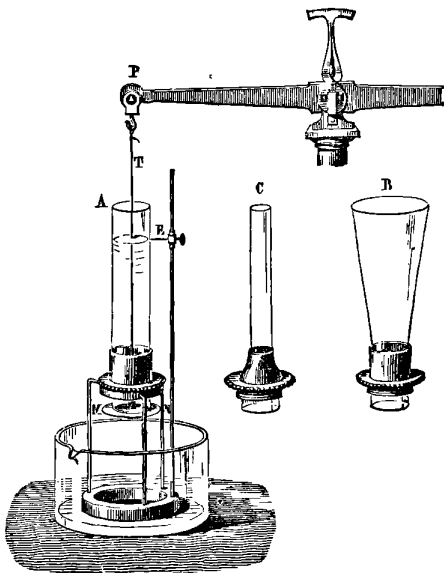


Fig. 31.

D'après cet énoncé, la pression ne doit pas dépendre de la *forme* du vase, mais seulement de la *surface du fond* et de la *hauteur du liquide*.

Pour démontrer cela, nous allons faire l'expérience, prenons trois vases A, B,

C (fig. 51) de formes différentes, et pouvant se visser tour à tour sur un trépied métallique; ces vases n'ont pas de fond, mais présentent à leurs parties inférieures des ouvertures *égales*. — L'un d'eux A étant vissé sur le trépied, on applique sur son ouverture inférieure un obturateur de verre MN, qu'on maintient en le suspendant par un fil T à l'un des bras P d'une balance; on place, dans le plateau que supporte l'autre bras, des poids suffisants pour appliquer assez fortement l'obturateur sur l'ouverture. On verse de l'eau dans le vase B jusqu'à ce que l'obturateur se détache et laisse échapper quelques gouttes de liquide: à ce moment, la pression exercée de haut en bas sur ce fond mobile est égale à la force avec laquelle il est maintenu contre les bords de l'ouverture; on marque alors la hauteur de l'eau au moyen du petit index E, mobile le long d'une tige verticale. On répète la même expérience en remplaçant le vase A successivement par les vases B et C: on constate que, l'index étant resté au même point de la tige, l'obturateur se détache toujours au moment où le liquide atteint le même niveau. — La pression est donc ici *la même sur le fond de ces trois vases*, quand le liquide atteint la même hauteur au-dessus du fond.

Quant à la valeur absolue de cette pression, on peut la déterminer en plaçant sur l'obturateur, au lieu d'eau, un nombre convenable de grammes et de fractions de gramme: on trouve que le poids nécessaire pour le détacher est égal au poids du volume d'eau que contenait le vase *cylindrique* A, ce qui vérifie l'énoncé.

On voit donc que, pour le vase B, la pression est inférieure au poids de l'eau que contient le vase; elle est, au contraire, pour le vase C, supérieure au poids total de l'eau (*). — Pour concevoir qu'il en puisse être ainsi, il suffit, comme on va le voir, d'avoir égard aux pressions supportées dans les parois latérales.

45. Pressions sur les parois latérales. — Lorsqu'on vient à pratiquer une ouverture dans la paroi latérale d'un vase qui contient un liquide pesant, on voit le liquide s'échapper en formant un jet qui est d'abord perpendiculaire à la paroi, et qui s'infléchit ensuite sous l'action de la pesanteur. Les molécules liquides qui touchaient la paroi étaient donc pressées normalement contre elle.

Cela posé, il est facile de concevoir en quoi *la pression exercée sur le fond* du vase se distingue du *poids du liquide*, c'est-à-dire de la force qui solliciterait, par exemple, le plateau d'une balance, sur laquelle on aurait placé ce vase. — Le liquide contenu dans un vase exerce, sur tous les éléments d'une paroi latérale, des pressions normales à ces éléments. Si les éléments d'une paroi telle que AB (fig. 52) font un angle obtus avec le

(*) Ce dernier résultat, qui paraît singulier au premier abord, a été désigné sous le nom de *paradoxe hydrostatique*.

fond, chacune de ces pressions p peut se décomposer en deux forces : l'une f' horizontale, l'autre f verticale et dirigée de haut en bas. Toutes les composantes verticales, agissant sur les divers points de la paroi qui sont liés entre eux, s'ajoutent à la pression supportée par le fond, et c'est la résultante de toutes ces forces qui solliciterait le plateau d'une balance sur lequel serait placé le vase ; en d'autres termes, c'est elle qui représente le

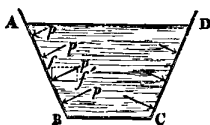


Fig. 32.



Fig. 33.

pois du liquide : ce poids est donc plus grand que la pression supportée par le fond. — Au contraire, si les éléments d'une paroi telle que $A'B'$ (fig. 33) font un angle aigu avec le fond, les composantes verticales f des pressions exercées sur ces éléments sont dirigées de bas en haut : ces forces agissent donc en sens contraire de la pression exercée sur le fond, et, en se composant avec cette pression, elles produisent une résultante totale qui est égale au poids du liquide ; ce poids est donc moindre que la pression supportée par le fond.

44. Mouvement de recul produit par l'écoulement d'un liquide. — Lorsqu'on place un vase plein d'eau sur un petit chariot parfaitement mobile, et qu'on vient à déboucher une ouverture vers la partie inférieure de ce vase, on voit le chariot reculer en sens inverse de l'écoulement. Ce résultat trouve son explication dans ce qui précède. — Soit, en effet, un

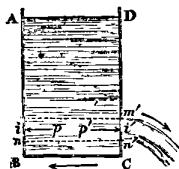


Fig. 34.

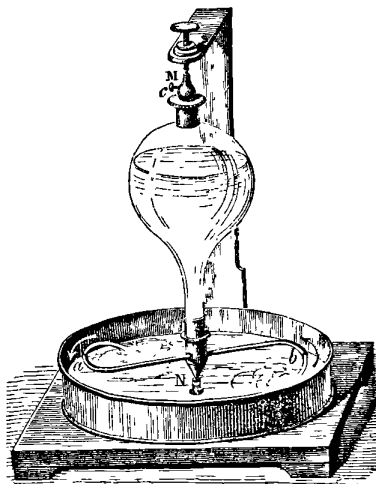


Fig. 35.

vase ABCD (fig. 34), et supposons, pour plus de simplicité, que les parois latérales opposées AB, CD soient planes, verticales et parallèles.

Soit $m'n'$ la portion de paroi que l'on supprime pour produire l'écoulement : avant que cette ouverture fût débouchée, la pression p' supportée par cette portion de paroi était équilibrée par la pression p égale et contraire, qui s'exerce sur la portion mn égale à la première et située à la même profondeur sur la paroi opposée. Au moment où l'on enlève $m'n'$, la pression p' a pour effet de faire jaillir le liquide, tandis que la force p , qui reste seule appliquée au vase, le fait reculer en sens inverse de l'écoulement.

Le mouvement du *tourniquet hydraulique* (fig. 35) s'explique de la même manière. — Cet appareil se compose d'un réservoir de verre MN, mobile autour d'un axe vertical, et communiquant, par sa partie inférieure, avec un tube de cuivre horizontal ab , recourbé en forme de Z. Le réservoir ayant été rempli d'eau, et l'écoulement se produisant par les extrémités a et b du tube, on voit l'appareil prendre un mouvement de rotation, en sens inverse de l'écoulement : ce mouvement de recul est produit par les pressions du liquide sur les parois du tube opposées aux ouvertures.

45. Pression supportée de bas en haut par une surface horizontale, prise dans un liquide pesant. — L'expérience suivante prouve qu'une surface horizontale, prise dans l'intérieur d'un liquide pesant, et non couverte par le liquide, éprouve de bas en haut une pression verticale. On prend un tube de verre, fermé à sa partie inférieure par un disque plan ab (fig. 36) que l'on maintient au moyen d'un fil fixé en son centre ; si l'on enfonce ce tube dans

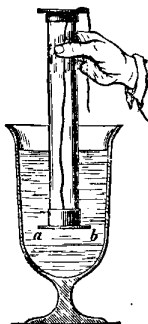


Fig. 36.

l'eau, on constate que le disque est appliqué fortement sur l'ouverture : on peut abandonner le fil, sans que le disque se détache. — Si maintenant on veut évaluer la pression qui s'exerce sur la face inférieure de ab , il suffit de verser de l'eau dans le tube : le disque se détache au moment où le niveau intérieur arrive sensiblement dans le plan du niveau extérieur. Or, à ce moment, le tube fermé par son obturateur constitue un vase sur le fond duquel s'exerce, de haut en bas, une pression verticale que nous savons évaluer (42) : cette pression est équivalente à celle qui s'exerce, de bas en haut, sur la face inférieure de l'obturateur. Donc la surface inférieure de ab supporte, de bas en haut, une pression égale au poids

d'une colonne cylindrique de liquide ayant pour base cette surface, et pour hauteur la hauteur du liquide au-dessus de ab .

46. Égalité de pression en tous sens, autour d'un point pris dans l'intérieur d'un liquide en équilibre. — Si l'on considère un point quelconque, dans l'intérieur d'un liquide en équilibre,

et une petite portion de surface plane passant par ce point, il est clair que l'équilibre ne serait point troublé si les points du liquide contenus dans cette petite surface étaient liés entre eux, de manière à former un corps solide. Or, dans le cas particulier où la surface en question est horizontale, et où le liquide est placé dans un vase ouvert, nous venons de constater, par l'expérience, qu'elle supporte sur ses deux faces des pressions égales et directement opposées. — La théorie montre qu'il en est de même quelle que soit la direction de la surface considérée. Ces conclusions sont d'ailleurs applicables, non-seulement aux pressions dues à l'action de la pesanteur sur le liquide, mais aussi à celles qui proviennent d'actions extérieures.

On peut donc dire d'une manière générale que si, par un point M, pris dans l'intérieur d'un liquide (fig. 37), on imagine une portion de paroi plane, dont les dimensions soient constantes et très-petites, elle supporte sur ses deux faces des pressions p , p' , égales entre elles, et dont la valeur est la même quelle que soit la direction mn , $m'n'$... de la surface considérée. — Tel est le sens qu'il faut attacher au principe connu sous le nom d'*égalité de pression dans tous les sens autour d'un point*.

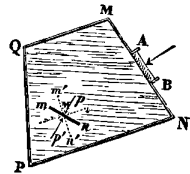


Fig. 37.

47. Égalité de pression dans tous les points d'un même plan horizontal, pris dans un liquide pesant. — La pression qui s'exerce sur une petite portion de surface plane, prise au sein d'un liquide placé dans un vase ouvert, est toujours égale, comme on vient de voir, au poids d'une colonne cylindrique du liquide ayant pour base cette surface, et pour hauteur, la hauteur du liquide au-dessus d'elle. Si donc on considère plusieurs petites surfaces *égales entre elles* et prises dans un même plan horizontal, comme elles sont toutes à la même distance de la surface, elles supportent des pressions égales. — La théorie montre qu'il en est encore de même quand il s'agit d'un liquide pesant placé dans un vase fermé et soumis à des pressions extérieures quelconques, en sorte que, dans tous les cas, *les pressions supportées par des surfaces égales, prises dans un même plan horizontal, sont égales entre elles*.

48. Conditions d'équilibre des liquides superposés. — Quand plusieurs liquides, non miscibles et de densités différentes, sont placés dans un même vase ABCD (fig. 38), il faut, pour qu'il y ait équilibre, que la surface de séparation soit plane et horizontale. — En effet, si la surface de séparation avait une forme telle que EF, il serait impossible que tous les éléments égaux m , m' , pris dans les divers points



Fig. 38.

d'un plan horizontal EF situé au-dessous de cette surface, fussent soumis à la même pression.

Pour que l'équilibre subsiste, il faut encore que les liquides soient superposés par ordre de *densités décroissantes* à partir du fond.

Ces résultats peuvent être vérifiés par l'expérience, en plaçant, dans un même vase, du mercure, de l'eau et de l'huile; les surfaces des trois liquides sont horizontales, et l'ordre de superposition à partir du fond du vase est celui dans lequel nous venons de les énumérer.

49. Conditions d'équilibre des liquides, dans des vases communicants. — 1° Lorsque plusieurs vases communicants contiennent un même liquide, il faut, pour qu'il y ait équilibre, que les surfaces libres soient dans un même plan horizontal. — Soient V et V' (fig. 39) deux vases communicants, contenant un même liquide,

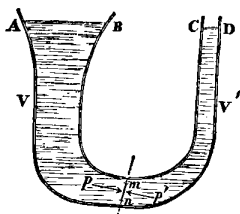


Fig. 39.

et considérons un petit élément mn dans le tube de communication; il devra supporter, sur ses deux faces, des pressions normales p et p' égales entre elles. Or, le plan mené par mn pourrait être rendu solide sans que l'équilibre fût détruit; donc l'élément mn lui-même, considéré comme une portion de paroi du vase V, supporte de ce côté une pression p équivalente au poids d'un cylindre liquide qui aurait pour base mn , et pour hauteur la distance de mn au plan de la surface AB. De même, la pression p' est exprimée par une colonne de liquide ayant pour base mn et pour hauteur la

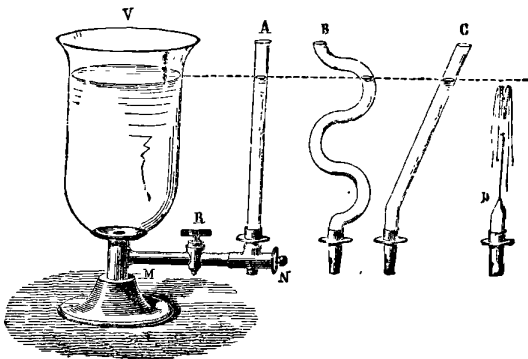


Fig. 40.

distance de mn au plan mené par EF . Ces deux hauteurs doivent

être égales, et les plans des deux surfaces AB, CD doivent se confondre.

On vérifie ce résultat par l'expérience, en faisant communiquer le vase V (fig. 40), soit avec le tube vertical A, soit avec l'un des tubes B, C, qu'on peut substituer à A. Le robinet R étant ouvert, on voit le liquide s'élever toujours de façon que sa surface se trouve dans le même plan horizontal que la surface libre en V.

Si l'on adapte en N un tube tel que D, qui n'arrive pas jusqu'à cette hauteur, il se produit un jet d'eau qui atteint encore à peu près le même niv. au : la petite différence de hauteur que l'on constate alors, par l'expérience, doit être attribuée surtout à la rencontre des gouttes qui montent avec celles qui descendent, rencontre qui a pour effet de diminuer la vitesse ascensionnelle. — C'est sur ces principes qu'est fondé l'établissement de la plupart des jets d'eau artificiels, et aussi l'ascension de l'eau dans les puits artésiens.

2° Lorsque deux vases communicants contiennent des liquides différents superposés, il faut, pour qu'il y ait équilibre, que les hauteurs des deux liquides au-dessus de la surface de séparation soient en raison inverse de leurs densités.

Soient deux vases communicants V, V' (fig. 41) : supposons qu'on y ait d'abord versé du mercure, et qu'on ait ensuite ajouté de l'eau dans le vase

V : le niveau du mercure s'est déprimé à gauche et s'est élevé à droite ; considérons le moment où l'équilibre est établi.

Un élément mn pris dans le tube de communication doit supporter, de part et d'autre, des pressions normales p et p' égales entre elles. Or, ces pressions ont une partie commune, savoir le poids d'une colonne de mercure ayant pour base mn et pour hauteur la distance IH de mn au plan de la surface de séparation EF ;

donc il doit y avoir égalité entre le poids d'une colonne d'eau ayant pour base mn et pour hauteur HL , et le poids d'une colonne de mercure ayant même base mn et pour hauteur HK . Le mercure ayant une densité qui est égale à celle de l'eau multipliée par 13,6, la hauteur HK doit être égale à $\frac{HL}{13,6}$ ou, en d'autres termes, les hauteurs des liquides, au-dessus de la surface de séparation EG , doivent être en raison inverse de leurs densités.

On peut faire l'expérience, au moyen d'un simple tube en forme de U (fig. 42), dont les deux branches représentent les vases V et V' ; la mesure directe des colonnes liquides confirme les conclusions précédentes.

50. Niveau d'eau. L'usage du niveau d'eau dans l'arpentage est

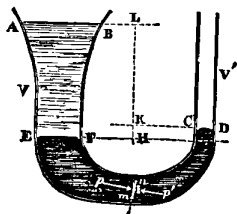


Fig. 41.

fondé sur le principe des vases communicants, dans le cas d'un seul liquide. Un tube de métal (*fig. 45*), dont les extrémités coudées à angle droit reçoivent deux fioles de verre sans fond M, N, contient l'eau ; on place ce tube sur un trépied et l'on fait en sorte que les surfaces du liquide soient visibles dans les deux fioles : d'après ce qui précède, le plan mené par les deux surfaces M et N est un plan horizontal.

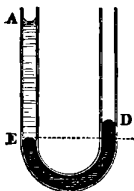


Fig. 42.

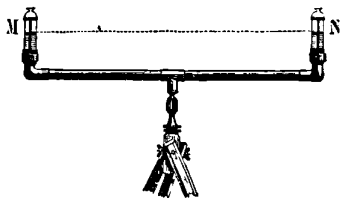


Fig. 45.

On voit donc que, si l'arpenteur place son œil en M, et si une mire, installée à une certaine distance, est placée de façon qu'il l'aperçoive sur le prolongement du rayon visuel qui rase la surface de l'eau en N, il sera certain que cette mire est située dans le plan horizontal MN.

PRINCIPE D'ARCHIMÈDE. — CORPS FLOTTANTS

51. Principe d'Archimède. — *Tout corps plongé dans un liquide pesant éprouve une poussée verticale, de bas en haut, dont la valeur est égale au poids du liquide déplacé.*

On peut se rendre compte de l'existence de cette poussée, et de sa valeur, par le raisonnement suivant. Soit un liquide pesant en équilibre, et supposons qu'une portion MN de la masse (*fig. 44*) soit solidifiée sans

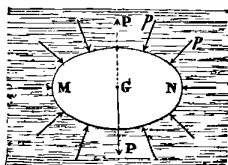


Fig. 44.

changer de poids ni de volume. Ce corps solide restera en équilibre au milieu du liquide : donc les pressions qui s'exercent sur toute sa surface ont une résultante qui est égale et directement opposée à la résultante des actions de la pesanteur, c'est-à-dire à son poids P. — Or, toutes ces pressions seront encore les mêmes si l'on substitue, à ce corps solide idéal,

un autre corps solide de même forme, mais de nature différente. Un corps quelconque, plongé dans un liquide, éprouve donc une *poussée* de bas en haut, dont la valeur est égale au poids du liquide déplacé.

Cette ~~résultante~~ poussée peut être constatée par l'expérience. —

Deux cylindres de laiton, l'un plein D (fig. 45), l'autre creux C, ont été travaillés de telle sorte que le cylindre plein entre exactement dans le cylindre creux. On suspend sous l'un des plateaux A de la balance hydrostatique le cylindre creux, et, au-dessous de lui, le cylindre plein ; on fait la *tare* dans le plateau B. On descend ensuite le cylindre D dans

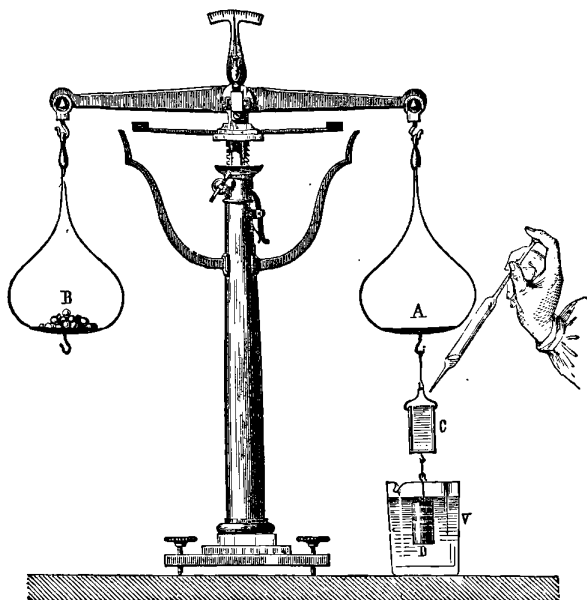


Fig. 45.

un vase contenant de l'eau, et l'on constate que l'équilibre est détruit. Il suffit alors d'emplir d'eau la capacité C, pour que, le cylindre D étant complètement plongé, l'équilibre soit rétabli. On voit donc qu'on a équilibré la poussée éprouvée par D en ajoutant, au poids du système, un poids d'eau précisément égal à celui qui est déplacé par D.

52. Poids apparent d'un corps complètement plongé. — De ce qui précède, il résulte que, si l'on compare la *poussée* éprouvée par un corps plongé au *poids* de ce corps, on pourra, selon les circonstances, distinguer trois cas :

1° Si le poids est plus grand que la poussée, ou, en d'autres termes, si le corps a un poids plus grand que le poids du même volume de liquide, tout se passe comme s'il était sollicité par une force égale à la

différence de ces deux poids, et qu'on peut appeler son *poids apparent*. On exprime souvent ce résultat en disant qu'un corps plongé dans un liquide *perd une partie de son poids égale au poids du liquide déplacé*. — Dans ce cas, le corps abandonné au milieu du liquide tombe au fond. C'est ce qui arrive pour le fer, pour les pierres, quand on les plonge dans l'eau; pour le platine, quand on le plonge dans le mercure.

2° Si le poids est égal à la poussée, c'est-à-dire si le corps a un poids égal à celui du même volume de liquide, il semble avoir perdu complètement son poids. — Abandonné sans impulsion au milieu du liquide, il y reste en équilibre, sans descendre ni monter.

3° Enfin, si le poids est plus petit que la poussée, c'est-à-dire si le corps a un poids moindre que le poids du même volume de liquide, la poussée l'emporte, et le corps s'élève dans le liquide. C'est ce qui arrive pour le bois, le liège, plongés dans l'eau; pour le fer plongé dans le mercure.

53. **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 un moment où elle devient égale au poids du corps, et peut lui faire équilibre. — L'expérience montre que, après quelques oscillations, cet équilibre finit toujours par s'établir; on dit alors que le corps *flotte* à la surface du liquide.

Il est essentiel, au point de vue des applications, de retenir ce résultat, que, *toutes les fois qu'un corps flotte à la surface d'un liquide, le poids du corps est égal au poids de liquide que déplace la partie plongée*.

54. **Ludion.** — On réalise les conditions diverses dans lesquelles un corps solide descend, monte ou se tient en équilibre dans un liquide, au moyen du ludion (fig. 46). — Dans une éprouvette pleine d'eau, on a placé une boule de verre creuse B, percée vers sa partie inférieure d'une petite ouverture capillaire (placée à gauche sur la figure); cette boule de verre 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, ficelée sur le bord de l'é-

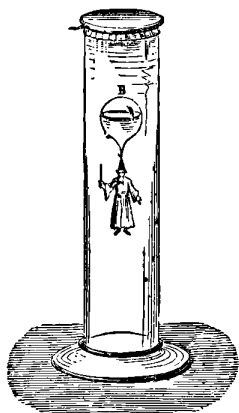


Fig. 46. — Ludion.

prouvette, permet de exercer avec le doigt une pression sur la surface de

l'eau; cette pression, se transmettant dans toute la masse, fait pénétrer dans la boule de verre, par l'ouverture capillaire, un peu de liquide qui comprime l'air de la boule, et 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 système remonte. — Enfin, on peut, avec quelques tâtonnements, régler la pression de manière à maintenir la boule au milieu de l'éprouvette; à ce moment, le poids total du système est égal au poids de l'eau qu'il déplace.

CHAPITRE III

DENSITÉS DES SOLIDES ET DES LIQUIDES

55. **Définitions.** — On appelle *poids spécifique* d'un corps le *poids de l'unité de volume de ce corps*. — A ce terme, on substitue souvent celui de *densité*, que nous considérerons comme synonyme (*).

De cette définition il résulte que, si l'on connaît le poids total P d'un corps, et son volume V, sa densité sera donnée par la formule

$$(1) \quad D = \frac{P}{V}.$$

56. **Remarque sur le choix des unités.** — Les nombres P et V étant déterminés, l'un au moyen de l'unité de poids, l'autre au moyen de l'unité de volume, la densité D dépend du choix de ces unités.

Prenons pour unité de volume le *centimètre cube*, prenons pour unité de poids le *gramme*, qui est alors le poids de l'unité de volume d'eau à 4 degrés centigrades. Avec ces conventions, le poids spécifique d'un corps est le quotient du poids P de ce corps en *grammes* par le nombre V qui exprime son volume en *centimètres cubes*. — Si maintenant, modifiant le choix de ces unités, on prenait pour unité de volume le *décimètre cube*, et qu'on prit, en même temps, pour unité de poids le *kilogramme* (c'est-à-dire encore le poids de l'unité de volume d'eau à

(*) Bien qu'on établisse en Mécanique une distinction précise entre ces deux termes, nous n'indiquons pas ici cette distinction, qui pourrait difficilement être comprise sans quelques développements. — Il n'y a d'ailleurs aucun inconvénient à confondre les deux expressions, dans les cas où nous aurons à les employer.

4 degrés), on voit que chacun des nombres représentés par P et V deviendrait mille fois plus petit, puisqu'il aurait été évalué au moyen d'une unité mille fois plus grande : le quotient ne serait donc pas changé, et par suite le poids spécifique serait encore représenté par le même nombre.

En général, on conviendra de prendre toujours l'unité de volume et l'unité de poids de manière qu'elles soient *correspondantes*, c'est-à-dire de manière que, l'unité de volume étant une fois déterminée, l'unité de poids soit le poids de l'unité de volume d'eau à 4 degrés, ce qui est toujours facile quand on emploie le système métrique : le quotient D sera un nombre constant, quel que soit le choix particulier d'unités qu'on ait fait. — C'est ce que nous supposerons toujours à l'avenir.

57. La densité d'un corps peut aussi être définie le rapport du poids de ce corps au poids d'un égal volume d'eau. — Lorsqu'on prend une unité de poids *correspondante* à l'unité de volume, par exemple pour unité de volume le centimètre cube, et pour unité de poids le gramme, le nombre V qui exprime le volume d'un corps en centimètres cubes est le même que le nombre p qui exprime en grammes le poids du même volume d'eau. Il en serait de même encore, si l'on prenait pour unité de volume le litre et pour unité de poids le kilogramme. — La formule (1) peut donc s'écrire sous la forme

$$(2) \quad D = \frac{P}{p},$$

qui est la traduction de l'énoncé.

On fera usage indifféremment de l'une ou de l'autre de ces formules ; nous venons de voir d'ailleurs qu'elles ne diffèrent pas l'une de l'autre, si les volumes et les poids sont exprimés en unités correspondantes.

58. Usages des densités. — 1° *Calculer le poids d'un corps, connaissant son volume et sa densité.* — La formule (1) donne immédiatement

$$P = V \times D.$$

On voit donc qu'il suffira d'effectuer le produit indiqué dans le second membre. — Il faut bien remarquer que, si le volume V est évalué en centimètres cubes, le nombre P fourni par le produit $V \times D$ exprimera des grammes. Si le volume V est évalué en décimètres cubes, le nombre P exprimera des kilogrammes, et ainsi de suite.

2° *Calculer le volume d'un corps, connaissant son poids et sa densité.* — La formule (1) donne

$$V = \frac{P}{D}.$$

Il suffit d'effectuer la division indiquée dans le second membre. — Si

le poids P est évalué en grammes, le nombre V fourni par le quotient $\frac{V}{D}$ exprimera des centimètres cubes. Si le poids P est évalué en kilogrammes, le nombre V exprimera des décimètres cubes ou des litres, et ainsi de suite.

DÉTERMINATION EXPÉRIMENTALE DES DENSITÉS DES CORPS SOLIDES ET LIQUIDES.

59. **Méthode générale.** — Trois méthodes peuvent être employées pour déterminer, par l'expérience, les poids spécifiques des corps solides ou liquides (nous ne parlerons pas ici de la détermination des poids spécifiques des gaz, qui sera exposée dans un autre chapitre). — Le procédé général, commun à ces trois méthodes, consiste à évaluer : 1° le poids P du corps ; 2° le poids p du même volume d'eau ; au moyen de ces données, la formule (2) donne la densité. — Les trois méthodes ne diffèrent entre elles que par les moyens employés pour obtenir P et p .

60. **Méthode du flacon.** — *Corps solides.* — Les flacons employés pour déterminer la densité des corps solides ont, le plus ordinairement, la forme représentée par la figure 47. Le bouchon ab est formé d'un tube effilé, ouvert à sa partie supérieure ; il est usé à l'émeri en b , de façon à s'enfoncer d'une quantité toujours égale dans le goulot. Lorsqu'on a rempli d'eau le flacon, et qu'on introduit le bouchon, il sort un peu de liquide par l'ouverture a , et la capacité intérieure est ainsi exactement pleine.

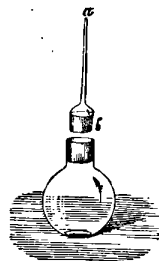


Fig. 47.

Soit à déterminer la densité d'un corps solide, insoluble dans l'eau : d'un morceau de soufre, par exemple. On place ce corps dans l'un des plateaux de la balance, et, à côté du corps, le flacon plein d'eau et bouché : on fait une tare dans l'autre plateau ; puis on enlève le corps et on le remplace par des poids marqués, ce qui donne son poids P par double pesée (27). — On retire alors les poids marqués ; on introduit le corps dans le flacon, en sorte que, quand le bouchon est remplacé, le corps a chassé du flacon un volume d'eau égal au sien ; on essuie le flacon et on le replace dans le plateau. Pour rétablir l'équilibre, on ajoute des poids marqués qui expriment le poids p de l'eau chassée par le corps. On divise P par p , et l'on obtient la densité du soufre.

Quand on opère sur des corps en poudre, ils peuvent, lorsqu'on les introduit dans l'eau, entraîner des bulles d'air qui se dégagent difficilement : pour les chasser, on place le flacon sous le récipient de la machine pneumatique, et on le laisse quelques instants dans le vide.

La méthode du flacon est de beaucoup la meilleure que l'on puisse employer, elle est la seule qui fournisse, avec une égale précision, les deux poids P et p .

61. *Corps liquides.* — Le flacon précédent peut servir pour les liquides ; cependant on emploie plus ordinairement de petits flacons formés d'un réservoir cylindrique A (fig. 48), surmonté d'un tube capillaire et d'une partie plus large B qui sert d'entonnoir. Pour emplir le flacon, on verse d'abord le liquide dans l'entonnoir, puis on chauffe le réservoir A pour en chasser l'air, et on laisse refroidir pour y faire pénétrer le liquide : en répétant deux ou trois fois cette opération, on emplit complètement le réservoir, et on enlève avec du papier buvard la petite quantité de liquide qui dépasse le trait a marqué sur le tube capillaire.



Fig. 48.

Soit à déterminer la densité de l'alcool, par exemple. On emplit le flacon d'alcool jusqu'au trait a , on le met dans l'un des plateaux de la balance, et on tare ; on vide ensuite le flacon, on le sèche, on le replace sur le plateau, et les poids marqués qu'il faut ajouter pour rétablir l'équilibre donnent le poids P de l'alcool, avec l'exactitude de la double pesée (27). — On répète la même opération avec de l'eau, ce qui donne le poids p du même volume d'eau. — Le quotient de P par p donne la densité de l'alcool.

62. *Méthode de la balance hydrostatique.* — *Corps solides.* — Soit à déterminer la densité d'un corps solide, insoluble dans l'eau : d'un morceau de fonte par exemple. On le suspend, par un fil métallique fin, sous l'un des plateaux B d'une balance hydrostatique, et on fait une tare dans le plateau A (fig. 49) ; on enlève le corps, et on rétablit l'équilibre au moyen de poids marqués, placés en B : on connaît ainsi le poids P du corps, par la méthode de la double pesée. On enlève les poids, on replace le corps sous le plateau, et on le descend dans l'eau : l'équilibre étant détruit, les poids marqués qu'il faut placer en B pour le rétablir expriment le poids p de l'eau déplacée. — Le quotient de P par p exprime la densité du corps.

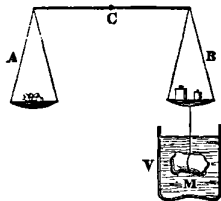


Fig. 49.

La résistance offerte, par le liquide, au mouvement du corps qui y est plongé, fait que cette méthode n'offre qu'une précision inférieure à la précédente.

63. *Corps liquides* — La méthode de la balance hydrostatique peut s'appliquer aux corps liquides de la manière suivante : on suspend au plateau B une boule de verre contenant de la grenaille de plomb, et on fait une tare dans le plateau A . On plonge la boule dans le liquide dont on veut déterminer la densité, et les poids marqués qu'il faut ajouter

en B pour rétablir l'équilibre donnent le poids P du liquide déplacé. On fait ensuite la même opération avec l'eau pure, ce qui donne le poids p du même volume d'eau. — Le quotient de P par p donne la densité du liquide.

64. **Méthode des aréomètres à volume constant.** — *Corps solides.* — On emploie, pour déterminer la densité des corps solides, l'aréomètre de Nicholson : il se compose d'un cylindre métallique creux A (fig. 50), terminé en haut et en bas par deux cônes ; il porte, à sa partie supérieure, une tige avec un petit plateau B ; à sa partie inférieure, une petite corbeille C lestée par de la grenaille de plomb.

Soit à déterminer la densité d'un corps solide, insoluble dans l'eau, d'un morceau de soufre, par exemple. L'appareil étant placé dans l'eau, on dépose le corps sur le plateau B et on ajoute de la grenaille de plomb, de façon que l'instrument s'enfonce jusqu'à un *trait d'affleurement* a marqué sur la tige ; on enlève le corps, on le remplace par des poids marqués, de manière à rétablir l'affleurement, et on connaît ainsi le poids P du soufre. On retire ces poids, et on place le corps sur la corbeille inférieure C ; il éprouve alors une poussée, en sorte que, pour établir de nouveau l'affleurement, on doit placer sur le plateau B des poids marqués ; ils expriment le poids p de l'eau déplacée. — Le quotient de P par p donne la densité du soufre.

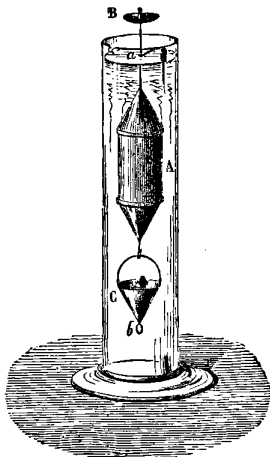


Fig. 50.

Pour appliquer cette méthode à des corps dont la densité est moindre que celle de l'eau, à des fragments de bois par exemple, on retourne la corbeille, et on l'accroche au cône inférieur par l'anneau métallique b , de façon que le corps soit pressé contre elle par la poussée du liquide, et en ayant soin qu'il ne reste pas d'air sous la petite voûte formée par sa concavité.

Cette méthode a l'avantage de n'exiger qu'un instrument portatif, dispensant de l'emploi d'une balance. En revanche, elle est peu sensible, à cause de l'adhérence que l'eau offre toujours avec le métal.

65. *Corps liquides.* — On construit pour déterminer la densité des liquides un instrument analogue, l'aréomètre de Fahrenheit, dont on fait assez rarement usage. Il est en verre (fig. 51), et lesté par

du mercure placé dans une petite boule, à sa partie inférieure. — L'instrument a été pesé une fois pour toutes ; soit 50 grammes son poids.

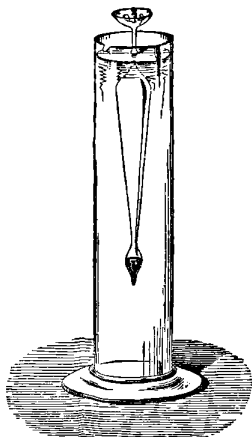


Fig. 51.

Aéromètre de Fahrenheit.

On le plonge dans le liquide dont on veut déterminer la densité, et on ajoute des poids marqués sur le plateau supérieur, de manière à le faire enfoncer jusqu'au point d'affleurement : puisque l'instrument flotte, la poussée qu'il éprouve est égale à son poids total (53), 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. De même, l'instrument étant plongé dans l'eau, la somme de 50 grammes et des poids qui déterminent l'affleurement est le poids p d'un égal volume d'eau. — Le quotient de P par p exprime la densité du liquide.

66. Corps solides solubles dans l'eau. — Pour déterminer la densité d'un corps solide soluble dans l'eau, aucune des méthodes précédentes n'é-

tant applicable, on opère avec un autre liquide, dans lequel ce corps ne soit pas soluble : avec l'essence de térébenthine, par exemple. On obtient ainsi la densité du corps *par rapport à l'essence* : il suffit de multiplier ensuite ce nombre par la densité de l'essence par rapport à l'eau. — Soient en effet P , p' et p les poids de volumes égaux du corps, d'essence et d'eau ; la densité du corps par rapport à l'essence est $\frac{P}{p'}$; la densité de l'essence par rapport à l'eau est $\frac{p'}{p}$; et l'on voit que

le produit $\frac{P}{p'} \times \frac{p'}{p}$ est égal à $\frac{P}{p}$, c'est-à-dire à la densité du corps.

POIDS SPÉCIFIQUES DE QUELQUES CORPS SOLIDES.

Acier trempé.	7,82	Cuivre fondu.	8,85
Aluminium fondu	2,56	— laminé	8,95
Argent fondu	10,47	Diamant.	3,52
Bois d'orme	0,55	Étain	7,29
— de peuplier ordinaire.	0,39	Fer	7,79
— de sapin jaune.	0,66	Fonte de fer	7,21
Cristal de rochers	2,65	Verre blanc	2,50
		Verre à glace	2,35
		Verre à bouteille	2,50
		Verre à vitre	2,50
		Verre à tôle	2,50
		Verre à miroir	2,50
		Verre à lunette	2,50
		Verre à montre	2,50
		Verre à montre	0,92

AREOMÈTRES A POIDS CONSTANT.

47

Houille compacte.	1,53	Platine écroui	23,00
Ivoire.	1,92	Plomb.	11,55
Laiton.	8,45	Porcelaine de Sèvres.	2,24
Liège.	0,24	Potassium.	0,87
Magnésium.	1,74	Sodium	0,97
Marbre.	2,71	Soufre natif ou octaédrique.	2,07
Or fondu.	19,26	— prismatique	1,97
Phosphore ordinaire	1,84	Verre à vitres.	2,55
— rouge.	2,10	Zinc.	7,19
Platine fondu.	21,15		

POIDS SPÉCIFIQUES DE QUELQUES LIQUIDES.

Acide nitrique fumant.	1,451	Essence de térébenthine.	0,869
Acide sulfurique.	1,841	Huile d'olive.	0,915
Alcool absolu.	0,792	Mercure.	13,596
Eau de mer.	1,026	Sulfure de carbone.	1,291
Eau distillée, à 4 degrés.	1,000	Vin de Bordeaux.	0,994
Esprit-de-bois	0,798	— de Bourgogne	0,991

ARÉOMÈTRES A POIDS CONSTANT

67. Aréomètres à poids constant, en général. — Les aréomètres à poids constant sont de petits appareils flotteurs en verre, dont le poids a été réglé une fois pour toutes, et qui servent, dans la pratique, à obtenir des indications sur le degré de concentration des liquides employés dans le commerce, c'est-à-dire sur la proportion d'eau qui s'y trouve mélangée. — Ils se composent tous (*fig.* 52, 53 et 54) d'un tube de verre, qui porte à sa partie inférieure un renflement de forme variable et une ampoule contenant du mercure ou de la grenaille de plomb, pour lester l'appareil et le faire tenir verticalement quand il flottera dans un liquide. Il est évident qu'un même appareil, placé dans des liquides différents, s'enfoncera de quantités variables. — Les divers aréomètres diffèrent entre eux par leur graduation, dont nous allons indiquer les principes.

68. 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° Pour graduer les aréomètres destinés à des liquides plus denses que l'eau (*pèse-acides, pèse-sirops, pèse-sels*), on les plonge dans l'eau pure et on règle le lest de manière qu'ils s'enfoncent à peu près jusqu'au sommet du tube : on marque zéro au point d'affleurement (*fig.* 52). On plonge ensuite l'instrument dans une solution de sel marin contenant

15 parties de sel pour 85 parties d'eau : au nouveau point d'affleurement, on marque 15. L'intervalle de ces deux points est partagé en 15 parties égales, qui sont les *degrés* de l'aréomètre, et l'on continue de marquer des degrés égaux jusqu'au bas de la tige.

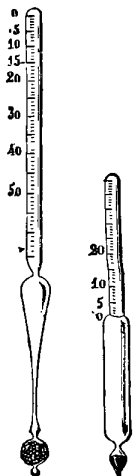


Fig. 52. Fig. 53.
Aréomètres de Baumé.

au pèse-acides de Baumé ; que l'éther doit marquer 56 degrés au pèse-esprits, etc. — On peut donc vérifier si le degré de concentration d'un liquide est convenable ; mais, dans le cas où cette condition ne serait pas remplie, l'instrument n'indique même pas quelle est la proportion d'eau excédante.

69. Alcoomètre centésimal de Gay-Lussac.

— L'alcoomètre de Gay-Lussac est un aréomètre à volume constant, dont la graduation est faite pour donner immédiatement la richesse d'un mélange d'alcool et d'eau. Pour cela, on le gradue comme il suit. Le lest est réglé de façon que l'instrument, plongé dans l'alcool absolu, s'enfonce jusqu'au sommet de sa tige, et, en ce point, on marque 100 (fig. 54). On fait ensuite une solution contenant *en volume* 95 d'alcool pour 100, et au point d'affleurement on marque 95. On continue à déterminer ainsi, par des expériences successives, les points 90, 85, etc. — Ces points étant assez rapprochés, on peut, sans erreur sensible, partager en cinq parties égales les espaces compris entre deux points consécutifs ; mais on observe



Fig. 54.
Alcoomètre
de Gay-Lussac.

que ces divisions sont bien plus grandes au voisinage du sommet de la tige qu'à la partie inférieure : il est donc indispensable de déterminer par l'expérience un grand nombre de points, suffisamment rapprochés. — Lorsque l'instrument ainsi construit marquera, par exemple, 67 dans un mélange d'alcool et d'eau, on pourra affirmer que ce mélange contient, en volume, 67 d'alcool pour 100.

Toutefois, la graduation ayant été faite à la température de 15 degrés, si la température au moment d'un essai est notablement différente, le résultat doit subir une correction. Ces corrections sont données par des tables, construites par Gay-Lussac lui-même, pour la série des températures qui peuvent se présenter dans la pratique. — Enfin, pour que les indications de l'instrument aient une valeur, il est clair qu'il faut s'assurer que le mélange ne contient aucune substance autre que l'alcool et l'eau : si cette condition n'était pas remplie, il faudrait éliminer les substances étrangères, avant de faire usage de l'aréomètre.

CHAPITRE IV

PRESSION ATMOSPHÉRIQUE

70. L'air et les gaz sont pesants. — L'air et tous les gaz sont pesants. Pour le démontrer, on prend un grand ballon de verre, muni d'un robinet, et l'on y fait le vide au moyen de la machine pneumatique. On le suspend sous l'un des plateaux d'une balance, et l'on fait une tare dans l'autre plateau. Si l'on ouvre alors le robinet, de manière à laisser rentrer l'air, on voit le fléau s'incliner du côté du ballon. — En laissant rentrer dans le ballon un autre gaz quelconque, on obtiendrait un résultat semblable.

On verra plus loin comment on peut déterminer avec exactitude le poids d'un volume déterminé d'un gaz. Nous admettrons, dès maintenant, que le poids d'un litre d'air, sous la pression ordinaire, est environ 1^{er},3.

71. Pression atmosphérique.—Expérience de Torricelli. — L'air qui forme l'atmosphère terrestre étant pesant, cet air doit exercer, comme les liquides, en vertu de son poids, une pression sur les corps situés à la surface de la terre. — C'est à Torricelli qu'on doit la première démonstration expérimentale de ce fait.

Avant Torricelli, on admettait que, dans les pompes, quand le mouvement des pistons s'élevait dans les tuyaux, l'ascension

de l'eau est due à ce que, la nature ayant *horreur du vide*, l'eau se précipite pour remplir le vide qui tendrait à se former. Mais les fontainiers de Florence n'ayant pu aspirer l'eau, au moyen de pompes, à une hauteur supérieure à 32 pieds (environ $10^m,3$), l'hypothèse que nous venons d'indiquer, outre qu'elle était au moins bizarre, devenait insuffisante. — Torricelli pensa que l'ascension de l'eau est due à la pression exercée par l'air atmosphérique sur la surface libre du liquide extérieur, pression qui ne peut être équilibrée que par celle d'une colonne liquide s'exerçant sur les points qui sont situés à l'intérieur du tuyau, au même niveau horizontal.

Pour le vérifier, Torricelli emplit de mercure un tube de verre, fermé à l'une de ses extrémités, et long d'environ 1 mètre; bouchant ensuite avec le doigt l'extrémité ouverte, il renversa le tube, et plongea cette extrémité dans une cuvette contenant du mercure; en retirant alors le doigt, il vit la colonne de mercure abandonner le sommet du tube (*fig. 55*), mais conserver toujours une hauteur d'environ 76 centimètres au-dessus de la surface libre MN du liquide extérieur.

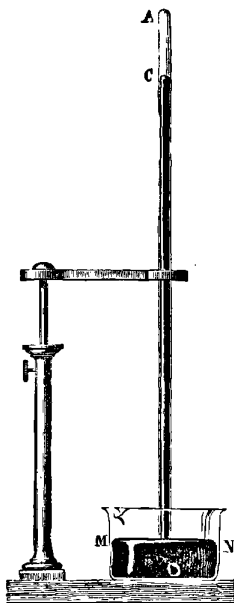


Fig. 55.

La hauteur de la colonne liquide qui est maintenue dans un tube semblable varie, comme on devait le prévoir, avec la nature du liquide. Pascal, en employant divers liquides pour répéter l'expérience de Torricelli, vérifia que les hauteurs sont inversement proportionnelles aux densités: un tube d'une quinzaine de mètres ayant été empli de vin rouge, la hauteur de la colonne qui resta soutenue dans le tube fut d'environ 32 pieds.

Enfin, Pascal pensa que, si c'est en effet la pression atmosphérique qui soutient le mercure dans l'expérience de Torricelli, la hauteur de la colonne soulevée doit être moindre au sommet d'une montagne que dans la vallée.

L'expérience faite par son beau-frère Périer, au sommet du Puy-de-Dôme, et au même instant par d'autres expérimentateurs au pied de la montagne, donna un résultat conforme à ces prévisions.

72. Mesure de la pression exercée par l'atmosphère sur une surface déterminée. — Considérons deux surfaces égales,

de 1 centimètre carré par exemple, situées au niveau de la surface libre dans la cuvette (*fig. 56*), 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 dans le liquide, en sorte que *ab* éprouve une pression de bas en haut, égale en grandeur à *p*; puisqu'il y a équilibre, cette pression est aussi égale à celle qu'exerce de haut en bas le mercure contenu dans le tube; elle peut donc être exprimée par le poids d'un cylindre de mercure ayant pour base *ab*, et pour hauteur la distance verticale de C à *ab*.

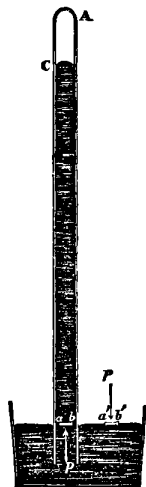


Fig. 56.

Dès lors, le calcul de la pression exercée par l'atmosphère sur une surface déterminée se réduit au calcul du poids d'une colonne cylindrique de mercure. — Si la hauteur du liquide dans le tube est exactement 76 centimètres, la pression sur un centimètre carré est exprimée par le poids d'un cylindre de mercure dont la base serait 1 centimètre carré, la hauteur 76 centimètres, par suite le volume 76 centimètres cubes; son poids exprimé en grammes est donc égal au produit de la densité du mercure 13,6 par 76, c'est-à-dire à 1053^{es},6 ou à 1^k,0536. — On voit que, sur un décimètre carré, la pression est de 105^{kil},56 : sur un mètre carré, de 10536 kilogrammes.

75. Évaluation de la pression atmosphérique ou de la force élastique de l'air, en hauteurs de mercure. — La pression atmosphérique varie, comme il a été dit, avec la distance à la surface de la terre; elle varie aussi, en un même lieu, aux diverses heures du jour. Au lieu d'estimer cette pression par sa valeur en kilogrammes, sur une surface donnée, on la caractérise ordinairement par la hauteur de la colonne de mercure qui lui fait équilibre, et l'on dit, par exemple, que, en un lieu donné et à un instant donné, *la pression est de 748 millimètres* : c'est dire, d'une manière abrégée, que la pression exercée sur une surface déterminée est égale au poids d'une colonne de mercure ayant pour base cette surface et pour hauteur 748 millimètres.

Il est aisé de voir que l'évaluation de la pression atmosphérique fournit également celle de la force élastique de l'air, dans le même lieu. En effet, si l'on isole par la pensée une petite masse d'air au milieu de l'atmosphère, comme la surface qui la limite est en équilibre, on voit que la pression exercée extérieurement sur cette surface par l'atmosphère est égale à la pression exercée intérieurement par la force élastique du gaz. On peut donc évaluer aussi la force élastique de l'air, en un lieu donné et à un moment donné, par la hauteur d'une colonne de mercure, et dire,

en employant une locution abrégée semblable à la précédente, que *la force élastique de l'air*, à un moment donné, *est de 748 millimètres* : cette mesure de la force élastique sera fournie par l'observation du tube de Torricelli.

La remarque précédente explique ce résultat, fourni par l'expérience, que la hauteur du mercure dans le tube de Torricelli ne change pas, lorsqu'on le place dans une chambre dont on ferme ensuite hermétiquement les communications avec l'extérieur : la pression qu'exerce l'air de la chambre, en vertu de sa force élastique, est demeurée égale à la pression de l'atmosphère avec laquelle cet air était d'abord en communication.

74. Crève-vessie. — Hémisphères de Magdebourg. — Un

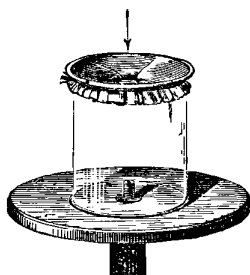


Fig. 57. — Crève-vessie.

cylindre de verre, ouvert à ses deux extrémités, et sur l'ouverture supérieure duquel est tendue une membrane de vessie, est placé sur la platine de la machine pneumatique (fig. 57). Tant qu'on n'a pas raréfié l'air dans le cylindre, la vessie reste plane, parce qu'elle supporte sur ses deux faces des pressions égales; mais, dès qu'on commence à raréfier l'air intérieur, la pression due à la force élastique de cet air étant diminuée, la vessie se déprime sous la pression exercée par l'atmosphère, et bientôt elle se brise. Le bruit qui se produit alors est dû surtout au choc de l'air qui rentre, contre les parois intérieures du cylindre.

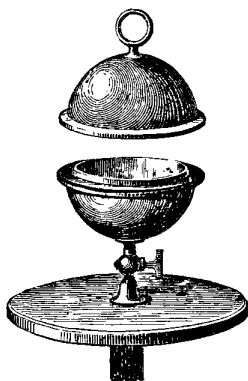


Fig. 58.

Hémisphères de Magdebourg.

Les *hémisphères de Magdebourg* (fig. 58) sont des hémisphères de laiton creux, dont les bords peuvent s'appliquer exactement l'un sur l'autre : une bande de cuir graissée rend la fermeture plus hermétique. L'hémisphère inférieur porte une monture à robinet, qui peut se visser sur le conduit de la machine pneumatique. Les deux hémisphères étant superposés, si l'on fait le vide dans l'intérieur et qu'on ferme le robinet, la pression que l'atmosphère exerce perpendiculairement à chacun des éléments de la sphère, n'étant plus équilibrée par la force élastique de

l'air intérieur, maintient les hémisphères fortement appliqués l'un contre l'autre; deux personnes tirant en sens opposé ne peuvent plus les séparer.

Des hémisphères plus gros, construits à Magdebourg, peu après l'invention de la machine pneumatique, par Otto de Guericke, résistèrent à la traction exercée par vingt chevaux, sans se séparer. — Si l'on vient, au contraire, à ouvrir le robinet, l'air rentre en sifflant dans la cavité des hémisphères, et il devient facile de les disjoindre.

75. Effet de la pression atmosphérique sur nos organes.—

Le corps humain ayant environ un mètre carré et demi de surface extérieure, on voit qu'il éprouve de la part de l'atmosphère une pression normale à ses différents points, dont la valeur totale dépasse quinze mille kilogrammes (72). Cette pression n'a cependant pas d'effet sensible sur nos organes. On s'explique ce résultat en remarquant que toutes les cavités de l'organisme sont remplies, ou de liquides qui sont incompressibles, ou d'air et de gaz dont la force élastique acquiert une valeur égale à la pression atmosphérique : la pression de l'atmosphère ne peut donc, ni tendre à diminuer le volume de notre corps, ni en gêner les mouvements. — Il se produit, au contraire, une gêne extrême quand la pression atmosphérique vient à diminuer d'une manière notable, parce qu'il n'y a plus équilibre entre la force élastique du gaz intérieur et la pression extérieure. Ce dernier phénomène a été constaté par tous les aéronautes qui ont atteint des hauteurs un peu considérables.

BAROMÈTRES

76. Baromètres à cuvette. — La hauteur du mercure dans le tube de Torricelli servant de mesure à la pression atmosphérique (73), cet instrument, construit avec les précautions qui en rendent les indications précises, peut être employé, soit pour obtenir la valeur absolue de la pression, soit pour en évaluer les variations. — Les appareils qui servent à cet usage ont reçu le nom de *baromètres* (βάρος, poids; μέτρον, mesure).

Le tube de Torricelli est le type des *baromètres à cuvette*. — Pour obtenir des indications exactes, il est nécessaire de chasser l'humidité ou les bulles d'air qui peuvent rester adhérentes aux parois du tube pendant qu'il s'emplit de mercure : le gaz ou la vapeur d'eau se rendant à la partie supérieure, dans l'espace AC (fig. 55) qui doit être parfaitement vide et qu'on appelle la *chambre barométrique*, déprimerait la colonne liquide. On évite cette cause d'erreur en faisant bouillir progressivement le mercure dans toute la longueur du tube, avant de le retourner dans sa cuvette; une fois le tube installé, on reconnaîtra s'il a été parfaitement purgé d'air et d'humidité, en l'inclinant un peu, jusqu'à ce que le mercure en atteigne le sommet : la chambre barométrique doit alors se remplir complètement, et le liquide doit venir frapper le verre en faisant *marteau* sur le fond du tube.

77. Baromètres à cuvette usuels. — Pour mesurer commodément la hauteur mercurielle, dans les baromètres usuels, on applique

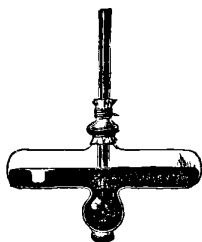


Fig. 59.

le tube et la cuvette sur une planchette qui porte une division en centimètres et millimètres, au moins dans la région que parcourt le sommet du mercure : le zéro de la division est au niveau du liquide dans la cuvette. On suppose donc que ce niveau reste invariable, bien que, en réalité, quand le mercure monte dans le tube, il s'abaisse dans la cuvette, et inversement. Pour atténuer le plus possible cet effet, on emploie une cuvette dont la forme est représentée par la figure 59, et qui a l'avantage de donner au mercure une très-large surface, sans en employer

cependant une masse trop considérable : les variations de hauteur du liquide dans le tube ne produisent sur le niveau extérieur que des variations à peu près insensibles.

78. Baromètre de Fortin. — Le baromètre de Fortin est un baromètre à cuvette qui offre le double avantage de permettre une grande précision et d'être facilement transportable. — La cuvette est

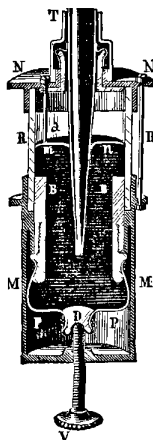


Fig. 60.

formée d'un cylindre de verre R (fig. 60), assujéti dans une monture métallique MN qui est garnie de bois à l'intérieur : le fond de la cuvette est formé par une peau de chamois PP ; une vis métallique V, qui traverse la monture extérieure, supporte sur son extrémité un disque de bois D fixé à la peau de chamois, en sorte qu'on fait 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 doit 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 la pointe *a* semble toucher exactement son image, vue par réflexion dans le mercure. — Sur le tube de laiton qui entoure le tube de verre T (fig. 61), est tracée une graduation dont le zéro correspond à l'extrémité de la pointe d'ivoire *a* : deux fentes longitudinales, opposées l'une à l'autre, permettent d'apercevoir le sommet de la colonne de

mercure. — Enfin, pour lire la hauteur barométrique, on place le curseur C de façon que le plan horizontal passant par les bords supérieurs de deux petites fenêtres opposées soit tangent à la convexité du

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 l'anneau qui est à sa partie supérieure, et lui laisser prendre la position d'un fil à plomb. — On peut encore l'assujettir sur un trépied, comme l'indique la figure 61 ; une *suspension de Cardan* lui permet de se placer librement dans la position verticale, sous l'action du poids considérable de mercure que contient la cuvette.

En général, quand un baromètre doit être transporté, on a toujours à craindre que les mouvements 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. Pour transporter le baromètre de Fortin, on soulève le fond mobile de la cuvette à l'aide de la vis V, jusqu'à ce que le mercure remplisse com-

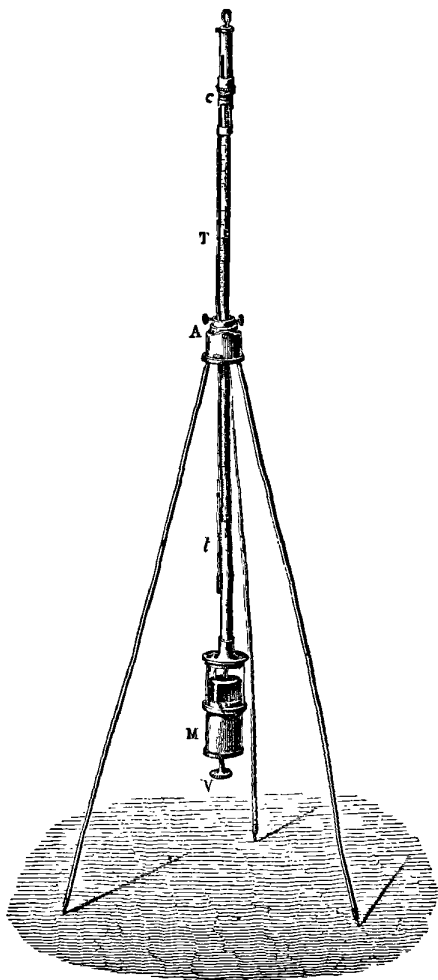


Fig. 61. — Baromètre de Fortin.

plètement et la cuvette et le tube : ainsi, les accidents que nous venons de signaler ne sont plus à craindre.

79. **Baromètres à siphon.** — Le baromètre à siphon consiste essentiellement en un tube recourbé ABD (fig. 62), dont la grande branche est fermée en A, et la petite branche ouverte en D. On a d'abord rempli de mercure la grande branche, en inclinant le tube à diverses reprises pour en faire sortir successivement tout l'air qu'elle contenait, puis on a placé l'instrument dans une position verticale. A ce moment, le mercure s'est abaissé dans la grande branche, et s'est élevé dans la petite : la distance verticale des deux niveaux m et C mesure la pression atmosphérique. — En effet, menons par le point m un plan horizontal mn . Le liquide mBn , qui est au-dessous de ce plan, serait en équilibre s'il n'était sollicité que par la pesanteur ; donc les pressions exercées sur des surfaces égales en m et en n , d'un côté par l'atmosphère, et de l'autre par la colonne de mercure nC , se font équilibre. — Ordinairement, pour mesurer cette colonne, on place une échelle divisée en millimètres entre les deux branches : une graduation ascendante, partant d'un point O situé vers le milieu, donne la distance h de ce point au niveau supérieur C ; une graduation descendante, partant du même point O, donne la distance h' au niveau inférieur m . Il suffit évidemment de faire la somme $h + h'$ pour avoir la hauteur barométrique.

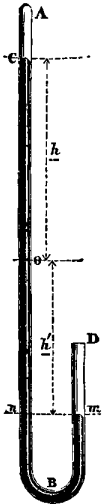


Fig. 62.

supérieur C ; une graduation descendante, partant du même point O, donne la distance h' au niveau inférieur m . Il suffit évidemment de faire la somme $h + h'$ pour avoir la hauteur barométrique.

80. **Baromètre de Gay-Lussac.** — Le baromètre de Gay-Lussac est un baromètre à siphon, avec quelques modifications destinées surtout à en rendre le transport plus facile. La plus petite branche est fermée à sa partie supérieure en E (fig. 63) ; une ouverture capillaire, pratiquée en o , permet à la pression atmosphérique de se transmettre à la surface m du mercure. La courbure qui réunit les deux branches est formée par un tube capillaire D destiné à empêcher l'air de pénétrer à travers la colonne mercurielle, quand on retourne l'instrument pour le transporter, ou qu'il est soumis en voyage à des secousses un peu violentes.

Afin d'éviter, d'une manière plus sûre encore, l'introduction de l'air dans le baromètre, le con-

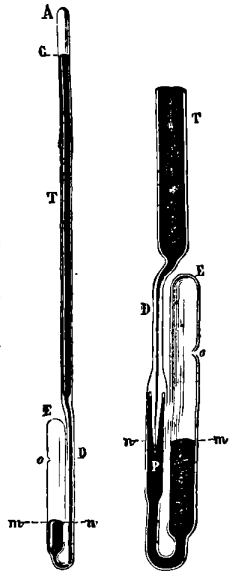


Fig. 63.

Fig. 64.

Baromètre de Gay-Lussac.

structeur Buntén a eu l'idée de ménager, au milieu de la branche capillaire, un renflement dans lequel pénètre une pointe *P* (*fig. 64*) qui se continue avec la grande branche *T*. Si une petite bulle d'air, introduite par la petite branche *E*, tend à monter dans la chambre barométrique, elle passe à côté de la pointe et va se loger à la partie supérieure du renflement, où elle n'altère en rien les indications du baromètre.

L'instrument tout entier est enfermé dans une gaine de laiton présentant des fentes longitudinales et opposées, par lesquelles on aperçoit les surfaces *m* et *C* du mercure : deux curseurs, semblables à ceux qui ont été décrits à propos du baromètre de Fortin, servent à déterminer avec exactitude les distances *h* et *h'* des deux niveaux au zéro commun des deux échelles.

81. Baromètre à cadran. — Le baromètre à cadran (*fig. 65*), employé comme baromètre d'appartement, est un baromètre à siphon, dont le mercure supporte, sur la surface libre dans la petite branche, un petit poids *p* suspendu à un fil qui vient passer sur une poulie très-mobile *M* : un contre-poids *p'* maintient le fil tendu. Une aiguille, fixée à l'axe de la poulie, parcourt un cadran tracé sur la planche qui masque l'appareil. Sur ce cadran, on marque, en face des diverses positions de l'aiguille, les hauteurs correspondantes du mercure, exprimées en millimètres; souvent aussi, quelques indications relatives à l'état de l'atmosphère, dont on verra plus loin la signification.

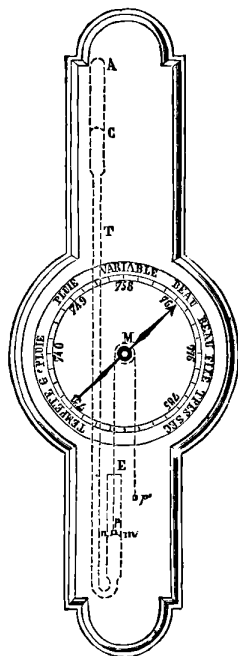


Fig. 65. — Baromètre à cadran.

82. Baromètres métalliques. — On construit aujourd'hui, en très-grande quantité, des baromètres dont le jeu repose sur l'élasticité des métaux, et dont le principal avantage est de présenter un très-petit volume : c'est à Vidie que paraît due la première idée, de ce genre d'instrument. — Dans le baromètre construit par M. Bourdon (*fig. 66*), un tube métallique *amb*, à parois minces et ayant une section aplatie (représentée à part, à droite de la figure), est fixé en son milieu *m*, et articulé par ses deux extrémités *a* et *b* avec un levier mobile *e*; les mouvements de ce levier sont transmis par un bras *gh*, et par suite l'ai-

guille *cd*, qui est supportée par une petite roue dentée (masquée sur la figure actuelle). Le tube *amb* est vide d'air et hermétiquement fermé :



Fig. 66.
Baromètre de M. Bourdon.

si la pression atmosphérique, qui s'exerce sur sa surface extérieure, vient à augmenter, il s'aplatit, et en même temps ses extrémités se rapprochent : l'aiguille marche alors dans le sens des aiguilles d'une montre. Lorsque la pression diminue, l'élasticité du tube ramène l'aiguille en sens contraire.

Une autre disposition du baromètre métallique, à laquelle s'était arrêté Vidie, et qui est aujourd'hui très-employée, consiste dans l'emploi d'une boîte métallique circulaire plate, dans laquelle le vide a été fait. La face supérieure de cette boîte est formée par une lame métallique, sur laquelle on a

déterminé un certain nombre de plis circulaires et concentriques, pour augmenter l'élasticité. Les variations de la pression atmosphérique se traduisent par des variations dans la dépression éprouvée par cette lame : ces mouvements sont transmis, par un système d'engrenages qui les amplifie, à une aiguille mobile sur un cadran.

Ces instruments ne peuvent évidemment être gradués que par comparaison avec un baromètre à mercure. — Ils présentent une assez grande sensibilité, mais l'état moléculaire du métal éprouve, à la longue, des modifications qui nécessitent, de temps à autre, une nouvelle comparaison de l'instrument avec le baromètre à mercure, et un nouveau réglage.

83. Variations barométriques. — La hauteur barométrique éprouve, dans un même lieu, des variations qui permettent souvent de préjuger, avec une certaine probabilité, l'approche des pluies ou du beau temps.

En France et dans les contrées de l'Europe qui en sont voisines, les vents humides et chauds qui viennent du sud-ouest font descendre le baromètre : en même temps, ils amènent ordinairement la pluie, parce que la vapeur d'eau qu'ils entraînent se condense en nous arrivant ;

un abaissement dans la colonne barométrique *coïncide* donc, d'ordinaire, avec l'approche des pluies. — Au contraire, les vents secs et froids du nord-est amènent le beau temps et font monter le baromètre.

De là l'usage adopté d'inscrire sur les baromètres d'appartements, en regard des chiffres qui indiquent les hauteurs de la colonne mercurielle, des indications relatives à l'état du ciel. — A la hauteur 758 millimètres, qui est la hauteur moyenne dans nos contrées, correspond l'indication *variable*; les autres indications se succèdent de part et d'autre, comme il suit, de 9 en 9 millimètres :

785 millimètres.	<i>Très-sec.</i>
776	»	<i>Beau fixe.</i>
767	»	<i>Beau temps.</i>
758	»	<i>Variable.</i>
749	»	<i>Pluie ou vent.</i>
740	»	<i>Grande pluie.</i>
731	»	<i>Tempête.</i>

Il va sans dire que ces indications n'ont aucun caractère de certitude absolue. — Elles peuvent d'ailleurs n'être applicables en aucune façon à des contrées dont la position géographique différerait de la nôtre.

CHAPITRE V

LOI DE MARIOTTE. — MANOMÈTRES

84. Loi de Mariotte. — *A une même température, les volumes d'une même masse de gaz sont inversement proportionnels aux pressions qu'elle supporte.* — Cette loi a été énoncée simultanément, vers 1670, en France par l'abbé Mariotte, et en Angleterre par Boyle; on peut la vérifier, pour l'air, à l'aide des expériences suivantes :

1° Le *tube de Mariotte* (fig. 67) est un tube de verre formé de deux branches très-inégales, la plus grande B ouverte, la plus petite A fermée. On verse du mercure dans le tube, et l'on fait en sorte que les surfaces du mercure M et M' dans les deux branches soient dans un même plan horizontal; c'est ce à quoi on parvient toujours, avec quelques tâtonnements, en inclinant le tube de manière à laisser sortir un peu

de l'air qu'on a ainsi enfermé dans la petite branche. Lorsque ce résultat est obtenu, le volume de l'air AM est mesuré par une graduation marquée sur la planche qui soutient le tube ; quant à la force élastique,

elle est égale à la pression atmosphérique qui s'exerce sur le même plan horizontal en M.

— On ajoute alors du mercure par la branche ouverte, jusqu'à ce qu'on ait réduit à moitié le volume de l'air ; soient alors N et C (fig. 68) les surfaces du mercure.

Si la loi de Mariotte est exacte, la force élastique de cet air doit être *double* de la pression atmosphérique : or, cette force élastique est égale à la pression exercée en N' sur le même plan horizontal,

c'est-à-dire à la pression de la colonne de mercure N'C augmentée de la pression atmosphérique ; donc N'C doit être égale à la hauteur barométrique, c'est-à-dire à 76 centimètres environ ; c'est en effet ce qu'on vérifie, au moyen de la graduation marquée le long du tube B.

— Si maintenant le tube est assez long pour qu'on puisse, en versant encore du mercure, réduire le volume *au tiers* du volume initial AM, on constatera que la force élastique sera devenue *triple* de la pression atmosphérique, c'est-à-dire que la hauteur du mercure en B,

au-dessus de la surface dans la branche A, sera égale à deux fois la hauteur barométrique. ou à environ deux fois 76 centimètres.

— Ainsi de suite, pour des volumes plus petits et des pressions plus grandes.

2° Mariotte a indiqué un moyen de vérifier encore la loi, en enfermant de l'air sous la pression atmosphérique et augmentant son volume. On prend un tube de verre cylindrique B (fig. 69) semblable à un tube de baromètre, et, au lieu de l'emplir complètement de mercure, on 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. 70) de manière que les surfaces du mercure dans ce tube et dans la cuvette soient sur un même plan horizontal ; à ce moment, la force élastique de l'air contenu en AM est égale à la pression atmosphérique. — On soulève alors le tube, jusqu'à ce que le volume occupé par l'air devienne *double* de ce qu'il était : on voit en même temps le mercure s'élever dans le tube. Or, si la loi de Mariotte est exacte, la force élastique de cet air doit être égale à la moitié de la

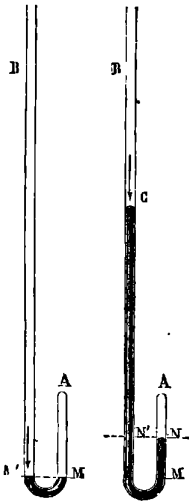


Fig. 67.

Fig. 68.

pression atmosphérique ; mais cette force élastique, ajoutée à la pression de la colonne de mercure soulevée, doit exercer, au niveau du mercure extérieur, une pression égale à la pression atmosphérique : donc la colonne soulevée 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 de l'air devienne *triple* du volume initial AM, si la loi de Mariotte est exacte, sa force élastique doit être *le tiers* de la pression atmosphérique. cette force élastique, ajoutée à la pression de la colonne soulevée, devant produire au niveau du mercure extérieur une pression égale à la pression atmosphérique, la colonne soulevée doit avoir environ les deux tiers de 76 centimètres, c'est-à-dire 50^o,7. C'est ce qu'on vérifie encore en mesurant cette colonne. — Ainsi de suite, pour des volumes plus grands et des forces élastiques moindres.

85. La loi de Mariotte est une loi approchée.

— La loi si simple que nous venons d'énoncer ne doit cependant pas être considérée comme étant toujours rigoureusement exacte. — L'expérience a montré que, si l'on mesure avec précision les variations de volume éprouvées

par divers gaz, sous l'influence de variations de pression un peu considérables, on observe généralement des écarts, par rapport à la loi de

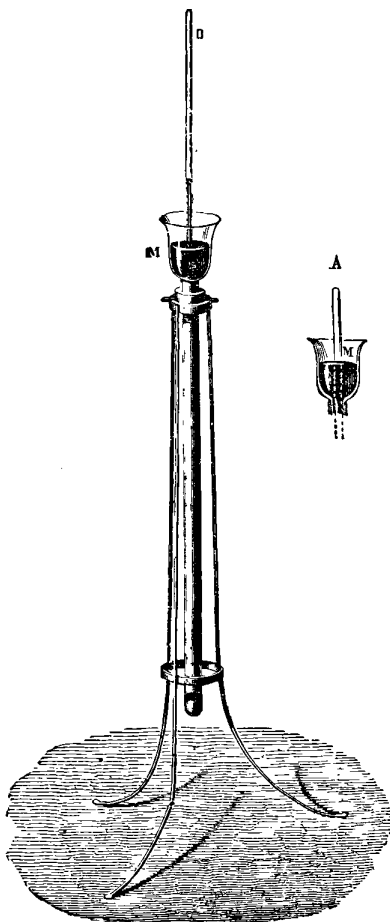


Fig. 69.

Mariotte. De plus, dans des conditions identiques de pression, la grandeur de ces écarts est différente, suivant la nature du gaz. — Pour faire concevoir les causes auxquelles se rattachent ces différences entre les divers gaz, il est nécessaire de dire d'abord quelques mots d'une propriété des gaz sur laquelle nous reviendrons plus loin.

Les physiciens modernes ont constaté que tous les gaz, quand on réduit progressivement leur volume en exerçant sur eux des pressions suffisamment grandes, arrivent à se *liquéfier*. Pour certains gaz, comme l'acide sulfureux, la liquéfaction se produit, à la température ordinaire, sous une pression représentant environ 2 fois la pression atmosphérique, ou 2 *atmosphères*. Pour d'autres, comme l'acide carbonique, il faut une pression de 35 à 40 atmosphères. Enfin, pour certains gaz, comme l'oxygène, l'azote, l'hydrogène, on ne peut arriver à la liquéfaction qu'en les maintenant à une température très basse, en même temps qu'on les soumet à une pression de plusieurs centaines d'atmosphères.

Il résulte de là que, pour des pressions voisines de la pression atmosphérique, certains gaz, comme l'acide sulfureux, doivent être considérés comme étant déjà *voisins de leur point de liquéfaction*. Pour ces mêmes pressions, certains autres gaz, comme l'acide carbonique, et surtout l'oxygène ou l'azote, peuvent être considérés comme étant encore *très éloignés de leur point de liquéfaction*.

Or, quand on cherche à vérifier la loi de Mariotte pour les divers gaz, en les soumettant à des pressions croissantes, on observe, en général, que leur volume éprouve une *diminution plus grande* que ne l'indiquerait la loi (*).

Mais ces écarts ne deviennent considérables, pour chaque gaz en particulier, que quand il se trouve dans des conditions qui le rapprochent suffisamment de son point de liquéfaction. — C'est ainsi, par exemple, que l'acide sulfureux, soumis à des pressions croissantes entre 1 et 2 atmosphères, éprouve déjà des diminutions de volume notablement supérieures à celles qu'indiquerait la loi de Mariotte. — Pour l'acide carbonique, il faut aller jusqu'à 15 à 20 atmosphères, pour constater des écarts sensibles. — Enfin, pour l'oxygène ou l'azote, les écarts ne sont notables que pour des pressions encore plus élevées.

En résumé, la loi de Mariotte est suffisamment approchée pour permettre de calculer les variations de volume que doit éprouver un gaz, sous des variations de pressions déterminées, à la condition que ce gaz reste toujours suffisamment éloigné de son point de liquéfaction. — Voici quelques exemples de problèmes de ce genre.

(*) L'hydrogène fait exception à cette règle. Il ne suit pas non plus la loi de Mariotte, mais, pour des pressions toujours croissantes, les diminutions de volume sont un peu *plus petites* que ne l'indiquerait la loi.

86. Problèmes généraux. — Évaluation du volume d'un gaz sous la pression normale. — Les deux problèmes généraux suivants se résolvent immédiatement, en appliquant la loi de Mariotte.

1^o *Connaissant le volume V d'une masse de gaz sous la pression P, trouver son volume V' sous une autre pression P', la température restant constante.* — L'énoncé même de la loi de Mariotte donne

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

2^o *Connaissant la force élastique P d'une masse de gaz dont le volume est V, trouver la force élastique P' qu'elle doit acquérir si son volume devient V', sa température restant constante.* — La loi de Mariotte donne

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

Voici l'une des applications de ces principes qui se présentent le plus fréquemment dans la pratique. — Quand on veut comparer entre elles diverses quantités de gaz, et que, pour faire cette comparaison, on a mesuré leurs volumes, les résultats ne sont immédiatement comparables qu'autant que les mesures ont été effectuées *sous une même pression*, pour chacun des gaz. Or, dans la plupart des cas, on ne peut pas disposer à volonté des pressions; mais, pourvu que les pressions des divers gaz soient connues, on peut, au moyen de la loi de Mariotte, calculer le volume que chacun de ces gaz occuperait, si la pression avait une valeur déterminée, la même pour tous. — On calcule, en général, les valeurs de ces volumes sous la pression de 760 millimètres, qui représente la valeur *moyenne* de la pression atmosphérique, ou ce qu'on désigne sous le nom de *pression normale*.

Soit, par exemple, un gaz contenu dans une éprouvette graduée en parties d'égalés capacités, et placée sur le mercure; soit 110 centimètres cubes le volume occupé par le gaz. Supposons que le niveau du mercure se trouve, dans l'éprouvette, à une hauteur de 15 millimètres au-dessus du niveau extérieur; supposons enfin que le baromètre indique, au même moment, une pression de 755 millimètres. — On voit immédiatement que la pression du gaz, dans l'éprouvette, est 755 — 15, ou 740 millimètres. Calculons le volume que ce gaz occuperait sous la pression normale de 760 millimètres. Si la pression était de 1 millimètre, le volume serait 110^{cc} × 740 : dès lors, sous la pression de 760 millimètres, le volume serait

$$\frac{110^{\text{cc}} \times 740}{760}, \text{ ou environ } 107 \text{ centimètres cubes.}$$

87. Problèmes sur les mélanges de gaz. — Lorsque plusieurs gaz sont introduits dans une même enceinte, ils ne restent jamais séparés les uns des autres, comme le font certains liquides : ils tendent toujours à se mélanger intimement entre eux, en sorte que, si l'on analyse, après un temps suffisant, des parties du mélange prises en divers points de la masse totale, on constate qu'elles contiennent chacune tous les gaz mis en présence, et dans les mêmes proportions. — Les divers problèmes que l'on pourra se proposer sur ces mélanges gazeux reviennent, en général, aux deux suivants :

1^o *Connaissant les volumes v, v', v'', \dots de plusieurs gaz séparés sous les pressions p, p', p'', \dots et le volume V que l'on fait occuper au mélange, trouver la force élastique P de ce mélange.*

Ce problème se résout immédiatement à l'aide de la loi de Mariotte, et de la loi du mélange des gaz, dont l'énoncé est dû à Dalton : *La force élastique d'un mélange gazeux est égal à la somme des forces élastiques de tous les gaz, considérés chacun comme occupant le volume total du mélange.*

On raisonnera de la manière suivante. Si le premier gaz occupait seul le volume V , sa force élastique serait $p \frac{v}{V}$; de même, les forces élastiques de chacun des autres gaz, sous le volume V , seraient respectivement $p' \frac{v'}{V}$, $p'' \frac{v''}{V}, \dots$ Donc, d'après la loi de Dalton, la force élastique du mélange sera

$$(1) \quad P = p \frac{v}{V} + p' \frac{v'}{V} + p'' \frac{v''}{V} + \dots;$$

2^o *Connaissant les volumes v, v', v'', \dots sous les pressions p, p', p'', \dots , et la pression P du mélange, trouver son volume V .*

En posant l'équation (1) comme précédemment, et la résolvant par rapport à l'inconnue actuelle V , il vient

$$V = \frac{pv + p'v' + p''v'' + \dots}{P};$$

équation qui fournit la solution du problème. — Remarquons que cette équation peut s'écrire :

$$V = v \frac{p}{P} + v' \frac{p'}{P} + v'' \frac{p''}{P} + \dots,$$

ce qui fournit cet autre énoncé de la loi de Dalton : *Le volume d'un*
IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

mélange gazeux est égal à la somme des volumes de tous les gaz, considérés comme soumis chacun à la pression totale du mélange. — Ce second énoncé donne immédiatement la solution du second problème.

MANOMÈTRES

88. Manomètres en général. — On appelle *manomètres* des instruments destinés à mesurer les forces élastiques des gaz ou des vapeurs. Ils sont surtout employés dans l'industrie, pour déterminer la force élastique de la vapeur dans les chaudières.

89. Manomètre à air libre. — Un tube de verre MN (*fig. 71*), ouvert à ses extrémités, plonge dans un petit vase métallique A contenant du mercure : ce vase est contenu dans un cylindre métallique B, à la partie supérieure duquel le tube est mastiqué en C. La vapeur, arrivant dans le cylindre par le robinet R, presse sur la surface du mercure et peut faire monter le liquide dans le tube. Pour graduer l'appareil, on suppose en général que le niveau du mercure reste invariable dans le vase A. — Cela posé, on voit que, si la pression de la vapeur est égale à la pression atmosphérique, le niveau dans le tube est sur le même plan horizontal que dans le vase A. Si la pression de la vapeur devient de 2 atmosphères, le mercure monte de 76 centimètres dans le tube ; si la pression devient de 3 atmosphères, la hauteur du mercure est de 2 fois 76 centimètres, et ainsi de suite. On marque donc 2, 3, 4 atmosphères sur la planche qui supporte le tube, à des distances de la surface extérieure du mercure égales à 1, 2, 3 fois 76 centimètres. Ces intervalles peuvent être ensuite subdivisés, pour indiquer les fractions d'atmosphère. — Quand la pression doit dépasser 4 ou 5 atmosphères, il est rare qu'on fasse usage des manomètres à air libre.

Ces manomètres ont l'avantage d'offrir une sensibilité assez grande, et qui demeure la même aux divers points de leur échelle. — Ils ont l'inconvénient de présenter une grande longueur, quand ils doivent mesurer des pressions un peu considérables.

90. Manomètre à air comprimé. — Le manomètre à air comprimé (*fig. 72*) diffère du manomètre à air libre en ce que le tube est fermé en M, à sa partie supérieure. L'air contenu dans ce tube est comprimé quand le mercure s'élève, en sorte que, pour évaluer la



Fig. 71
Manomètre
à air libre.

pression exercée par la vapeur sur le mercure extérieur au tube, il faut ajouter à la force élastique de cet air, qui varie en raison inverse de son volume, la pression de la colonne de mercure. On voit donc que le point où l'on doit marquer 2 atmosphères se trouve plus bas que la moitié du tube ; le point où l'on doit marquer 3 atmosphères est plus bas que le tiers, etc. ; il en résulte que ces points vont en se rapprochant de plus en plus les uns des autres. Ils peuvent d'ailleurs être déterminés d'une manière précise, soit par le calcul, soit par comparaison avec un autre manomètre.

Ces manomètres ont l'avantage d'être plus transportables que les précédents. — Ils offrent cet inconvénient, que les divisions correspondantes à des pressions un peu grandes, comme 12 ou 15 atmosphères, sont très-rapprochées les unes des autres. La plus petite erreur, commise dans l'évaluation du niveau du mercure, conduit alors à une erreur très-grande dans l'évaluation des pressions.

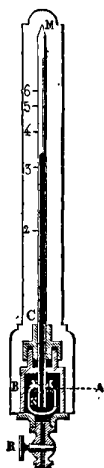


Fig. 72. — Manomètre à air comprimé.

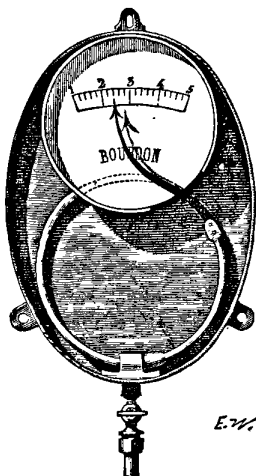


Fig. 75. — Manomètre de M. Bourdon.



Fig. 74.

91. **Manomètre métallique de M. Bourdon.** — Un tube enroulé en spirale et dont la section est semblable à celle qui est indiquée à droite de la figure 66, commun. ue avec la chaudière par l'une de ses extrémités qui est fixe (fig. 74) ; quand la pression de la vapeur augmente, la spirale tend à s'ouvrir, et l'extrémité libre du tube entraîne une aiguille qui se meut sur un cadran (fig. 73). — Pour graduer ces

instruments, on les met en communication avec un espace où l'on comprime de l'air, et l'on détermine les valeurs successives de la pression au moyen d'un manomètre déjà construit : on obtient ainsi les principaux points de repère qui permettent d'indiquer, sur le cadran, les pressions évaluées en atmosphères.

Ce manomètre métallique, et quelques autres dont le jeu repose également sur l'élasticité des métaux, ont l'avantage d'être très-peu fragiles et très-portatifs; aussi tend-on à les substituer presque partout aux manomètres à liquides.

MACHINE PNEUMATIQUE

92. **Description.** — La machine pneumatique est destinée à enlever

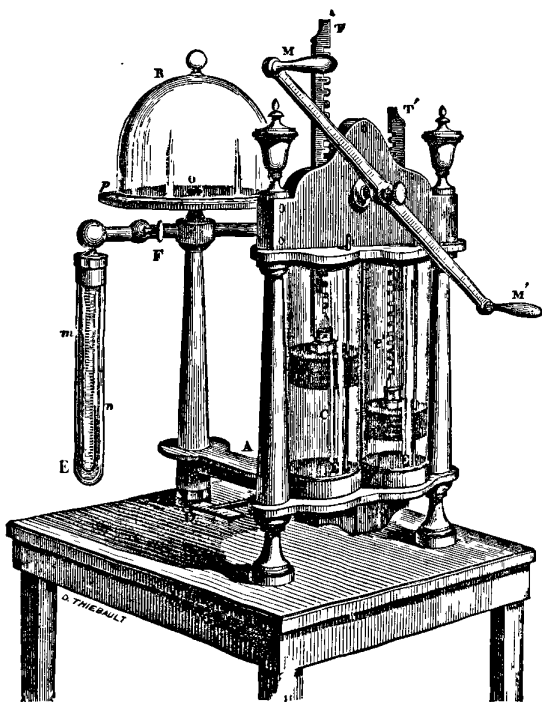


Fig. 75. — Machine pneumatique.

l'air d'un espace limité : elle est d'autant plus parfaite qu'elle rend plus

petite la force élastique de l'air restant, c'est-à-dire qu'elle approche davantage du vide absolu. — La première réalisation d'un appareil destiné à cet usage est due à Otto de Guericke, bourgmestre à Magdebourg : depuis cette époque, les constructeurs ou les physiciens ont fait subir à l'appareil qu'il avait imaginé un nombre considérable de modifications. — Nous décrirons la machine pneumatique telle qu'on la trouve aujourd'hui dans la plupart des cabinets de physique.

La partie essentielle de la machine pneumatique est un système de deux corps de pompe cylindriques, *C*, *C'* (fig. 75), contenant chacun un piston, et communiquant par leur partie intérieure avec un seul et même

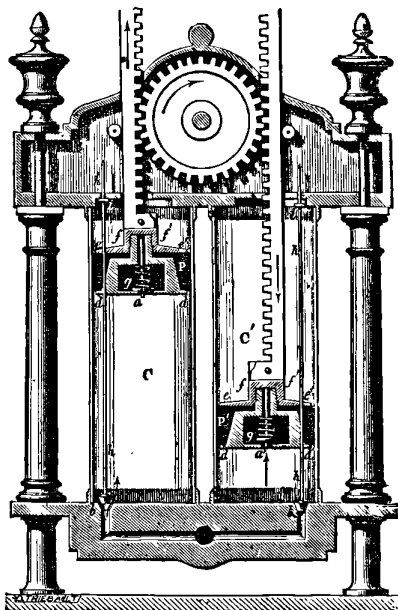


Fig. 76.

Coupe verticale des corps de pompe et des pistons.

conduit en fonte, situé au-dessous de la plaque *A* : ce conduit vient s'ouvrir en *O* au centre d'un plateau *p* ou *platine* ; la platine est formée d'un disque de cristal usé à l'émeri, de façon que sa surface supérieure soit bien plane. Sur ce disque, on pourra appliquer les cloches dans lesquelles on se propose de faire le vide, après avoir eu soin d'en enduire les bords

de suif, afin qu'il ne reste pas d'interstices entre eux et la platine. Un pas de vis, pratiqué à l'extrémité O du conduit, permet également d'y adapter les appareils dont on veut enlever l'air. — Nous appellerons *réceptient*, en général, l'espace dans lequel la machine devra raréfier l'air.

La figure 76 représente une section des deux corps de pompe, par un plan vertical mené suivant leurs axes : il nous suffira de décrire l'un d'eux. — Le piston est formé de rondelles de cuir circulaires, pressées entre deux plaques métalliques dd' , ee' , qu'on a serrées l'une contre l'autre 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 ressort à boudin. Le piston est traversé par une tige métallique hh , qui y passe à frottement dur, c'est-à-dire de façon qu'il tende toujours à entraîner la tige dans ses mouvements, mais qu'il puisse cependant glisser sur elle quand elle viendra buter par une de ses extrémités sur un point fixe. Cette tige porte, à sa partie inférieure, un bouchon conique qui peut s'engager exactement dans l'entrée b du conduit ; à sa partie supérieure, 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, engrènent avec une même roue dentée, qu'on mettra en mouvement alternativement dans un sens et dans l'autre à l'aide de la manivelle MM' (fig. 75) : par cette disposition, l'un des pistons s'abaissera pendant que l'autre sera soulevé, et réciproquement.

95. Jeu de la machine. — Pour concevoir l'effet produit par les mouvements de l'un des pistons, supposons que ce piston, d'abord appliqué sur le fond du corps de pompe, vienne à être soulevé. La tige métallique h étant d'abord entraînée dans ce mouvement, le bouchon conique est élevé un peu au-dessus de l'ouverture ; mais bientôt, la tige venant buter par son arrêt i contre la base supérieure du corps de pompe, le piston continue seul de monter. Pendant ce mouvement, l'air contenu dans le réceptient se répand dans le corps de pompe, en sorte que sa force élastique va en décroissant ; le disque g reste donc appliqué sur l'ouverture a , par la pression atmosphérique qui s'exerce sur sa face supérieure. — Le piston étant arrivé en haut de sa course, considérons ce qui se passe lorsqu'il vient à descendre. La tige h étant immédiatement entraînée, le bouchon conique viendra fermer l'ouverture b ; l'air enfermé dans le corps de pompe acquerra une force élastique croissante, et il soulèvera la soupape g quand sa force élastique sera devenue supérieure à la pression atmosphérique. Si le piston vient s'appliquer sur le fond du cylindre, l'air enfermé dans le corps de pompe

sera complètement expulsé. — Les mêmes phénomènes se reproduiront aux coups de piston suivants.

L'emploi de deux corps de pompe, au lieu d'un seul, a l'avantage de rendre l'opération à la fois plus rapide et moins pénible. Elle est plus rapide, puisque les deux pistons fonctionnent à la fois, et de la même manière. Elle est moins pénible, parce que les pressions que l'atmosphère exerce sur les faces supérieures des deux pistons se font équilibre : l'effort que l'on doit faire résulte donc seulement de la différence des forces élastiques de l'air dans les deux corps de pompe, et aussi des frottements qui se produisent entre les pistons et les surfaces intérieures des cylindres.

94. Clef de la machine. — Un robinet, qu'on nomme la *clef* de la machine, et qu'on voit en D dans la figure 75, permet d'interrompre la communication entre les corps de pompe et le récipient. Ce robinet contient, outre sa voie ordinaire, un petit canal longitudinal qui en est indépendant et qui se recourbe de manière à venir déboucher, quand le robinet est fermé, soit dans la partie du conduit qui est du côté des corps de pompe (fig. 77), soit dans celle qui se rend au récipient (fig. 78). En enlevant la cheville K qui bouche l'extrémité *m* du petit canal, on laisse ainsi rentrer l'air, soit dans les corps de pompe, soit dans le récipient : des lettres gravées extérieurement sur la

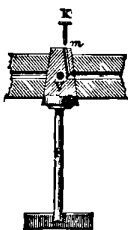


Fig. 77.

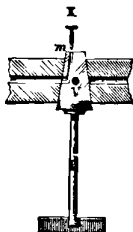


Fig. 78.

clef elle-même indiquent à l'opérateur ces deux positions. Il suffit ensuite de tourner d'un quart de circonférence pour *ouvrir* la clef, et faire communiquer les deux parties du conduit au moyen de la voie *V*.

95. Calcul de la force élastique de l'air restant, après un nombre déterminé de coups de piston. — Désignons par *V* le volume du récipient et des conduits, par *v* le volume du corps de pompe, par *H* la force élastique de l'air avant l'opération : cette force élastique est, en général, égale à la pression atmosphérique. Quand on soulève pour la première fois le piston, l'air du récipient, qui occupait le volume *V* sous la pression *H*, acquiert le volume *V + v* ; si donc on désigne par *h*₁ la force élastique au moment où le piston arrive au haut de sa course, on aura, d'après la loi de Mariotte :

$$\frac{h_1}{H} = \frac{V}{V + v}, \quad \text{d'où} \quad h_1 = H \frac{V}{V + v};$$

ce qui montre 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 après le second coup de piston, il suffira de multiplier l'expression précédente par $\frac{V}{V+v}$, ce qui donnera $H \left(\frac{V}{V+v} \right)^2$, et ainsi de suite. — Donc, si on désigne par h_n la force élastique après n coups de piston, on aura :

$$h_n = H \left(\frac{V}{V+v} \right)^n.$$

Les valeurs de h_n vont en décroissant indéfiniment à mesure que n augmente, puisque la quantité entre parenthèses est plus petite que l'unité. On voit donc que, en supposant la machine parfaite, il y aurait toujours avantage à donner un nombre de coups de piston de plus en plus considérable : la force élastique pourrait atteindre une valeur *aussi petite qu'on voudrait*, mais sans devenir jamais rigoureusement nulle.

96. Influence des causes qui limitent l'effet de la machine. — Quelque soin qu'on ait apporté à la construction d'une machine pneumatique, il reste toujours, sous les pistons, quand ils sont au bas de leur course, de petites cavités où peut se loger l'air : c'est ce qu'on nomme l'*espace nuisible*. Or, admettons, pour un instant, qu'il soit possible de réduire la force élastique à une valeur f telle, que l'air répandu dans le corps de pompe puisse être réduit au volume de l'espace nuisible sans acquérir une force élastique supérieure à la pression atmosphérique H : la soupape intérieure du piston cesserait de se soulever, et l'air cesserait de s'échapper au dehors. 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 pression égale à la pression atmosphérique H lorsqu'il serait réduit au volume u ; on aurait donc, d'après la loi de Mariotte,

$$\frac{f}{H} = \frac{u}{v}, \quad \text{d'où} \quad f = H \cdot \frac{u}{v}.$$

Une théorie plus complète montre même que c'est là une limite dont on peut approcher de plus en plus, mais *qu'on ne peut jamais atteindre*.

Enfin, l'imperfection la plus grave, pour la plupart des machines, est l'existence de petits interstices livrant passage à l'air, particulièrement autour des soupapes intérieures des pistons. L'air extérieur pénétrant par ces interstices, avec une vitesse d'autant plus grande que la pression

intérieure devient plus faible, il arrive un moment où la quantité d'air qui rentre, pendant un temps déterminé, est égale à celle que la machine expulse pendant le même temps, et il n'y a plus aucun avantage à continuer la manœuvre.

97 Manomètre de la machine pneumatique. — La figure 75 montre, sur le côté de la machine, une éprouvette de verre E, mastiquée dans une monture métallique qui la fait communiquer avec les conduits. Dans cette éprouvette, est un petit manomètre à mercure, destiné à faire connaître la force élastique de l'air qui reste dans le récipient. Il se compose d'un tube de verre en forme d'U, dont l'une des branches *n* est ouverte et l'autre *m* fermée : on l'a rempli de mercure comme un baromètre à siphon (79) ; mais, les branches n'ayant guère qu'une longueur de 20 centimètres, quand la pression de l'atmosphère s'exerce dans la branche ouverte, le liquide reste appliqué contre l'extré-

mité de la branche fermée ; de là, le nom de *baromètre tronqué*, qu'on donne souvent à cet appareil. — Lorsque la force élastique de l'air dans la machine est devenue suffisamment faible, le mercure s'abaisse dans la branche fermée et monte dans la branche ouverte ; la hauteur du mercure comprise entre les deux niveaux mesure, à chaque instant, la pression de l'air restant (79).

97a. Pompe à main, pour raréfier ou comprimer les gaz. — La pompe à main présente une disposition plus simple que la machine pneumatique. — Elle peut servir à volonté, comme nous allons le voir, à raréfier ou à comprimer les gaz.

Elle est formée d'un seul corps de pompe MN (fig. 78a), contenant un piston plein P :

on met ce piston 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 cône métallique, qui pénétre dans une cavité

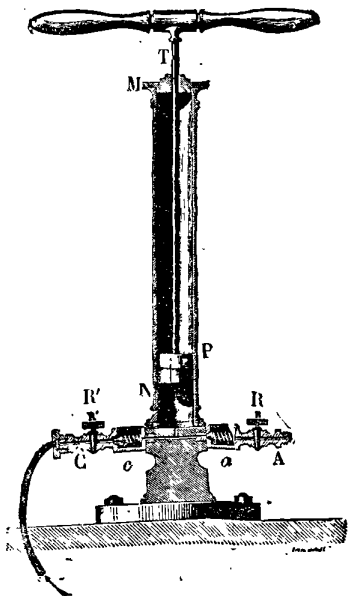


fig. 78a. Pompe à main.

pratiquée dans l'axe du tube ; un petit ressort spiral sert à maintenir chacun des cônes faiblement appliqué dans la cavité qui le reçoit. La figure montre que ces soupapes sont placées de façon à devoir 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.

Si l'on veut employer la pompe à *raréfier* l'air dans un récipient, on met le tube C en communication avec ce récipient. — Il est aisé de voir, en raisonnant absolument comme nous l'avons fait pour la machine pneumatique, que les mouvements alternatifs imprimés au piston produisent dans le récipient une raréfaction successive ; l'air s'échappe par la soupape *a* et le conduit A. — L'espace nuisible ayant, par la construction même, une valeur assez grande, la pompe à main ne peut être employée que pour obtenir un degré de raréfaction peu éloigné.

Si l'on veut, au contraire, employer la pompe à *comprimer* de l'air ou un gaz quelconque dans un récipient, on met le conduit A en communication avec ce récipient, et on fait communiquer le conduit C avec l'atmosphère ou avec un réservoir à gaz. — Quand on soulève le piston, la soupape *c* s'ouvre et laisse entrer l'air ou le gaz dans le corps de pompe ; quand on fait descendre le piston, la soupape *a* s'ouvre à son tour, dès que la force élastique intérieure surpasse celle qui s'exerce du côté A, et le gaz est refoulé dans le récipient.

POMPES. — SIPHON

98. **Des diverses espèces de pompes à liquides.** — On a fait usage de pompes, pour élever l'eau ou les liquides en général, bien avant l'invention de la machine pneumatique ou des pompes à gaz. Le jeu de ces appareils est fondé, comme on va le voir, sur les mêmes principes que celui des pompes à gaz.

Les diverses espèces de pompes à liquides peuvent se rapporter à trois types principaux : 1° la *pompe aspirante* ; 2° la *pompe foulante* ; 3° la *pompe aspirante et foulante*. — Dans ce qui va suivre, nous supposons que le liquide à élever est de l'eau.

99. **Pompe aspirante.** — La pompe aspirante (*fig 79*) 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 dont on veut élever l'eau *mn* ; à sa partie supérieure, un *tuyau de déversement* D. A la jonction du tuyau d'aspiration et du corps de pompe, est placée une soupape, qui peut se soulever pour permettre le passage de l'air ou du liquide de bas en haut, mais qui ne peut s'abaisser au-dessous du plan horizontal de jonction : c'est en général un *clapet*, comme celui qu'on a figuré en S, c'est-à-dire une petite plaque métallique mobile autour d'une charnière. Le piston est garni, sur son contour, d'é

toupes qui s'appliquent exactement sur la surface interne du corps de pompe : il est traversé par une ou deux ouvertures garnies elles-mêmes de clapets s , s' .

Supposons que, la pompe n'ayant pas encore fonctionné, on soulève pour la première fois le piston. Comme il raréfie l'air au-dessous de lui, les soupapes s , s' restent fermées par la pression atmosphérique extérieure; au contraire, la soupape S se soulève, pour laisser passer au-dessus d'elle une partie de l'air qui était dans le tuyau d'aspiration : la force élastique de cet air devenant moindre, l'eau du puisard s'élève dans le tuyau T , jusqu'à ce que la pression de la colonne d'eau située au-dessus de mn , augmentée de celle 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 quand le piston est au haut de sa course : la soupape S retombe par son propre poids, et, quand le piston descend, 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

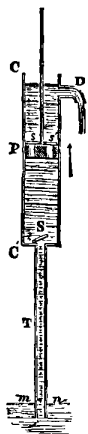


Fig. 79.
Pompe
aspirante.

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 élève toute l'eau que supporte sa face supérieure, et la fait couler par le tuyau de déversement D . Ces mouvements font d'ailleurs, en même temps, arriver l'eau du puisard dans le tuyau d'aspiration et dans le corps de pompe, en sorte que l'appareil reste toujours entièrement plein jusqu'au tuyau de déversement.

100. En modifiant un peu la pompe aspirante, on peut la rendre capable d'élever l'eau à une hauteur quelconque au-dessus du corps de pompe. — Pour cela, il suffit d'adapter, à la place du tuyau de déversement D , un *tuyau d'ascension* E (fig. 80), et de fermer la partie su-

(*) L'expérience a montré que l'eau ne peut même pas, dans la pratique, atteindre cette hauteur, à cause des fuites qui se produisent entre le piston et le corps de pompe, et 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, des hauteurs dépassant 7 à 8 mètres.

périeure du corps de pompe, en faisant passer la tige du piston au travers d'une garniture d'étoupes. Chaque fois que le piston monte, il soulève dans le tuyau d'ascension E l'eau qui est au-dessus de lui; quand il descend, la soupape S se ferme, et l'eau contenue dans le corps de pompe passe au-dessus du piston, en franchissant les soupapes *s*, *s'*, sans qu'il se produise aucun mouvement dans le tuyau d'ascension E. — La pompe ainsi modifiée prend le nom de *pompe aspirante et élévatoire*.

Les pompes destinées aux usages domestiques sont souvent disposées de façon qu'une même pompe puisse servir, à volonté, comme pompe simplement aspirante, pour amener l'eau à la surface du sol, ou comme pompe aspirante et élévatoire, pour faire parvenir l'eau aux étages supérieurs des bâtiments : il suffit, pour cela, d'adapter, à la base du tuyau E de la figure 80, un petit tube de déversement comme le tube D de la figure 79. Ce tube D étant muni d'un robinet, si ce robinet est ouvert, l'eau s'écoule par cet orifice; s'il est fermé, elle s'élève dans le tuyau d'ascension.

101. **Pompe foulante.** — La pompe foulante (fig. 81) 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 s'ouvrant 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 se précipite dans le cylindre, en franchissant la soupape S, pour remplir le vide qui tend 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 soulève la soupape *s*, et chasse l'eau du corps de pompe dans le tuyau de refoulement. Dès que le liquide a atteint l'extrémité libre 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 produit *pendant la descente du piston* : c'est le contraire de ce qui avait lieu dans la pompe aspirante.

La *pompe à incendie* n'est autre chose qu'un système de deux pompes foulantes accouplées et placées dans une bêche remplie d'eau; les pis-



Fig. 80.
Pompe aspirante et élévatoire.



Fig. 81.
Pompe foulante.

tons des deux pompes ont des mouvements inverses, comme ceux de la machine pneumatique. Les deux pompes envoient l'eau tour à tour dans un réservoir qui contient de l'air : cet air, refoulé d'abord par l'arrivée de l'eau, réagit ensuite en vertu de son élasticité et pousse l'eau dans un tuyau d'ascension. On obtient ainsi un jet sensiblement régulier.

102. Pompe aspirante et foulante. — La pompe aspirante et foulante (fig. 82) est une combinaison des précédentes. Elle se compose d'un tuyau d'aspiration T, d'un corps de pompe muni d'un piston plein P, et d'un tuyau de refoulement R, qui prend naissance à la base du corps de pompe. Quand le piston monte, l'eau arrive par aspiration dans le corps de pompe; quand le piston descend, elle est refoulée dans le tuyau R. Le jeu des soupapes se comprend immédiatement, d'après ce qui a été dit dans les cas précédents.

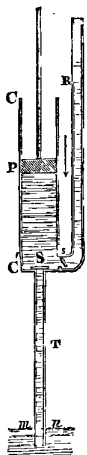


Fig. 82. — Pompe aspirante et foulante.

Quand le tuyau de refoulement R offre une très-grande hauteur, l'eau exerce sur la face inférieure du piston une pression considérable, et tend à chasser le liquide au travers des interstices qui se forment entre le piston et la paroi du corps de pompe.

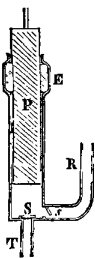


Fig. 85.

— On parvient à réaliser une fermeture plus exacte au moyen d'un *piston plongeur* (fig. 85) : 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 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.

105. Siphon. — Le siphon est un tube recourbé, souvent employé pour faire passer des liquides d'un vase dans un autre. — Soit un tube *aca'* (fig. 84), dont nous supposons les deux branches entièrement pleines d'eau, et plongeant dans des masses d'eau dont les surfaces *mn* et *m'n'* soient à des hauteurs différentes; soient *h* et *h'* les distances verticales de ces surfaces au point le plus élevé *c* du siphon; désignons par *H* la pression atmosphérique évaluée en colonne d'eau, c'est-à-dire environ $10^m,53$, et supposons, pour un instant, le liquide en repos. La pression at-

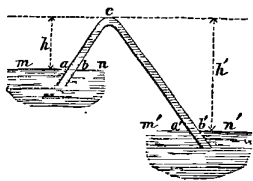


Fig. 84.

mosphérique s'exerce sur la surface mn à l'extérieur du tube, et se transmet en tous sens dans l'intérieur du liquide : la couche de liquide ab , intérieure au tube et située au niveau de mn , est donc sollicitée de bas en haut par la pression d'une colonne d'eau ayant pour hauteur $H - h$. De même, la couche $a'b'$, située au niveau de $m'n'$, est sollicitée de bas en haut par la pression d'une colonne d'eau ayant pour hauteur $H - h'$. Ces deux pressions étant inégales, et se transmettant d'ailleurs à tout le liquide du siphon, l'équilibre ne peut subsister, et l'eau est entraînée dans le tube, dans le sens aca' , c'est-à-dire *du niveau le plus élevé mn vers le niveau le plus bas $m'n'$* ; la pression qui détermine ce mouvement est exprimée par une colonne d'eau ayant pour hauteur $(H - h) - (H - h')$ ou bien $h' - h$.

L'écoulement a lieu encore lorsque, l'une des branches ca du siphon plongeant dans un liquide mn , l'autre branche ca' s'ouvre dans l'atmosphère, pourvu que le liquide ait été amené dans la seconde branche au-dessous du niveau en mn , c'est-à-dire pourvu que le siphon ait été *amorcé*. — C'est ce dont on se rendra facilement compte par un raisonnement tout à fait semblable au précédent.

On peut amorcer un siphon en plongeant la plus petite branche dans le liquide et aspirant avec la bouche par l'autre extrémité : mais ce procédé, fréquemment employé lorsque le liquide est de l'eau, est inapplicable quand il s'agit de liquides tels que des acides. On fait alors usage de siphons semblables à celui de la figure 85. Au voisinage de l'extrémité de la grande branche BC , est soudé un tube ascendant am ; on plonge l'extrémité A de la petite branche dans le liquide et l'on aspire avec la bouche 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 était coupée en a , puisque la pression de l'atmosphère s'exerce librement en ce point par le tube ma , qui reste plein d'air.

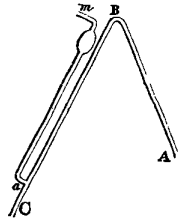


Fig. 85.

PRINCIPE D'ARCHIMÈDE APPLIQUÉ AUX GAZ. AÉROSTATS

104. Poussée éprouvée par les corps plongés dans l'air.

— Le raisonnement par lequel on a démontré le principe d'Archimède pour les corps plongés dans les liquides (51) s'applique, sans modification, aux corps plongés dans les gaz.

Donc : *Tout corps plongé dans un gaz éprouve une poussée verticale de bas en haut, égale en grandeur au poids du gaz déplacé.*

Dès lors, ce qu'on observe directement, quand on détermine le poids d'un corps placé dans l'air, ce n'est pas son *poids réel*, c'est-à-dire la résultante des actions de la pesanteur sur tous ses points, mais son *poids apparent*, c'est-à-dire la différence entre le poids réel et la poussée qu'il éprouve de la part de l'air.

105. Nécessité des corrections à faire subir aux pesées effectuées dans l'air. — Dans les pesées effectuées au moyen de la balance, à l'aide de la double pesée, par exemple, on doit tenir compte de la poussée de l'air sur les poids échantillonnés dont on fait usage, et sur les corps dont on cherche le poids. — Or, les marques que portent les poids échantillonnés indiquent leur valeur *dans le vide* ; la pression qu'ils exercent sur le plateau n'est donc que la différence entre la valeur que leurs marques indiquent et la poussée qu'ils éprouvent. De même, la pression exercée sur le plateau par le corps soumis à la pesée est égale à la différence entre son poids réel et la poussée éprouvée par lui. — C'est en égalant entre elles ces deux *pressions*, qu'on obtient une équation permettant de calculer le poids réel du corps. — Nous nous contenterons d'avoir indiqué la nécessité de ces corrections, sans entrer à ce sujet dans plus de détails.

106. 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 qui peuvent y être réunis, est moindre que le poids de l'air déplacé, la poussée est supérieure au poids, et le système 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, fabricants de papier à Annonay. C'étaient des globes de toile, doublés de papier à l'intérieur 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 de fils de fer, rempli de matières en combustion, pour maintenir la température de l'air intérieur. — Ces appareils ont le grand inconvénient d'être trop dangereux pour que des aéronautes puissent s'aventurer dans une ascension de ce genre sans la plus grave imprudence. Malgré ces dangers, de semblables ascensions furent entreprises un certain nombre de fois, et quelques-unes coûtèrent la vie aux voyageurs.

Les *ballons* proprement dits sont des aérostats gonflés avec de l'hydrogène, ou avec le gaz d'éclairage. C'est avec des sacs de papier remplis d'hydrogène qu'avaient été faites les premières expériences des frères Montgolfier. Il est à remarquer que le gaz employé par

eux, le physicien Charles enleva dans les airs, au Champ de Mars, un ballon gonflé avec de l'hydrogène : l'enveloppe avait 4 mètres de diamètre.

Les ballons que l'on construit aujourd'hui ont des dimensions beaucoup plus considérables ; l'enveloppe est formée, soit de taffetas verni, soit d'une feuille mince de caoutchouc, placée entre deux feuilles de taffetas. A la partie inférieure, est une ouverture destinée à l'introduction du gaz ; à la partie supérieure, une autre ouverture garnie d'une soupape, dont nous verrons plus loin l'usage. Le ballon est couvert d'un filet, qui soutient une nacelle destinée à recevoir les aéronautes et le lest.

107. Force ascensionnelle. — On nomme *force ascensionnelle* d'un aérostat, à un moment donné, la différence qui existe entre la poussée due à l'air qui l'environne et son poids total.

Lorsque l'enveloppe du ballon, vidée autant que possible de l'air qu'elle contenait, reçoit le gaz et se gonfle progressivement, la force ascensionnelle croît à mesure que le volume augmente, et il devient bientôt nécessaire de retenir le ballon au moyen de cordes, jusqu'au moment où l'on veut l'abandonner. — L'enveloppe doit d'ailleurs toujours être assez vaste pour que l'aérostat puisse s'élever avant d'être complètement distendu : en effet, si son volume ne pouvait plus augmenter, en arrivant dans les couches de l'atmosphère où la pression acquiert successivement des valeurs décroissantes, il éprouverait un excès de pression intérieure qui pourrait amener la déchirure de l'enveloppe.

108. Variations de la force ascensionnelle pendant l'ascension. — Admettons que l'enveloppe soit assez vaste pour continuer toujours à se distendre, à mesure que le ballon s'élève : son volume varie alors 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 d'une enveloppe absolument imperméable, conserverait toujours une force ascensionnelle *constante*. — Mais il faut remarquer que les accessoires sont des corps solides, dont le volume ne varie pas, et qui, par suite, éprouvent une poussée de plus en plus faible à mesure que le milieu ambiant devient plus rare. Il faut remarquer surtout que l'enveloppe n'est jamais imperméable ; une partie de l'hydrogène s'échappe au travers des parois et est remplacée par de l'air. Or, d'après les lois suivant lesquelles s'effectue cet échange de gaz, l'air qui pénètre 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 de la force ascensionnelle. — Aussi est-on obligé, si l'on veut continuer à s'élever, ou même se maintenir quelque temps à une même hauteur, de jeter une partie du sable qui sert de lest.

L'aéronaute, n'ayant autour de lui aucun point fixe qui lui permette de constater s'il monte ou s'il s'arrête, observe le baromètre, dans lequel la colonne mercurielle diminue à mesure qu'il s'élève. — Lorsqu'il veut opérer la descente, il ouvre, à l'aide d'une corde qui se rend de la nacelle, la soupape qui ferme l'ouverture supérieure du ballon, de manière à laisser échapper du gaz.

109. Calcul de la force ascensionnelle, au départ.— Supposons qu'il s'agisse d'un ballon gonflé avec de l'hydrogène. Soit V le volume en mètres cubes du gaz introduit, au moment du départ, sous la pression H de l'air environnant; v le volume en mètres cubes des corps non gazeux du système, et p leur poids. On sait que le poids d'un mètre cube d'air, à 0° et sous la pression de 760 mm , est $1^k,3$; nous verrons plus loin que le poids d'un mètre cube d'hydrogène, dans les mêmes conditions, est $1^k,3 \times 0,0692$; nous admettrons que la température soit partout de 0° . — Le gaz ayant un volume V sous la pression H , son volume, sous la pression de 760 mm , serait $V \frac{H}{760}$: son poids est donc $1^k,3 \times 0,0692 \times V \frac{H}{760}$. De même, le poids de l'air déplacé par l'enveloppe est $1^k,3 \times V \frac{H}{760}$. L'air déplacé par les corps non gazeux du système ayant un volume v sous la pression H , son volume, sous la pression de 760 mm , serait $v \frac{H}{760}$; donc son poids est $1^k,3 \times v \frac{H}{760}$. Donc la force ascensionnelle, c'est-à-dire la différence entre la somme des poussées et la somme des poids, est

$$1^k,3 \times V \frac{H}{760} + 1^k,3 \times v \frac{H}{760} - 1^k,3 \times 0,0692 \times V \frac{H}{760} - p,$$

ou bien

$$1^k,3(1 - 0,0682)V \frac{H}{760} + 1^k,3 \times v \frac{H}{760} - p.$$

Si les objets que l'aérostat doit enlever sont déterminés à l'avance, en sorte que p et v soient connus, et si l'on veut donner à la force ascensionnelle une valeur déterminée A , exprimée en kilogrammes, on égalera l'expression précédente à la quantité A , et l'on aura ainsi une équation d'où l'on tirera la valeur de V , c'est-à-dire du nombre de mètres cubes de gaz qu'il faut introduire dans le ballon, sous la pression du lieu de départ. — Quant au volume à donner à l'enveloppe, il doit être plus considérable, comme on l'a vu (107): on fait en sorte qu'il surpasse, d'un tiers environ, la valeur du volume V de gaz qui est fournie par le calcul.

LIVRE II. — CHALEUR

CHAPITRE PREMIER

DILATATIONS

110. Dilatation des corps par la chaleur. — Les corps se dilatent quand ils s'échauffent, et se contractent quand ils se refroidissent. C'est ce que nous allons montrer par l'expérience, en opérant successivement sur des corps *solides, liquides et gazeux*.

1° Corps solides. — Les corps solides, mis sous la forme de barres, s'allongent quand on les échauffe, et se raccourcissent quand ils se refroidissent. Pour le démontrer, on fait usage du *pyromètre à levier*. — Une tige métallique horizontale AB (fig. 86) traverse deux colonnes mé-

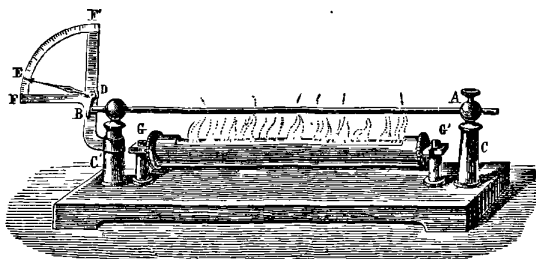


Fig. 86. — Pyromètre à levier.

tailliques C, C' : elle est fixée invariablement en A à la colonne C, au moyen d'une vis de pression ; elle passe, au contraire, librement dans une ouverture que présente la colonne C', et vient s'appuyer en B contre la plus petite branche d'un levier coudé BDE, mobile autour du point D. L'extrémité E de la grande branche de ce levier a la forme d'une aiguille qui, dans les mouvements du levier, parcourt l'arc de cercle gradué FF'. — La tige ayant été installée froide dans l'appareil, si on vient à l'échauffer en enflammant l'alcool placé dans le réservoir GG', et qu'elle s'allonge, l'extrémité B de la tige se déplacera seule et poussera devant elle la branche BD ; on verra donc la pointe de l'aiguille s'élever sur le ca-

dran, et c'est en effet ce que montre l'expérience. L'emploi du levier BDE a l'avantage d'amplifier la dilatation de la tige; en effet, par exemple, si DE est dix fois égal à DB, l'arc décrit par le point E aura une longueur dix fois égale à 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. — Quand on laisse refroidir l'appareil, l'aiguille revient à sa position primitive, ce qui prouve que la tige reprend sa première longueur.

Les corps solides qui ont des dimensions comparables dans les divers sens éprouvent, quand on les échauffe, une augmentation de volume: c'est ce qu'on peut constater au moyen de l'*anneau de S'Gravesande*. — Une sphère de cuivre S (fig. 87) a un diamètre tel, qu'elle passe exactement, quand elle est froide, dans l'anneau de cuivre C. Lorsqu'on échauffe cette sphère avec une lampe à alcool, elle ne peut plus traverser l'anneau; elle y passe au contraire de nouveau quand on la laisse refroidir

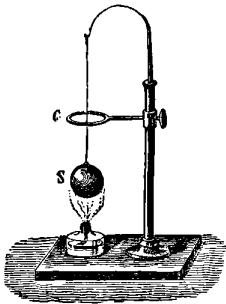


Fig. 87.

Anneau de S'Gravesande.

Lorsqu'on chauffe en même temps la sphère et l'anneau, ils continuent de s'adapter exactement l'un sur l'autre, d'où l'on peut conclure que les *espaces vides* circonscrits par un corps solide s'accroissent, par une élévation de température, d'une quantité égale à

l'accroissement de volume d'un corps solide *de même nature*, qui remplirait exactement ces espaces. — C'est ainsi que la capacité inférieure d'un vase de verre augmentera comme le volume d'une masse de même verre qui remplirait cette capacité.

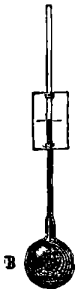


Fig. 88.

2° *Corps liquides*. — Prenons un ballon de verre (fig. 88) surmonté d'un tube étroit, et après y avoir introduit un liquide quelconque, de l'eau colorée par exemple, marquons sur un index de papier l'extrémité de la colonne liquide; puis plongeons le ballon dans l'eau chaude. Nous verrons la dilatation du liquide faire monter le niveau du liquide vers l'extrémité du tube. — En suivant avec soin ce qui se passe dans cette expérience, on observe cependant que, au premier moment, le liquide s'abaisse dans le tube, d'une très-petite quantité, pour remonter ensuite. C'est ce qu'on explique en remarquant que le verre du ballon s'est échauffé le premier; par suite, sa capacité intérieure

a augmenté, et le niveau du liquide a dû descendre. Puis le liquide s'est échauffé à son tour: l'ascension définitive et continue du niveau prouve que

la dilatation du liquide surpasse celle de la capacité intérieure du ballon.

3° *Corps gazeux.* — Un ballon de verre B (fig. 89), communiquant avec un tube de verre horizontal, contient de l'air; une petite colonne liquide *a* sépare ce gaz de l'air extérieur. Le moindre échauffement, produit par l'approche de la main, suffit pour produire une dilatation sensible, et faire marcher la colonne liquide vers l'extrémité libre du tube.



Fig. 89.

Dans cette expérience, la force élastique du gaz est toujours restée égale à la pression atmosphérique. On conçoit que, si un obstacle vient s'opposer à l'accroissement de volume du gaz, l'échauffement doit avoir pour effet un *accroissement de force élastique*. — C'est ce qu'on peut constater par l'expérience suivante. Un ballon de verre B (fig. 90) contient de l'air; le tube recourbé et la boule dont il est muni contiennent un liquide coloré. Dès qu'on approche la main du ballon, on voit le liquide s'élever dans la branche ouverte, tandis que son niveau varie très-peu dans la boule, si celle-ci a des dimensions suffisantes.



Fig. 90.

111. **Températures. — Thermomètres en général.** — Les phénomènes de dilatation fournissent un moyen, incomparablement plus sûr que ne serait l'emploi de nos organes, pour constater si deux corps sont également chauds, ou pour reconnaître lequel des deux est plus chaud que l'autre. — En effet, deux corps étant mis en contact, si l'on peut constater, par un moyen quelconque, que leurs volumes demeurent invariables, c'est qu'il n'y aura eu perte ou gain de chaleur ni pour l'un, ni pour l'autre, et qu'ils étaient déjà également chauds avant d'être en présence : on dit alors qu'ils étaient *à la même température*. — Au contraire, si l'un des deux corps se dilate, l'autre se contractant, c'est que le second était plus chaud que le premier, ou *à une température plus élevée*.

Au lieu de mettre directement en contact les corps dont on veut comparer les températures, ce qui offrirait souvent des difficultés pratiques, on se sert d'instruments qui sont destinés à servir d'intermédiaires, et qui sont fondés également sur les variations de volumes produites par les variations de températures. Ces instruments prennent le nom de *thermomètres*. — Il est clair qu'on devra toujours leur donner une masse suffisamment petite pour qu'ils ne modifient pas sensiblement, par leur présence, la température primitive des corps avec lesquels on les mettra en contact.

112. Construction du thermomètre à mercure. — Le thermomètre à mercure se compose d'un *réservoir* de verre cylindrique R (fig. 91), se continuant avec une *tige* de verre capillaire : le réservoir et une partie de la tige contiennent du mercure ; une graduation placée sur le tube permet de déterminer la position du sommet de la colonne liquide. — Voici d'abord la série des opérations à effectuer pour construire un semblable thermomètre.

Les ouvriers qui travaillent le verre fabriquent des enveloppes de thermomètres, 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 : on reconnaît qu'un tube satisfait à cette condition, en constatant qu'une bulle de mercure, introduite dans l'intérieur et promenée le long de ce tube, y présente toujours une longueur constante. Une boule de verre B (fig. 92), surmontée d'une pointe effilée, a 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. Il a fermé ensuite la pointe effilée, afin d'empêcher la poussière et l'humidité de pénétrer dans l'appareil. — Au moment où l'on veut procéder à l'emplissage, on brise cette pointe ; on chauffe légèrement la boule, pour en dilater l'air, et, renversant brusquement l'appareil, on plonge la pointe dans le mercure : le refroidissement de l'air intérieur fait monter du mercure dans la boule B. Quand on juge qu'il en est entré une quantité suffisante pour qu'elle doive emplir au moins le réservoir et la tige, on redresse l'instrument (c'est cette phase de l'opération qui est représentée par la figure 92). — On chauffe légèrement le réservoir R, en tenant le thermomètre dans une position inclinée, et on voit l'air sortir en bulles au travers du mercure de la boule : quand on laisse refroidir, l'air qui reste encore dans le réservoir se contracte, et on voit descendre dans le réservoir une certaine quantité de mercure.



Fig. 91. Fig. 92.

Il suffit alors de faire bouillir ce mercure, pour que la vapeur entraîne les dernières traces d'air : on a eu soin d'échauffer en même temps

le mercure de la boule, afin qu'il ne brise pas l'appareil quand il arrivera dans les parties chaudes ; dès lors, quand on cesse de chauffer le réservoir, la vapeur de mercure se condense, et le liquide chaud qui est dans la boule achève de remplir le réservoir et une partie de la tige.

L'emplissage du thermomètre terminé, on détache la boule B, et pour ne laisser dans l'instrument que la quantité convenable de mercure, on le porte à une température dépassant un peu la plus haute de celles qu'il doit indiquer : l'excédant du mercure s'échappe, et l'on fond au chalumeau l'extrémité supérieure de la tige, de manière à la fermer. — 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.

113. Points fixes. — Graduation du thermomètre centigrade. — Pour graduer un thermomètre, on commence par marquer sur sa tige les niveaux correspondants à deux températures déterminées, prises comme *points fixes*.

La première de ces températures est celle de la *glace fondante* ; l'expérience a montré, en effet, que cette température est toujours la même, quel que soit l'état de l'air ambiant, et qu'elle demeure invariable pendant tout le temps que dure la fusion. — On emplit donc de neige, ou de glace pilée fondante, un vase cylindrique de métal dont le fond est percé de trous (*fig. 93*), et on y enfonce l'instrument de manière que la colonne liquide soit entièrement plongée dans la glace. Lorsque, en soulevant la tige de temps en temps, on constate que le sommet du liquide est devenu stationnaire, on marque avec un pinceau ou avec un diamant le point auquel il s'est arrêté. — Ce sera le *zéro* du thermomètre.

La seconde des températures prises comme points fixes est celle de la *vapeur d'eau bouillante*, sous la pression de 760 millimètres. C'est, comme on le verra plus loin, une température constante, pourvu que la pression ne varie pas. — On emploie l'appareil qui est représenté en coupe par la figure 94. La vapeur se produit dans une petite chaudière E, placée sur un fourneau : elle s'élève dans la cheminée centrale M, et redescend dans l'espace NN qui enveloppe le tube M, pour s'échapper en C. Dans l'espace M est placé le thermomètre, fixé en A au moyen d'un bouchon ; l'enveloppe NN, par-

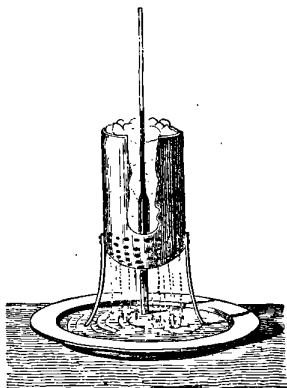


Fig. 95.

courue par la vapeur, préserve l'espace M de toute cause extérieure de refroidissement. La vapeur doit s'échapper assez facilement en C, pour que sa force élastique en M soit toujours égale à la pression atmosphérique : c'est ce dont on s'assure en observant un manomètre à eau, adapté à une tubulure B qui communique avec la cheminée centrale ; les niveaux du liquide *m* et *n* doivent être sur un même plan horizontal. Le thermomètre doit être placé de façon que la colonne liquide soit plongée tout entière dans la vapeur, et son réservoir doit se trouver un peu au-dessus de la surface de l'eau bouillante. — Lorsque, en faisant glisser le thermomètre dans son bouchon pour apercevoir le sommet de la colonne liquide, on a constaté qu'il conserve un niveau constant, on marque sur la tige le point correspondant. Ce sera le point 100 de la graduation, pourvu que la pression atmosphérique, au moment de l'expérience, s'écarte très-peu de la pression normale, 760 millimètres (*).

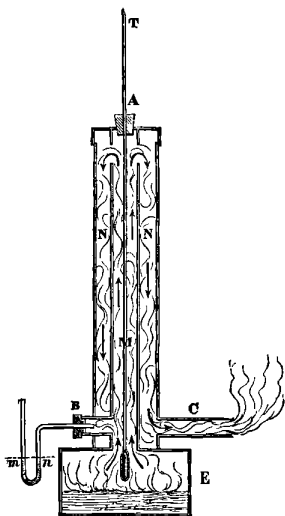


Fig. 94.

qui sépare les deux points fixes : chacune de ces divisions est un *degré* du thermomètre. — On continue la division, s'il y a lieu, au-dessus du centième degré. Enfin on marque encore des divisions égales au-dessous du zéro, et on les désigne par les chiffres 1, 2, 3, etc., formant une échelle descendante qui indique les températures inférieures à celle de la glace fondante. Dans les notations, on fait précéder du signe (—) les chiffres qui représentent ces dernières températures, afin de les distinguer des températures supérieures à 0°. Ainsi, —12° indique une température de 12 degrés au-dessous de zéro, tandis que +12°, ou simplement 12°, indique une température de 12 degrés au-dessus de zéro.

114. Déplacement du zéro. — Lorsqu'on replace dans la glace fondante un thermomètre construit depuis un certain temps, on observe

(*) On cherche, en général, à faire l'expérience sous une pression qui s'écarte peu de la pression normale : cependant si, au moment de la détermination du point 100, la pression était notablement différente de 760 millimètres, on pourrait faire subir à l'échelle une correction ; on en calculerait la valeur en sachant, que, pour un accroissement ou une diminution de pression de 27 millimètres, la température de la vapeur d'eau s'élève ou s'abaisse de 1 degré.

presque toujours que le point où s'arrête le mercure est remonté d'une ou deux divisions. — Ce résultat doit être attribué, d'après les expériences de Despretz, à une diminution lente de la capacité du réservoir. Pour souffler le réservoir dans l'épaisseur de la tige, on a dû porter le verre jusqu'à la température de sa fusion ; le refroidissement lui a communiqué ensuite une véritable *trempe*, qui lui a fait conserver un volume plus grand que celui qu'il aurait dû prendre à la température ordinaire. Les élévations de température qu'il subit ensuite, par l'usage, lui font éprouver un *recuit*, et par suite une diminution de volume.

Avant d'employer un thermomètre pour des observations précises, il est donc indispensable de déterminer, par l'expérience, le nombre de divisions dont le zéro peut s'être déplacé, et de retrancher ce nombre à toutes les indications fournies par l'instrument.

115. Échelle de Réaumur. — L'échelle de *Réaumur*, dont on a fait usage assez longtemps en France, et qui est employée encore dans certaines parties de l'Allemagne, diffère de l'échelle centigrade en ce que le point correspondant à la température de la vapeur d'eau bouillante est marqué 80° ; l'intervalle compris entre ce point et le zéro est partagé en 80 parties égales. — Les deux échelles sont souvent marquées, l'une en face de l'autre, sur la planchette qui supporte certains thermomètres.

Il est toujours facile, étant donnée une température évaluée en degrés Réaumur, de calculer le nombre de degrés centigrades qui la représente, ou réciproquement. — En effet, 80 degrés de Réaumur valent 100 degrés

centigrades ; donc 1 degré de Réaumur vaut $\frac{100}{80}$ ou $\frac{10}{8}$ de degré centigrade. Donc, pour convertir un certain nombre de degrés Réaumur en degrés centigrades, il suffit de multiplier ce nombre par 10, et de diviser le produit par 8. — Réciproquement, pour convertir un certain nombre de degrés centigrades en degrés de Réaumur, il suffit de multiplier ce nombre par 8, et de diviser le produit par 10.

116. Échelle de Fahrenheit. — L'échelle de *Fahrenheit*, imaginée d'après des idées théoriques qui sont aujourd'hui abandonnées, est encore employée fréquemment en Angleterre. — Pour la construire, il suffit de marquer 32 degrés à la glace fondante, et 212 à la vapeur d'eau bouillante. On partage l'intervalle en 212—32, ou 180 parties égales, et on continue à marquer, à la partie inférieure, 32 divisions égales aux précédentes, ce qui détermine le zéro de l'échelle.

Pour convertir des degrés de Fahrenheit en degrés centigrades, 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 : donc 1 degré de

Fahrenheit vaut $\frac{100}{180}$ ou $\frac{10}{18}$ de degré centigrade. Cela posé, quelle que

soit la question à résoudre, la marche générale à suivre consistera à *considérer d'abord l'intervalle compris entre la glace fondante et la température donnée, à évaluer cet intervalle en degrés de la nouvelle échelle, et à compter ensuite ces degrés à partir de leur zéro.* — Appliquons cette règle à quelques exemples.

Soit une température de 86° Fahrenheit à évaluer en degrés centigrades. L'intervalle compris entre la glace fondante et cette température est de 86—32, ou 54 degrés de Fahrenheit; cet intervalle vaut, en degrés centigrades, $54 \times \frac{10}{18}$ ou 30; et comme les degrés centigrades se comptent à partir de la glace fondante, la température donnée correspond à celle de 30° C. — *Soit encore une température de 5° F. à évaluer au moyen de l'échelle centigrade.* L'intervalle compris entre la glace fondante et cette température est de 32—5 ou 27 degrés de Fahrenheit; cet intervalle équivaut à $27 \times \frac{10}{18}$ ou 15 degrés centigrades; et comme cette température est inférieure à celle de la glace fondante, elle correspond à celle de —15° C. — On trouvera, de la même manière, que le zéro de Fahrenheit correspond à la température —17,78° C.

Inversement, *soit une température de 19° C. à évaluer au moyen de l'échelle de Fahrenheit.* Les degrés centigrades étant comptés à partir de la glace fondante, on remarquera immédiatement que l'intervalle entre la glace fondante et la température donnée vaut, en degrés de Fahrenheit, $19 \times \frac{18}{10} = 34,2$. Comme d'ailleurs l'échelle de Fahrenheit marque 32° à la glace fondante, la température proposée correspond à celle de 34,2+32 ou de 66°, 2 F.

117. Thermomètre à alcool. — Comme le mercure se solidifie vers —40° C., le thermomètre à mercure ne peut servir à évaluer les températures très-basses, celles, par exemple, qu'on rencontre dans les contrées polaires. On remplace alors le mercure par de l'alcool absolu. — Dans les thermomètres grossièrement construits qui servent pour les usages ordinaires, l'alcool est coloré en rouge par la teinture d'orseille; mais cette matière colorante a l'inconvénient de s'altérer à la longue.

Le procédé d'emplissage du thermomètre à alcool est plus simple que celui du thermomètre à mercure: la boule B de la figure 92 est ici inutile. Il suffit de dilater un peu l'air du réservoir, par une légère élévation de température, et de plonger dans l'alcool l'extrémité ouverte de la tige, pour voir une petite quantité de liquide arriver dans le réservoir. On redresse ensuite l'instrument, on fait bouillir cette petite quantité de liquide, dont les vapeurs achèvent de chasser l'air, et, comme l'ébullition a lieu à une température qui ne dépasse pas 78°,5, on peut sans inconvé-

nient plonger de nouveau la tige dans l'alcool et laisser arriver le liquide froid dans le réservoir.

Le zéro se détermine comme pour le thermomètre à mercure. Mais, en général, on ne prolonge pas l'échelle jusqu'à la température de l'ébullition de l'eau, parce que, à cette température, la vapeur d'alcool acquiert une force élastique qui pourrait briser l'enveloppe. — On se contente de déterminer un point moins élevé de l'échelle, par exemple la température d'un bain d'eau chaude, qu'on évalue avec un thermomètre à mercure et dont la connaissance suffit pour achever la graduation.

118. Instruments thermométriques en général. — Les *liquides* en général offrent, pour la construction des instruments thermométriques, l'avantage de présenter des variations de volume appréciables, pour les variations de température qu'on peut avoir à déterminer dans les circonstances les plus fréquentes. — Parmi les liquides, le *mercure* présente divers avantages particuliers : 1° il peut toujours être obtenu dans un état de pureté parfaite, par les méthodes indiquées dans les cours de Chimie ; 2° son point de congélation (-40° C.) est très-éloigné de son point d'ébullition ($+360^{\circ}$ C.), et les températures qu'on a le plus fréquemment à évaluer sont comprises entre ces deux points ; 3° il est très-bon conducteur de la chaleur, et, par suite, il se met rapidement en équilibre de température avec les corps environnants.

Les corps *solides*, moins dilatables que les liquides, donneraient des thermomètres moins sensibles. Aussi n'ont-ils guère été employés que pour des variations de température considérables : c'est ainsi qu'on a pu employer, pour évaluer approximativement les variations de température dans les fours à porcelaine, un instrument analogue au pyromètre à levier (*fig.* 86). — Mais il faut surtout remarquer que la plupart des corps solides, et les métaux en particulier, lorsqu'ils sont soumis à des alternatives de dilatation et de contraction, éprouvent des modifications dans leur structure, qui modifient leur dilatabilité. Dès lors, un thermomètre formé par une barre métallique pourrait donner, à des époques diverses, des indications qui ne seraient pas comparables entre elles.

Enfin, les corps *gazeux*, eu égard à leur grande dilatabilité, se présentent comme éminemment propres à évaluer de petites variations de température. Ainsi, un appareil semblable à celui de la figure 89 semble devoir fournir un thermomètre d'une grande sensibilité. — Nous indiquons en effet plus loin quelques thermomètres à air ; mais nous verrons, en même temps, que ces instruments, pour donner des résultats exacts, doivent toujours présenter une disposition assez compliquée : la détermination d'une température est alors une véritable expérience, et exige un opérateur exercé. — Pour la pratique, il y a avantage à employer des instruments qui donnent, comme les thermomètres à liquides, des indications immédiates, par une simple lecture.

119. **Pyromètre de Wedgwood.** — Le pyromètre de Wedgwood, imaginé pour obtenir une évaluation grossière de températures très-

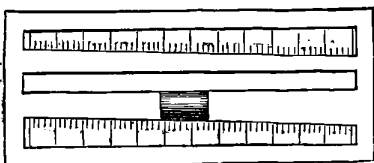


Fig. 95.

— De petits cylindres d'argile, façonnés dans le même moule, sont introduits dans les fourneaux dont on veut évaluer approximativement la température : lorsqu'on les en a retirés, on les introduit dans l'intervalle de deux règles métalliques (fig. 95), fixées sur une plaque, et faisant entre elles un angle déterminé. On peut faire avancer ces cylindres, dans l'angle des règles, d'autant plus loin qu'ils ont subi un retrait plus grand : une graduation marquée sur l'une des règles fait connaître, d'une manière approximative, la température correspondante.

DILATATIONS DES CORPS SOLIDES

120. **Définition des coefficients de dilatation.** — Le coefficient de dilatation linéaire d'une barre solide est le nombre qui exprime l'allongement de l'unité de longueur de cette barre, pour une élévation de température de 1 degré. — Le coefficient de dilatation linéaire sera toujours évalué au moyen de la même unité que la longueur de la barre. Si, par exemple, la longueur de la barre est évaluée en mètres, le coefficient de dilatation sera exprimé en prenant le mètre pour unité.

Le coefficient de dilatation cubique d'un corps est le nombre qui exprime l'accroissement de volume éprouvé par l'unité de volume de ce corps, pour une élévation de température de 1 degré. — Ce nombre sera également évalué au moyen de la même unité que le volume du corps : si, par exemple, le volume du corps est évalué en mètres cubes, le coefficient de dilatation cubique sera exprimé en prenant pour unité le mètre cube.

121. **Usages de ces coefficients.** — 1° Étant donnée la longueur l_0 d'une barre à zéro, et son coefficient de dilatation linéaire δ , calculer la longueur l de cette barre à une température quelconque t .

L'unité de longueur s'allongeant de δ quand sa température s'élève de zéro à 1 degré, si l'on admet, comme nous le ferons toujours, que la barre se dilate de la même quantité δ en passant de 1° à 2°, puis en passant de 2° à 3°, et ainsi de suite, l'allongement total de l'unité de longueur, en passant de 0 à t degrés, sera $t\delta$. Une barre de longueur l_0 se di-

latera, dans les mêmes conditions, de $l_0 \delta t$. La longueur de cette barre deviendra donc $l_0 + l_0 \delta t$, c'est-à-dire qu'on aura

$$(1) \quad l = l_0(1 + \delta t).$$

Si l'on désigne la quantité comprise dans la parenthèse sous le nom de *binôme de dilatation*, on voit que, pour avoir la longueur d'une barre à une température quelconque, il suffit de multiplier la longueur à zéro par le binôme de dilatation correspondant à cette température.

Réciproquement, si l'on connaît la longueur l d'une barre à une température t , et son coefficient de dilatation δ , et qu'on se propose de calculer sa longueur l_0 à la température de zéro, la formule précédente donne immédiatement

$$(2) \quad l_0 = \frac{l}{1 + \delta t}.$$

Enfin, si l'on connaît la longueur l à une température t , et qu'on se propose de calculer la longueur l' à une autre température quelconque t' , on aura

$$\begin{aligned} l &= l_0(1 + \delta t) \\ l' &= l_0(1 + \delta t'); \end{aligned}$$

en divisant la seconde équation par la première, il vient

$$\frac{l'}{l} = \frac{1 + \delta t'}{1 + \delta t},$$

d'où l'on tire :

$$(3) \quad l' = l \frac{1 + \delta t'}{1 + \delta t}.$$

Au lieu de cette dernière relation, on peut, dans la pratique, en employer une autre, qui est seulement *approchée* : effectuons la division indiquée dans la formule (3), et, dans le quotient obtenu, négligeons les termes qui contiennent δ^2 , δ^3 ...; ces termes sont en effet très-petits par rapport aux autres, puisque δ est toujours une fraction très-petite, comme le montre le tableau de la page 93. Il vient

$$(3 \text{ bis}) \quad l' \approx l[1 + \delta(t' - t)].$$

Cette relation approchée offre, avec la formule (1), une analogie digne de remarque : elle permet de dire que, soit qu'on parte de la température zéro, ou de toute autre température t , la longueur l' correspondante à une température t' s'obtient toujours en multipliant la longueur initiale par le binôme de dilatation correspondant à la *variation de température*.

2° *Étant donné le volume V_0 d'un corps à zéro, et son coefficient de dilatation cubique k , calculer le volume de ce corps à une température t .*

Un raisonnement semblable au précédent montre que, k étant l'accrois-

sement éprouvé par l'unité de volume pour une élévation de température de 1 degré, le volume V_0 , en passant à t , s'accroitra de $V_0 kt$; donc le volume total sera $V_0 + V_0 kt$, et l'on a

$$(4) \quad V = V_0(1 + kt).$$

Réciproquement, si l'on connaît le volume V d'un corps à une température t , et son coefficient de dilatation cubique k , pour calculer son volume V_0 à la température de zéro, on aura

$$(5) \quad V_0 = \frac{V}{1 + kt}.$$

Enfin, si l'on connaît le volume V à une température t , et qu'on veuille calculer le volume V' à une autre température t' , on aura

$$\begin{aligned} V &= V_0(1 + kt), \\ V' &= V_0(1 + kt'). \end{aligned}$$

En divisant la seconde équation par la première, il vient

$$\frac{V'}{V} = \frac{1 + kt'}{1 + kt},$$

d'où l'on tire :

$$(6) \quad V' = V \frac{1 + kt'}{1 + kt}.$$

A cette relation, on peut substituer encore la suivante, obtenue en effectuant la division indiquée, et négligeant les puissances de k supérieures à la première,

$$(6 \text{ bis}) \quad V' = V_0[1 + k(t' - t)],$$

relation *approchée* qui donne lieu aux mêmes remarques que la relation (5 bis).

122. Relation 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 la température t , 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

$$d = \frac{d_0}{1 + kt}.$$

On aura de même, à une autre température t' ,

$$d' = \frac{d_0}{1 + kt'}$$

En divisant ces deux dernières relations membre à membre, il vient :

$$\frac{d'}{d} = \frac{1 + kt}{1 + kt'}$$

c'est-à-dire que *les densités d'un même corps à deux températures différentes sont inversement proportionnelles aux binômes de dilatation cubique.*

123. Le coefficient de dilatation cubique d'un corps est sensiblement triple de son coefficient de dilatation linéaire. — Il faut entendre par là que le *nombre* qui exprime l'accroissement éprouvé par l'unité de volume d'un corps, pour une élévation de température d'un degré, est sensiblement triple du *nombre* qui exprime l'allongement de l'unité de longueur du même corps, dans les mêmes conditions.

Soit V_0 le volume du corps à zéro, V_1 son volume à 1° , k son coefficient de dilatation cubique ; on a, en faisant $t = 1$ dans la formule (4) :

$$V_1 = V_0 (1 + k).$$

Si maintenant a_0 est la longueur de l'une des dimensions du corps à zéro, et a_1 sa longueur à 1° , δ étant le coefficient de dilatation linéaire, on a, en faisant $t = 1$ dans la formule (1) :

$$a_1 = a_0 (1 + \delta).$$

Or, la dilatation étant supposée régulière dans tous les sens, le corps est resté semblable à lui-même ; par suite, les volumes V_1 et V_0 sont proportionnels aux cubes des dimensions homologues ; c'est-à-dire qu'on a

$$\frac{V_1}{V_0} = \frac{a_1^3}{a_0^3},$$

ou, en remplaçant V_1 et a_1 par leurs valeurs,

$$\frac{V_0 (1 + k)}{V_0} = \frac{a_0^3 (1 + \delta)^3}{a_0^3},$$

ou, en supprimant les facteurs communs et effectuant les calculs,

$$k = 3\delta + 3\delta^2 + \delta^3.$$

Or, le tableau de la page 93 montre que δ est toujours exprimé par une fraction très-petite, et les valeurs de cette fraction ne sont jamais connues qu'avec une approximation limitée : $3\delta^2$ et δ^3 sont donc négligeables vis-à-vis du premier terme 3δ , et l'on a sensiblement

$$k = 3\delta.$$

Dès lors, si l'on a déterminé par l'expérience les coefficients de dilatation linéaire de certains corps, on pourra se dispenser d'autres expériences pour

déterminer les coefficients de dilatation cubique des mêmes substances ; il suffira de tripler les nombres déjà obtenus.

124. Principe de la méthode de Lavoisier et Laplace, pour déterminer les coefficients de dilatation linéaire. —

Le principe de la méthode suivie par Lavoisier et Laplace consiste à rendre plus facilement mesurables les petits allongements des barres sur lesquelles on opère, au moyen d'un artifice semblable à celui qui a déjà été employé dans le pyromètre à levier (110).

La barre AB soumise à l'expérience était posée sur des rouleaux de verre, reposant sur le fond d'une caisse (fig. 96). L'une des extrémités A de la barre était maintenue immobile par un talon fixe ; l'autre extrémité B s'appuyait

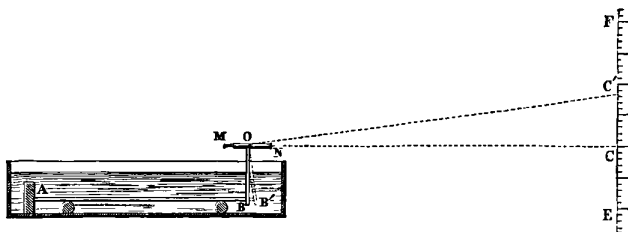


Fig. 96.

puvait contre une tige verticale OB, mobile autour d'un axe horizontal O, et supportant une lunette MN. Une règle divisée EF était dressée verticalement à une certaine distance. — La barre étant d'abord environnée de glace fondante, on lisait la division C de la règle qui se trouvait dans le prolongement de l'axe de la lunette. On remplaçait alors la glace par de l'eau chaude ou de l'huile, dont on déterminait exactement la température : la barre s'allongeant, la tige verticale était amenée à une nouvelle position OB', et on lisait la nouvelle division C' qui se trouvait dans le prolongement de l'axe de la lunette. Les triangles semblables BOB' et COC' donnent :

$$\frac{BB'}{CC'} = \frac{OB}{OC'}$$

d'où l'on tire :

$$BB' = CC' \frac{OB}{OC}$$

Les quantités OB et OC ayant été déterminées une fois pour toutes avec précision, le déplacement CC' faisait connaître, dans chaque expérience, l'allongement éprouvé par la barre. — Il suffisait ensuite, pour avoir le coefficient de dilatation, c'est-à-dire l'allongement de l'unité de longueur pour une élévation de température de 1 degré, de diviser BB' par la longueur de la barre et, par l'accroissement de température.

COEFFICIENTS DE DILATATION LINÉAIRE DE QUELQUES CORPS SOLIDES.

Acier trempé.	0, 000 013
Argent.	0, 000 019
Cristal.	0, 000 008
Cuivre.	0, 000 017
Fer	0, 000 012
Laiton	0, 000 019
Or.	0, 000 015
Platine.	0, 000 009
Verre ordinaire.	0, 000 009

125. Applications des dilatations des corps solides. —

Pendules compensateurs. — Lorsqu'on emploie un pendule pour régulariser le mouvement d'une horloge, il est important de remarquer que la durée des oscillations de ce pendule ne conserve une valeur constante que si le pendule lui-même conserve toujours la même longueur, quelles que soient les variations de température.

L'un des systèmes les plus employés pour compenser les variations de longueur qui tendent à se produire sous l'influence des changements de température, est le *pendule à gril* (fig. 97). Les tiges verticales qui le composent, et dont le mode d'assujettissement est indiqué par la figure, sont les unes en fer, les autres en laiton (les tiges de laiton sont indiquées par des hachures transversales). On voit, avec un peu d'attention, que la dilatation des tiges de fer tend à abaisser le centre de la lentille pesante C, et que la dilatation des tiges de laiton tend à le relever : d'autre part, le laiton est plus dilatable que le fer, mais la somme des longueurs $b + b'$ des tiges de laiton est moindre que la somme des longueurs $a + a' + a'' + a'''$ des tiges de fer. — Soit δ le coefficient de dilatation linéaire de laiton ; δ' celui du fer : si l'on veut que, en passant de la température zéro à la température t , le pendule conserve la même longueur, il suffira d'égaliser entre eux les effets qui sont produits, en sens inverse, par le laiton et par le fer, ce qui donne :

$$(b + b') \delta t = (a + a' + a'' + a''') \delta' t,$$

d'où l'on tire :

$$\frac{b + b'}{a + a' + a'' + a'''} = \frac{\delta'}{\delta},$$

condition qui est toujours réalisable. — Le rapport entre les deux sommes

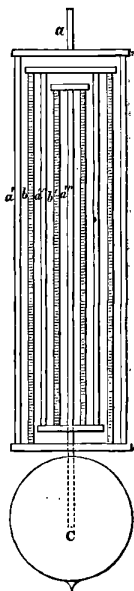


Fig. 97.
Pendule à gril.

de longueurs est d'ailleurs indépendant de la température; on voit donc que la compensation, une fois réalisée pour une température particulière, subsiste à toute autre température.

DILATATIONS DES LIQUIDES

126. **Dilatation apparente et dilatation absolue d'un liquide.** — Lorsque, dans une expérience du genre de celle qui nous a servi à montrer la dilatation des liquides (110, 2°), on chauffe un liquide placé dans une enveloppe de verre, on n'observe que l'effet résultant de l'action de la chaleur sur le liquide et sur l'enveloppe elle-même : c'est ce qu'on nomme la *dilatation apparente* du liquide. — Puisque l'effet produit sur l'enveloppe est d'augmenter sa capacité, cette dilatation apparente est moindre que l'accroissement réel de volume du liquide, ou *dilatation absolue*. — Il est aisé de démontrer que la dilatation absolue peut être considérée comme la *somme* de la dilatation apparente et de la dilatation de l'enveloppe : c'est ce que nous admettrons dans tout ce qui va suivre.

Il semble d'abord impossible d'étudier directement la dilatation absolue d'un liquide, sans avoir à tenir compte de la dilatation du vase qui le contient. — C'est ce qu'on peut cependant faire, au moyen de la méthode suivante, qui a été appliquée par Dulong et Petit à l'étude de la dilatation du mercure.

127. **Principe de la méthode de Dulong et Petit, pour déterminer le coefficient de dilatation absolue du mercure.** —

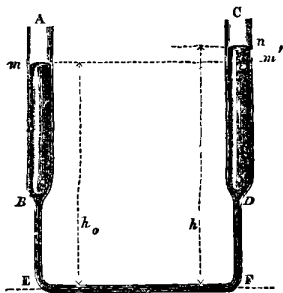


Fig. 98.

Le mercure est contenu dans un tube en U formé de deux branches verticales AB, CD (fig. 98), réunies par un tube capillaire BEFD : la branche EF est placée de façon que son axe soit *parfaitement horizontal*. La branche AE est environnée de glace fondante; la branche CF est placée dans un bain d'huile, et portée à une température connue. Les liquides des deux branches, étant à des températures différentes, ont des densités inégales que nous pouvons désigner par d_0 et d : les hau-

teurs h_0 et h des surfaces m et n , au-dessus de l'axe du tube EF, sont en raison inverse de ces densités; c'est-à-dire qu'on a $\frac{h}{h_0} = \frac{d_0}{d}$. D'autre part, on a (122) que les densités d_0 et d sont inversement proportion-

nelles aux binômes de dilatation correspondants aux températures zéro et T , c'est-à-dire aux quantités 1 et $1 + \alpha T$. On a donc

$$\frac{d_0}{d} = 1 + \alpha T;$$

par suite,

$$\frac{h}{h_0} = 1 + \alpha T.$$

De cette équation on tire la valeur de α ,

$$\alpha = \frac{h - h_0}{h_0 T}.$$

En opérant avec un appareil fondé sur ce principe, Dulong et Petit ont trouvé, pour le coefficient de dilatation absolue du mercure, la valeur $\frac{1}{5550}$, ou bien 0,000 18018.

128. Principe de la détermination des coefficients de dilatation absolue des autres liquides. — La méthode précédente pourrait servir à déterminer de même les coefficients de dilatation absolue des autres liquides. — Mais, une fois le coefficient de dilatation du mercure connu, on préfère employer pour les autres liquides une méthode différente, n'exigeant que l'emploi d'une enveloppe de verre de petite dimension.

Un vase de verre ayant, soit la forme d'un thermomètre ordinaire, soit la forme indiquée par la figure 100, est d'abord rempli de mercure : en portant l'appareil successivement à la température zéro et à une autre température connue, à 100° par exemple, on observe la dilatation apparente du mercure dans le verre : comme on connaît déjà le coefficient de dilatation absolue de ce liquide, on en conclut le coefficient de dilatation de l'enveloppe. — Cela fait, on retire le mercure, et on le remplace par le liquide dont on se propose de déterminer la dilatation. En portant encore l'appareil successivement à la température de zéro et à une autre température, on observe la dilatation apparente du liquide dans l'enveloppe. Comme on connaît maintenant le coefficient de dilatation de l'enveloppe, on en conclut la dilatation absolue du liquide lui-même.

Nous nous contenterons ici de ces indications générales : le calcul ne présente aucune difficulté : nous montrerons plus loin comment on peut l'effectuer (131, *Remarque*).

129. Maximum de densité de l'eau. — Supposons que, dans une enveloppe thermométrique, on ait introduit de l'eau pure, et que, plaçant ce thermomètre à eau à côté d'un thermomètre à mercure, dans un même bain, à 15° par exemple, on élève la température du bain : on verra les deux liquides monter à la fois, bien que de quantités inégales,

dans les deux instruments. — Si, partant de cette même température de 15° , on refroidit progressivement le bain, on verra les deux liquides descendre d'abord simultanément ; mais, quand la température s'abaissera au-dessous de 4° , on verra le niveau de l'eau remonter, tandis que celui du mercure continuera à descendre. On en conclut qu'il existe, au voisinage de 4° , une température à laquelle le volume de l'eau est minimum, et où, par suite, sa densité présente un *maximum*.

L'existence de ce *maximum de densité* peut encore être constatée par l'expérience suivante : — Une éprouvette de verre M (fig. 99) contient de l'eau : deux thermomètres, A et B, sont assujettis horizontalement, l'un dans les couches supérieures du liquide, l'autre dans les couches inférieures : une galerie métallique C, entourant la partie moyenne de l'éprouvette, contient de la glace. L'eau de l'éprouvette étant d'abord à 12° , 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

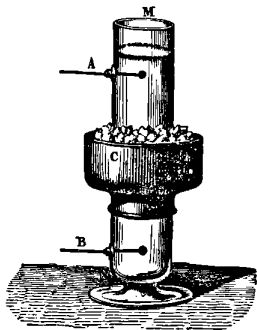


Fig. 99.

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 : il en résulte que l'eau, à mesure qu'elle se refroidit au-dessous de 4° , acquiert des densités moindres et gagne la partie supérieure du vase.

Des phénomènes semblables se produisent dans les lacs, où la température, à partir d'une certaine profondeur, reste toujours égale à 4° , soit pendant les chaleurs de l'été, soit pendant les froids de l'hiver. On voit en effet que, les variations de la température extérieure donnant toujours aux couches voisines de la surface une densité moindre que celle des parties profondes, il ne doit pas s'effectuer de mélange. — Grâce à ces circonstances, les poissons et les animaux aquatiques trouvent toujours des couches liquides où ils peuvent vivre, même pendant les grands froids, et quand la surface s'est abaissée bien au-dessous du point de congélation.

130. Applications des dilatations des liquides. — Corrections barométriques. — Les colonnes barométriques étant à des températures différentes suivant les époques auxquelles on les observe, on ne peut comparer entre elles les hauteurs de ces colonnes, qu'à la condi-

tion de les ramener toujours, par le calcul, à ce qu'elles auraient été à une même température : on a choisi la température de zéro.

Soit H une hauteur barométrique exprimée en millimètres, hauteur observée directement à une température t . — Remarquons d'abord que la lecture de cette hauteur est faite sur une échelle métallique, dont on suppose la division effectuée à la température de zéro ; si δ est le coefficient de dilatation linéaire du métal dont est formée l'échelle, chaque millimètre est devenu $1^{\text{mm}} (1 + \delta t)$; la hauteur réelle du mercure est donc à $H (1 + \delta t)$. — Désignons maintenant par H_0 la hauteur de la colonne de mercure à zéro, qui exercerait la même pression ; cette colonne sera, à la colonne $H (1 + \delta t)$, dans le rapport inverse des densités du mercure d_0 et d aux températures zéro et t , c'est-à-dire qu'on aura .

$$\frac{H_0}{H (1 + \delta t)} = \frac{d}{d_0} ;$$

d'autre part, les densités d et d_0 sont, comme on l'a vu (122), inversement proportionnelles aux binômes de dilatation $(1 + \alpha t)$ et 1 , aux températures t et 0 ; on a donc .

$$\frac{H_0}{H (1 + \delta t)} = \frac{1}{1 + \alpha t} ,$$

ce qui donne :

$$H_0 = H \frac{1 + \delta t}{1 + \alpha t} .$$

131. Thermomètre à poids. — Le thermomètre à poids (*fig. 100*) se compose uniquement d'un réservoir de verre R , surmonté d'un petit tube t deux fois recourbé, sans aucune graduation. Le réservoir a ordinairement une capacité beaucoup plus grande que celle des thermomètres ordinaires.

On soumet d'abord l'appareil à une expérience préliminaire, destinée à déterminer le *coefficient de dilatation apparente du mercure* dans l'enveloppe employée. — Pour cela, on commence par peser l'enveloppe, et on l'emplit ensuite de mercure, en opérant comme pour un thermomètre ordinaire ; on environne l'appareil de glace fondante, en plongeant la pointe dans le mercure, de manière qu'il se remplisse complètement de mercure à 0° , et on le pèse de nouveau : l'accroissement de poids est le poids P du mercure qui remplit l'enveloppe à 0° . On introduit alors l'appareil dans une enceinte maintenue à 100° , comme celle de la figure 94 : une petite quantité de mercure s'échappe par l'extrémité du tube ; on la recueille dans une coupelle C , et on détermine son poids p . Le poids du



Fig. 100.

mercure restant est $P - p$. Or, si l'appareil était ramené à 0° , le mercure restant laisserait un espace vide dont le volume représente sa contraction apparente de 100° à 0° , ou sa dilatation apparente de 0° à 100° ; ce volume serait précisément celui qui était occupé par le poids p de mercure à 0° . Les volumes pouvant être représentés par les poids de mercure à 0° qui les occupent, p représente la dilatation, dans le verre, d'une quantité de mercure représentée par $P - p$, pour une variation de température de 100 degrés. Par suite, le *coefficient de dilatation apparente*, ou la dilatation apparente de l'unité de volume pour une variation de température d'un degré, est

$$d = \frac{p}{(P - p) \times 100}.$$

Dulong et Petit ont trouvé, pour valeur de d , dans les enveloppes formées du verre employé par eux, le nombre $\frac{1}{6480}$. Dans les recherches précises, l'expérience que nous venons de décrire doit toujours être faite, pour déterminer la valeur *particulière* de d qui convient à l'enveloppe avec laquelle on opère.

Cette détermination étant effectuée, lorsqu'on veut mesurer une température, on remplit toujours l'appareil de mercure à 0° , et on le porte dans le milieu soumis à l'expérience. La température inconnue x étant supposée supérieure à 0° , il s'échappe une certaine quantité de mercure; on en détermine le poids p_1 . — En raisonnant exactement comme plus haut, on a

$$d = \frac{p_1}{(P - p_1)x}.$$

équation dans laquelle il n'y a d'inconnue que x . — Si l'on prend, par exemple, pour valeur de d , celle qui avait été adoptée par Dulong et Petit, il vient

$$\frac{1}{6480} = \frac{p_1}{(P - p_1)x}, \quad \text{d'où} \quad x = 6480 \frac{p_1}{P - p_1}.$$

Remarque. — Il est facile de concevoir maintenant comment la même méthode peut s'appliquer à la détermination du coefficient de dilatation absolue d'un liquide quelconque.

L'expérience préliminaire a donné le coefficient de dilatation apparente d du mercure dans l'enveloppe employée. D'après ce qui a été dit (126), en retranchant ce coefficient du coefficient de dilatation absolue du mercure

$\frac{1}{5550}$, on a le coefficient de dilatation de l'enveloppe elle-même: soit k ce coefficient. — On reprend alors la même enveloppe; on y introduit le liquide dont on cherche le coefficient de dilatation absolue δ , et on répète la même série d'opérations. Soit p_1 le poids de mercure qui remplit l'appa-

reil à 0° , et p' le poids qui s'en échappe à une température connue T' : en désignant par d' le coefficient de dilatation apparente de ce liquide dans le verre, on a

$$d' = \frac{p'}{(1' - p') T'};$$

on en déduit le coefficient de dilatation absolue du liquide, savoir

$$\delta = d' + k.$$

DILATATIONS DES GAZ

132. Définitions. — *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 de 1 degré.*

Lorsqu'on opère sur des gaz éloignés de leur point de liquéfaction, l'expérience montre que ce nombre est sensiblement le même, quelle que soit la pression à laquelle le gaz est soumis, pourvu que cette pression demeure la même aux diverses températures. — En outre il présente, d'un gaz à l'autre, des différences assez petites, pour que l'on puisse considérer tous les gaz comme ayant le même coefficient de dilatation.

133. Usages du coefficient de dilatation des gaz. — Lorsque la température d'un gaz varie, sa pression demeurant constante, on a, en désignant par α son coefficient de dilatation, et par V_0 , V et V' les volumes d'une même masse gazeuse aux températures 0 , t et t' , des relations analogues à celles qui ont été précédemment établies pour les corps solides (121, 2°) :

$$V = V_0 (1 + \alpha t),$$

$$V_0 = V \frac{1}{1 + \alpha t},$$

$$V' = V \frac{1 + \alpha t'}{1 + \alpha t}.$$

Mais, dans la plupart des applications, la pression des gaz sur lesquels on opère varie en même temps que la température ; on a alors à résoudre ce problème plus général :

Connaissant le volume V d'une masse gazeuse à la température t et sous la pression H , calculer son volume V' à la température t' et sous la pression H' . — Supposons d'abord que la pression seule varie, et soit V_1 le volume qu'occuperait le gaz à la température t et sous la pression H' : la loi de Mariotte donne :

$$V_1 = V \frac{H}{H'}.$$

Supposons maintenant que la température passe de t à t' ; on aura, d'après ce qu'on vient de voir :

$$V' = V_1 \frac{1 + \alpha t'}{1 + \alpha t},$$

ou, en remplaçant V_1 par la valeur précédente :

$$(7) \quad V' = V \cdot \frac{H}{H'} \cdot \frac{1 + \alpha t'}{1 + \alpha t}.$$

134. Une question analogue est la suivante : *Connaissant la densité D d'un gaz à la température t et sous la pression H , calculer sa densité D' à la température t' et sous la pression H' .* — Les densités D et D' d'une même masse de gaz étant en raison inverse des volumes qu'elle acquiert, on a

$$\frac{D'}{D} = \frac{V}{V'};$$

mais la formule (7) donne

$$\frac{V}{V'} = \frac{H'}{H} \cdot \frac{1 + \alpha t}{1 + \alpha t'};$$

en substituant, il vient

$$(8) \quad D' = D \cdot \frac{H'}{H} \cdot \frac{1 + \alpha t}{1 + \alpha t'}.$$

135. Calcul du volume ou de la densité d'un gaz, dans les conditions normales de température et de pression. — On trouve une des applications les plus fréquentes des formules qui précèdent, dans le cas particulier où, connaissant le volume V ou la densité D d'une masse gazeuse à une température t et sous une pression H , on se propose de déterminer le volume V_0 ou la densité D_0 dans les conditions normales de température et de pression, c'est-à-dire à 0° et sous la pression de 760 millimètres. — Dans les formules (7) et (8), il suffit de faire $t' = 0$ et $H' = 760^{\text{mm}}$, et l'on a :

$$V_0 = V \cdot \frac{H}{760} \cdot \frac{1}{1 + \alpha t},$$

$$D_0 = D \cdot \frac{760}{H} (1 + \alpha).$$

136. Principe de la méthode de Gay-Lussac, pour déterminer le coefficient de la dilatation des gaz. — Gay-Lussac introduisait le gaz soumis à l'expérience dans une enveloppe AB (fig. 101) ayant la forme de celle d'un thermomètre à grand réservoir, et dont la tige était divisée en parties d'égales capacités ; il

avait déterminé d'avance le rapport entre la capacité du réservoir et celle d'une division de la tige. Dans la tige, était une petite colonne de mer-

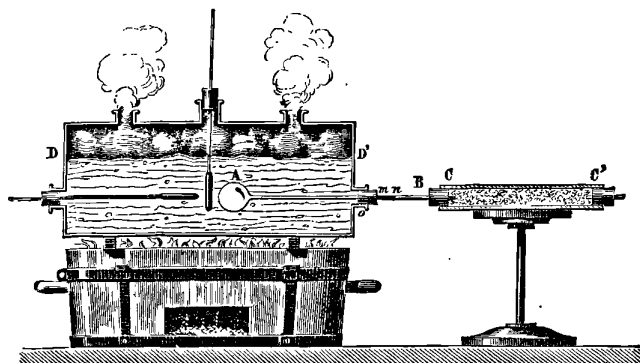


Fig. 101.

cure *mn*, séparant le gaz de l'atmosphère extérieure. L'appareil était placé dans une caisse *DD'*, et on le portait successivement à la température de la glace fondante, puis à une température *T*, qui était celle de l'eau bouillante, et qui était évaluée, par des thermomètres à mercure : on notait les deux positions successives de l'index de mercure. — Soit V_0 le volume du gaz à 0° , évalué en divisions de la tige. Soit V son volume apparent à la température *T*, évalué de la même manière : si l'on désigne par *k* le coefficient de dilatation cubique du verre, le volume réel du gaz à cette température était $V(1 + kT)$. L'accroissement de volume du gaz était donc $V(1 + kT) - V_0$, et par suite, le coefficient de dilatation α , c'est-à-dire l'accroissement éprouvé par l'unité de volume, pour une élévation de température de 1 degré, était donné par la formule

$$\alpha = \frac{V(1 + kT) - V_0}{V_0 T}$$

En opérant ainsi, Gay-Lussac a trouvé, pour l'air et pour les divers gaz soumis à ses expériences, un coefficient de dilatation, sensiblement le même pour tous, et égal à 0,00375.

Des expériences plus précises, de M. Regnault, ont donné pour le coefficient de dilatation de l'air le nombre 0,00367. — Ces mêmes expériences ont montré que, parmi les autres gaz, ceux qui sont éloignés de leur point de liquéfaction ont des coefficients de dilatation peu différents. Au contraire, les gaz facilement liquéfiables ont des coefficients de dilatation sensiblement plus grands, et d'autant plus grands que leur point de liquéfaction est plus éloigné.

137. **Thermomètres à air.** — Théoriquement, l'appareil de Gay-Lussac permet de déterminer la température T d'un milieu dans lequel on placerait l'enveloppe de verre, en supposant maintenant connu le coefficient de dilatation de l'air α (égal à 0,00367). — L'équation précédente donnerait alors

$$T = \frac{V - V_0}{\alpha V_0 - V k}.$$

Cet appareil serait donc un *thermomètre à air*, d'une grande simplicité. Mais, à la suite des expériences de Gay-Lussac pour la détermination du coefficient de dilatation de l'air, on avait déjà signalé les causes d'erreur qu'il présente, et en particulier l'insuffisance de l'index mercuriel, qui laisse toujours échapper une partie du gaz, entre lui et la paroi intérieure de la tige. — Ce sont ces causes d'erreur qui avaient rendu nécessaire l'emploi d'une méthode beaucoup moins simple, appliquée plus tard par M. Regnault à la même détermination.

Les appareils adoptés par M. Regnault peuvent, au contraire, être employés pour la mesure des températures : ce sont les thermomètres les plus sensibles. Ils présentent d'ailleurs cet avantage particulier, que les indications de plusieurs instruments, même construits avec des verres différents, sont toujours comparables entre elles ; en effet, la dilatation des gaz étant environ 150 fois égale à celle du verre, les petites différences que peuvent présenter des verres quelconques disparaissent vis-à-vis de la dilatation du gaz. — On peut dire, en général, que les thermomètres à air sont les seuls instruments qui conviennent aux recherches réellement précises. Mais ils ont l'inconvénient d'exiger, pour chaque évaluation de température, une manipulation assez délicate, ce qui empêche de les employer comme instruments usuels.

DENSITÉS DES GAZ

138. **Définitions.** — En appliquant aux gaz la définition qui a été donnée pour les poids spécifiques en général (55), on obtient toujours des nombres très-petits, puisque le poids d'un volume déterminé de gaz est toujours très-petit par rapport au poids du même volume d'eau. — On a été conduit alors à comparer ce poids à celui d'un même volume d'air, et l'on est convenu d'appeler *densité* d'un gaz le rapport entre le poids de volumes égaux du gaz de ce gaz et d'air, pris l'un et l'autre dans les mêmes conditions de température et de pression.

La densité d'un gaz, ainsi définie, éprouve des variations peu considérables, mais cependant sensibles, surtout pour les gaz voisins de leur point de liquéfaction, quand on la détermine en donnant des valeurs diverses à cette température et à cette pression qui sont, dans chaque cas, communes au gaz et à l'air. — Pour supprimer toute indétermi-

nation, nous conviendrons d'appeler plus spécialement densité d'un gaz le rapport entre les poids de volumes égaux de gaz et d'air, pris l'un et l'autre à la température de zéro, et sous la pression de 760 millimètres.

139. Principe de la méthode de M. Regnault pour déterminer les densités des gaz. — Pour obtenir la densité d'un gaz, le procédé employé par M. Regnault consiste dans les deux opérations suivantes :

1° Détermination du poids de gaz qui remplit, à 0° et sous une pression connue, voisine de 760^{mm}, la capacité d'un ballon de verre. on en conclut, au moyen de la loi de Mariotte, toujours applicable quand il s'agit de faibles variations de pression, le poids de gaz qui remplirait le ballon, à la même température de zéro, et sous la pression de 760 millimètres, 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 760^{mm}. — Pour obtenir le nombre qui exprime la densité du gaz, il suffira de diviser le premier résultat par le second.

Voici, quant à ses parties essentielles, le procédé suivi pour ces deux déterminations :

1° Le ballon A (fig. 102), qui a une capacité d'une dizaine de litres, est muni d'une garniture 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 permettent d'intercepter ou de rétablir à volonté ces communications. — Après avoir fait le vide, on laisse entrer le gaz sur lequel doit porter l'expérience, on fait le vide de nouveau, et on recommence cinq ou six fois la même manipulation ; après la dernière rentrée de gaz, on laisse pendant quelques instants le bal-

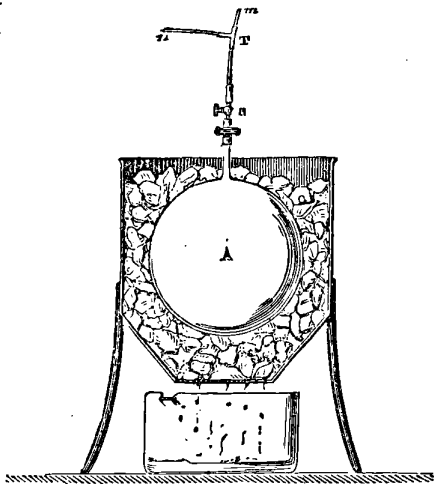


Fig. 102.

lon en communication avec l'atmosphère, et on ferme le robinet R, on observe la pression^a barométrique H. On retire le ballon de la glace, on l'essuie, et l'on attend qu'il ait pris la température du laboratoire : on le suspend alors sous l'un des plateaux de la balance, et on fait la tare, comme nous l'indiquerons plus loin.

Il est clair que, si l'on pouvait alors 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 la machine pneumatique ne peut jamais faire un vide absolu : on a recours alors au procédé suivant. — Le ballon étant replacé dans la glace fondante, on le remet en communication, par le tube T, d'une part, avec la machine pneumatique ; d'autre part, avec un *manomètre barométrique* (fig. 103), c'est-à-dire avec un tube de verre AB qui plonge dans une cuvette à mercure, à côté d'un tube barométrique ordinaire A'B'. On fait le vide autant que possible dans le ballon, et la différence des hauteurs du mercure dans les tubes AB et A'B' donne alors la tension ϵ du gaz restant. Enfin, on ferme 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, d'après la loi du mélange des gaz (87), celui qui occuperait le volume du ballon sous la pression $H - \epsilon$, et à la température de zéro. Donc, d'après

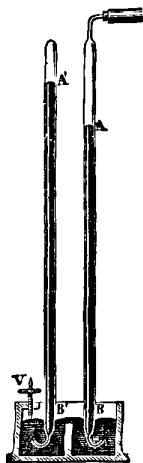


Fig. 103.

la loi de Mariotte, le poids de gaz qui remplirait le même volume à zéro et sous la pression de 760 millimètres serait $p \frac{760}{H - \epsilon}$.

2° On répète, avec de l'air sec, la même série d'expériences. En désignant par H' , ϵ' , p' les quantités analogues à H , ϵ , p , on a, pour poids de l'air qui emplirait le ballon à zéro et sous la pression de 760 millimètres,

$$p' \frac{760}{H' - \epsilon'}$$

En divisant l'un par l'autre ces deux poids, on obtient la densité cherchée :

$$d = \frac{p}{p'} \cdot \frac{H' - \epsilon'}{H - \epsilon}$$

Il nous reste à ajouter quelques mots sur la nature de la *tare* employée dans ces diverses pesées. — Le ballon éprouve, lorsqu'il est suspendu à la balance, une poussée de la part de l'air environnant ; cette poussée

dépend des conditions de pression, de température et d'humidité dans lesquelles se trouve l'air extérieur. Or, si ces conditions restaient les mêmes lors des pesées du ballon plein de gaz et du ballon vide, il est aisé de voir que p exprimerait toujours le poids de gaz enlevé par la machine, comme si la poussée n'existait pas. Si, au contraire, les conditions atmosphériques ont changé, ces variations, en augmentant ou diminuant le poids apparent du ballon pendant l'opération, seront une cause d'erreur qui pourra avoir une valeur appréciable par rapport au poids à déterminer. Il en est de même dans les pesées effectuées sur l'air. — Pour éviter les corrections qu'on devrait faire subir aux résultats, M. Regnault emploie, comme tare du ballon A, un autre ballon A' (fig. 104), fabriqué avec le même verre et présentant le même volume extérieur :

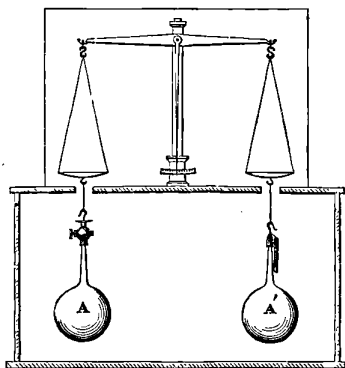


Fig. 104.

Quelles que soient les variations atmosphériques, les poussées éprouvées de part et d'autre restent égales. L'expérience montre d'ailleurs que l'équilibre de la balance, une fois établi dans ces conditions, se conserve ensuite pendant un temps indéfini.

C'est par cette méthode que M. Regnault a obtenu les résultats suivants :

DENSITÉS DE QUELQUES GAZ, PAR RAPPORT A L'AIR, A 0° ET SOUS LA PRESSION DE 760 MILLIMÈTRES.

Air.	1,0000
Azote.	0,9714
Oxygène	1,1056
Hydrogène	0,0693
Acide carbonique.	1,5291
Oxyde de carbone.	0,9569
Acide sulfureux.	2,1930

140. Poids du litre d'air. — La seconde partie de l'expérience précédente donne le poids de l'air que contiendrait le ballon à la température de zéro et sous la pression normale, savoir

$$p' \frac{760}{H' - \epsilon'}$$

Pour avoir le poids d'un litre d'air, dans ces mêmes conditions, il reste donc à déterminer le volume du ballon, en litres, à la même température. C'est ce qu'a fait M. Regnault, en pesant le ballon plein d'eau à zéro, et s'entourant de précautions particulières pour donner au résultat toute la précision désirable. — En divisant le poids précédent par le nombre de litres trouvé, on obtient le poids du litre d'air à zéro, et sous la pression de 760 millimètres. Ce poids est $1^{\text{r}}.293$.

141. Calcul du poids spécifique d'un gaz par rapport à l'eau. — Le poids d'un litre d'air étant $1^{\text{r}}.293$, si l'on veut obtenir le poids spécifique de l'air par rapport à l'eau, on doit prendre le rapport de ce poids à celui du même volume d'eau, c'est-à-dire à 1000 grammes. On obtient ainsi le nombre $0,001293$, ou sensiblement 0.0015 .

Le poids spécifique d'un gaz quelconque par rapport à l'eau s'obtient en multipliant le nombre précédent par la densité du gaz rapportée à l'air. Ainsi, la densité de l'acide carbonique par rapport à l'air étant $1,529$, le poids spécifique de ce gaz par rapport à l'eau est

$$0,001293 \times 1,529 = 0,001977.$$

142. Problème. — Calculer le poids d'un volume donné V d'un gaz, à la température t et sous la pression H .

Soit d la densité du gaz par rapport à l'air : son poids spécifique, à 0° et sous la pression de 760 millimètres, est $d \times 0,001293$. Dès lors, d'après ce qui a été vu précédemment (154), son poids spécifique à t degrés et sous la pression H est

$$0,001293 \times d \times \frac{H}{760} \times \frac{1}{1 + \alpha t}$$

Par suite, si le volume V est exprimé, par exemple, en litres, le poids exprimé en kilogrammes est :

$$P = V \times 0,001293 \times d \times \frac{H}{760} \times \frac{1}{1 + \alpha t}$$

CHAPITRE II

CHALEUR RAYONNANTE ET CONDUCTIBILITÉ.
CHALEURS SPÉCIFIQUES

CHALEUR RAYONNANTE

143. Rayonnement de la chaleur. — On dit que la chaleur se transmet *par rayonnement* lorsqu'elle franchit directement un espace plus ou moins considérable, sans échauffer les corps qui peuvent se trouver sur son passage.

144. 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 placer un petit thermomètre au centre du ballon de verre A (*fig. 105*), dans lequel on fait le vide en le soudant d'abord à l'extrémité d'un tube d'environ 1 mètre de longueur, remplissant le tout de mercure et le renversant sur une petite cuve à mercure, de manière à faire du ballon la chambre d'un baromètre, puis fermant à la lampe le col du ballon, et le détachant du tube. Quand on plonge le ballon ainsi préparé dans une cuve contenant de l'eau chaude, on voit le thermomètre accuser instantanément une élévation de température.

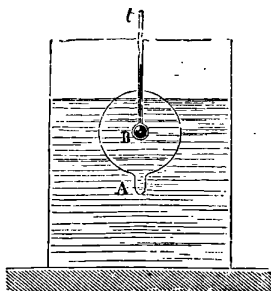


Fig. 105.

145. La chaleur traverse certains corps sans les échauffer. — Un boulet rouge et un thermomètre étant placés de part et d'autre d'une nappe d'eau, qui s'écoule par une fente pratiquée à la partie inférieure d'un réservoir, la température du thermomètre s'élève. — Avec une lentille taillée dans un globe de glace, on a pu enflammer des 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 glace qu'on place sur son trajet ; elle les a évidemment traversés sans leur faire éprouver d'élévation sensible de température.

146. Propagation rectiligne de la chaleur. — Le réservoir d'un thermomètre étant placé en présence d'une source calorifique de petite dimension, si l'on interpose un petit écran de bois ou de carton

sur un point de la droite qui les joint, on n'observe plus aucune élévation de température; si l'écran est placé dans toute autre région de l'espace, il y a transmission de chaleur. Donc la chaleur se propage en ligne droite, de la source au réservoir du thermomètre. — On nomme *rayon calorifique* toute direction rectiligne suivant laquelle se propage la chaleur rayonnante. Si l'on remarque d'ailleurs qu'un corps chaud émet de la chaleur dans toutes les directions, on voit que toute droite partant d'un point quelconque de la surface de ce corps représente un rayon calorifique.

147. Quantités de chaleur reçues normalement par une même surface, à différentes distances de la source. —

Soit S (fig. 106) un point émettant des rayons calorifiques dans toutes les directions. Si l'on décrit une sphère autour de ce point comme centre et avec un rayon quelconque SB, elle reçoit, dans un temps déterminé, toute la chaleur émise par S. Si maintenant, supprimant cette sphère, on en décrit une autre avec un rayon SB' double du premier, elle recevra, comme la première, toute la chaleur émise par S. Or, la seconde sphère a une surface quatre fois égale à celle de la première : donc chaque

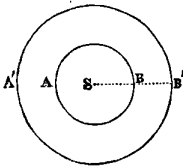


Fig. 106.

centimètre carré pris sur la sphère SB' recevra, dans le même temps, une quantité de chaleur égale au quart de celle que reçoit un centimètre carré pris sur la sphère SB. — Ce raisonnement est général ; donc :

Les quantités de chaleur reçues normalement par une surface de même étendue, à différentes distances d'un point calorifique, sont inversement proportionnelles aux carrés de ces distances.

148. Appareil de Melloni. — L'étude expérimentale de la chaleur rayonnante a été l'objet de travaux assez nombreux, de la part de Leslie, Rumford, Delaroché, etc. La méthode la plus générale est celle qui a été employée par Melloni ; nous décrirons d'abord succinctement l'appareil qui a été imaginé par lui, et qui peut servir à toutes les expériences.

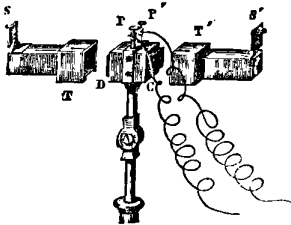


Fig. 107.

Dans cet appareil, les quantités de chaleur sont mesurées par un instrument d'une grande sensibilité, le *thermo-multiplieur*. Il comprend :

1° Une *pile thermo-électrique* CD (fig. 107), c'est-à-dire une chaîne formée alternativement de barreaux de bismuth *a, a...*, et de barreaux d'antimoine *b, b...* La figure 108 représente cette chaîne développée ; la

figure 107 la montre, en CD, repliée et assujettie dans un étui de laiton.

2° Un *galvanomètre* G (fig. 108) versé à l'une des extrémités de la chaîne

précédente par des fils métalliques, et dans lequel une aiguille aimantée, suspendue par un fil de cocon, et mobile au-dessus d'un cercle horizontal, accuse l'existence des courants électriques qui se propagent dans l'appareil.

La théorie du galvanomètre sera donnée plus loin : il nous suffira de savoir maintenant que, dès qu'on produit, dans la pile, une différence de température entre le système des soudures impaires 1, 3, 5... (*fig. 108*) et

le système des soudures paires 2, 4, 6..., on donne naissance à un courant électrique qui traverse le galvanomètre et dévie l'aiguille aimantée de la position dans laquelle elle s'était placée sous l'action de la terre. De plus, ces écarts de l'aiguille sont d'autant plus grands, que la *différence de température*

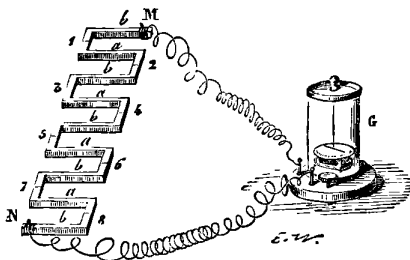


Fig. 108.

entre les deux systèmes de soudures est plus considérable. — Or, les soudures impaires forment l'une des faces D de la pile lorsqu'elle est repliée (*fig. 107*) ; les soudures paires forment l'autre face C : sur ces deux faces, s'adaptent des tubes de cuivre T, T', munis d'opercules mobiles S, S'. Si donc on relève un de ces opercules, S par exemple, l'autre opercule S' restant abaissé, le moindre rayonnement calorifique, arrivant

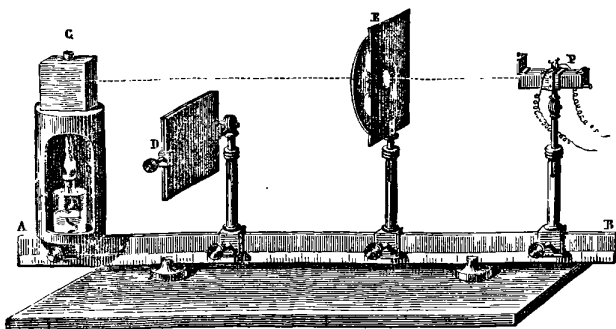


Fig. 109. — Appareil de Melloni.

du côté S, produit une déviation de l'aiguille : la grandeur de la déviation sert à mesurer la quantité de chaleur incidente.

Dans l'appareil de Melloni, la pile est montée sur un support que l'on

peut placer en divers points d'une règle métallique AB (*fig. 109*). D'autres supports analogues servent à placer, sur la même règle, soit les sources de chaleur nécessaires aux expériences, soit les écrans destinés à intercepter les rayons qui devront être arrêtés. → Le galvanomètre, qui n'est pas visible sur la figure 109, est réuni à la pile au moyen de fils métalliques assujettis en P.

149. Émission de la chaleur rayonnante. — Pouvoirs émissifs. — Plaçons, sur la règle AB de l'appareil de Melloni (*fig. 109*), en présence de la pile thermo-électrique P, un cube métallique C rempli d'eau bouillante, et dont les faces sont couvertes de diverses substances : l'une d'elles est enduite, par exemple, de noir de fumée, une autre de blanc de céruse, une troisième est métallique et brillante, etc. Un écran E, percé d'une ouverture, limite le faisceau de rayons qui doit arriver du cube à la pile. — Supposons qu'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, on voit l'aiguille s'écarter de sa position primitive et s'arrêter, après quelques oscillations, dans une position faisant avec la première un angle qu'on mesure sur le cercle gradué. On relève l'écran D, et on laisse l'aiguille revenir à sa position primitive. — On tourne alors vers la pile une autre face du cube, une face métallique, par exemple, et on recommence l'expérience : on observe une nouvelle déviation, 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 une même température, celle de l'eau bouillante : de plus, ce sont toujours des surfaces d'égale étendue qui envoient leurs rayons à la pile. — Donc *les quantités de chaleur émises par des surfaces de diverses natures, à une même température, dépendent de la nature même de ces surfaces.*

Parmi tous les corps, le noir de fumée émet, à une température déterminée, le maximum de chaleur. — On est convenu de nommer *pouvoir émissif* d'un corps quelconque *le rapport de la quantité de chaleur qu'il émet, 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 émette la même quantité de chaleur que le noir de fumée, à la même température ; c'est-à-dire que c'est le seul auquel on trouve un pouvoir émissif égal à l'unité. — Pour tous les autres, les pouvoirs émissifs sont exprimés par des fractions, que l'expérience a permis de déterminer.

Les métaux ont en général un pouvoir émissif très-faible, et d'autant plus faible que leur surface est mieux polie : le pouvoir émissif de l'argent poli est seulement 0,025. — Ce résultat justifie l'emploi de la vaiselle métallique, pour conserver chauds les mets, le thé, etc. C'est également de vases métalliques polis qu'on se sert dans les expériences de physique, lorsqu'on veut éviter, dans toute la mesure possible le refroidissement.

150. Réflexion de la chaleur rayonnante. — Pouvoirs réflecteurs. — Lorsqu'un rayon de chaleur tombe sur une surface bien polie, il est *réfléchi*, c'est-à-dire renvoyé en avant de la surface, comme sont réfléchis les rayons du soleil quand on les reçoit sur un miroir. — Les lois de la réflexion de la chaleur sont les mêmes que celles de la réflexion de la lumière. Ces lois seront, pour la lumière, l'objet de vérifications précises. nous nous contenterons de démontrer ici que, si des rayons calorifiques tombent sur une surface polie dans la même direction que des rayons lumineux, les rayons calorifiques ont encore, après réflexion, la même direction que les rayons lumineux réfléchis.

Lorsqu'on reçoit sur un miroir sphérique concave, dans la direction de son axe, des rayons lumineux parallèles, ils viennent tous passer, après réflexion, en un même point qu'on appelle le *foyer principal* du miroir : il y a, en ce point, concentration de lumière. Réciproquement, si au foyer principal d'un pareil miroir on place une source de lumière, les rayons émis par la source sur le miroir sont renvoyés parallèlement à l'axe principal. — Cela posé, installons deux miroirs sphériques concaves A, B (fig. 110) en regard l'un de l'autre, et de manière que leurs axes *coïnci-*

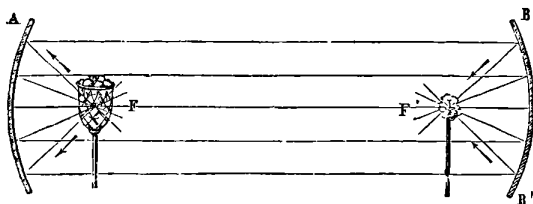


Fig. 110.

dent. On dit alors que les deux miroirs sont *conjugués*. Plaçons d'abord au foyer F la flamme d'une bougie : les rayons lumineux qu'elle envoie au miroir A sont réfléchis parallèlement à l'axe; ils tombent sur le miroir B et sont réfléchis au foyer F', de sorte qu'on peut voir, en ce point, sur un petit écran de papier, une image très-brillante de la flamme. Substituons maintenant, à la flamme de la bougie, une petite grille pleine de charbons ardents, comme celle que représente la figure, et plaçons en F' de l'amadou ou du coton-poudre : la concentration des rayons calorifiques au point F' déterminera l'inflammation de la matière combustible.

La chaleur qui tombe sur une surface, quelque polie qu'elle soit, n'est jamais réfléchie d'une manière absolument complète. On nomme *pouvoir réflecteur* d'une surface le *rapport de la quantité de chaleur réfléchie à la quantité de chaleur incidente*. — L'appareil de Melloni permet de déterminer les pouvoirs réflecteurs de plaques polies de diverses natures, en mesu-

rant d'abord, au moyen de la pile, la quantité de chaleur incidente ; puis, la quantité de chaleur qui est réfléchiée par chacune de ces plaques. — De toutes les substances connues, ce sont les métaux qui ont le pouvoir réflecteur le plus grand.

151. Diffusion ou réflexion irrégulière. — Les substances mates, telles que le papier, le blanc de céruse, 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. Ils agissent sur les rayons calorifiques comme sur les rayons lumineux ; car, lorsqu'on les expose aux rayons solaires, par exemple, ils renvoient une partie de la lumière dans toutes les directions, ce qui les rend visibles de tous les points de l'espace. — C'est ce phénomène qu'on désigne, pour la chaleur rayonnante aussi bien que pour la lumière, sous le nom de *diffusion* ou de *réflexion irrégulière*.

152. Transmission de la chaleur rayonnante. — Pouvoirs diathermanes. — L'expérience nous a montré que certains corps laissent passer la chaleur (145), comme les corps transparents laissent passer la lumière. — On nomme *substances diathermanes* celles qui sont douées de cette propriété ; *substances athermanes* celles qui ne transmettent aucune partie de la chaleur incidente.



Fig. 111.

Le pouvoir diathermane d'un corps est le rapport de la quantité de chaleur transmise à la quantité de chaleur incidente. — Pour mesurer le pouvoir diathermane d'une plaque de verre, de sel gemme, d'alun, au moyen de l'appareil de Melloni, on la placera sur une petite tablette (fig. 111), entre la source de chaleur et la pile : on mesurera la quantité de chaleur transmise, au moyen de la déviation du galvanomètre ; puis, supprimant la plaque, on mesurera de même la quantité de chaleur incidente. Enfin, on prendra le rapport de ces deux quantités.



Fig. 112.

Ces expériences ont été faites en soumettant successivement une même plaque à l'action de la chaleur émise par diverses sources, à des températures plus ou moins élevées. On employait alternativement, par exemple, le cube plein d'eau bouillante (fig. 109) et une petite lampe à mèche carrée et sans cheminée de verre, ou *lampe de Locatelli* (fig. 112) : la première source est à la température de 100 degrés, et n'émet que de la chaleur obscure ; la seconde est à une température beaucoup plus élevée, et émet de la chaleur lumineuse. Melloni faisait également usage de quelques autres sources, ayant des températures intermédiaires. — En opérant ainsi, on arrive aux résultats suivants :

1° Toutes les substances parfaitement transparentes, c'est-à-dire laissant

passer tous les rayons lumineux, laissent passer aussi, en proportion considérable, les rayons de *chaleur lumineuse* : ainsi le verre, le cristal de roche, ont un pouvoir diathermane assez grand pour la chaleur de la lampe de Locatelli.

2° Certaines substances, bien que tout à fait transparentes pour la lumière, arrêtent la plus grande partie de la *chaleur obscure* : ainsi les substances précédentes, verre, cristal de roche, soumises à l'action de la chaleur émise par le cube à eau bouillante, n'en laissent passer que des quantités inappréciables.

3° D'autres substances, au contraire, sont également diathermanes pour toute espèce de chaleur : ainsi le sel gemme laisse toujours passer les 0,92 de la chaleur incidente ; son pouvoir diathermane est 0,92, quelle que soit la source calorifique employée.

153. Applications. — Dans les serres vitrées où l'on conserve les végétaux auxquels l'action du froid serait funeste, l'observation montre que, même pendant l'hiver, la température s'élève rapidement, sous l'influence des rayons solaires seuls. On conçoit, d'après ce qui précède, que 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, rayonnent également, mais ils n'émettent que de la chaleur *obscure*, qui ne peut traverser le verre, en sorte que la chaleur s'accumule progressivement à l'intérieur de la serre. — Le même phénomène se produit sous les cloches dont les maraichers couvrent leurs plantes, au printemps, pour faire mûrir les fruits : il suffit d'introduire la main sous l'une de 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 au verre. De là l'élévation de température qu'éprouve la vase au fond des étangs peu profonds.

Enfin, 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 proportion 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.

154. Absorption de la chaleur rayonnante. — Pouvoirs absorbants. — La chaleur *absorbée* par un corps est la portion de chaleur incidente qui n'est ni renvoyée par réflexion ou diffusion, ni transmise au travers du corps : elle est retenue par lui, et produit une élévation de température ou un changement d'état.

On nomme *pouvoir absorbant* d'un corps le rapport de la quantité de chaleur absorbée à la quantité de chaleur incidente.

Pour les corps absolument *athermanes*, la quantité de chaleur absorbée

est évidemment égale à l'excès de la chaleur incidente sur la chaleur renvoyée par réflexion ou diffusion. — Si l'on considère, en particulier, des corps athermanes dont la surface présente un poli assez parfait pour qu'ils n'aient aucun pouvoir diffusif, la chaleur absorbée est l'excès de la chaleur incidente sur la chaleur réfléchie : en d'autres termes, *le pouvoir absorbant est complémentaire du pouvoir réflecteur*. Il suffit donc, dans ce cas particulier, de mesurer le pouvoir réflecteur (150) pour en déduire le pouvoir absorbant.

Pour les autres corps, les pouvoirs absorbants ne peuvent être déterminés que par des mesures assez délicates, qui ne peuvent être indiquées ici. — L'expérience montre, ainsi qu'on devait le prévoir, d'après ce qui précède, que, pour chaque substance, le pouvoir absorbant dépend à la fois de sa nature, et de la nature de la chaleur incidente.

Nous remarquerons enfin que, le noir de fumée étant à la fois dépourvu de tout pouvoir diathermane, de tout pouvoir réflecteur et de tout pouvoir émissif, on doit considérer ce corps comme absorbant intégralement toute la chaleur incidente, quelle qu'en soit la nature. Dès lors, le *pouvoir absorbant* d'un corps quelconque, dans des conditions déterminées, peut encore être défini comme *le rapport de la quantité de chaleur qu'absorbe ce corps, à celle qu'absorbe le noir de fumée, dans les mêmes conditions*.

155. Égalité des pouvoirs émissifs et des pouvoirs absorbants. — On a déterminé par l'expérience la valeur des pouvoirs absorbants d'un certain nombre de substances. On a déterminé également les pouvoirs émissifs de ces mêmes substances par rapport au noir de fumée (149). Ces deux séries d'expériences ont toujours donné, pour un même corps et pour une même espèce de chaleur, des nombres identiques. — C'est ce résultat qu'on exprime en disant que *le pouvoir émissif d'un corps est égal à son pouvoir absorbant, pour la même espèce de chaleur*.

Ce principe, dont la théorie démontre d'ailleurs la généralité, permet de se dispenser de la détermination du pouvoir absorbant de certaines substances, lorsqu'on connaît leur pouvoir émissif, à la condition qu'il s'agisse toujours de la même espèce de chaleur.

156. Équilibre mobile de température. — Quand plusieurs corps, à des températures inégales, sont mis en présence, les plus froids s'échauffent, les plus chauds se refroidissent, et il en est ainsi jusqu'au moment où tous les corps parviennent à une même température, intermédiaire entre la plus haute et la plus basse : ils la conservent indéfiniment, s'il n'intervient aucune nouvelle cause de dégagement ou d'absorption de chaleur.

Ces résultats pourraient s'expliquer en admettant que le rayonnement se produit exclusivement des corps les plus chauds vers les corps les plus froids, et que les rayons émis par un corps à la température est devenue

uniforme. Mais il est peu rationnel de supposer que, pour chaque corps, la propriété d'émettre de la chaleur soit subordonnée à la température des corps environnants, et qu'il perde cette propriété quand il est à une température égale ou inférieure à la leur. — Prévost, de Genève, a proposé d'expliquer les résultats précédents en admettant qu'un corps quelconque, à une température quelconque, rayonne toujours de la chaleur, mais en quantité d'autant plus grande que sa température 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 corps s'échauffe, c'est qu'il absorbe plus de chaleur qu'il n'en émet. L'équilibre de température étant une fois réalisé entre plusieurs corps placés dans une même enceinte, cet équilibre se conserve indéfiniment, parce que, pour chacun de ces corps, la perte de chaleur due à son rayonnement propre est compensée par la chaleur que lui envoient les autres corps et les parois de l'enceinte. — Cette manière d'envisager les phénomènes a été désignée sous le nom d'*équilibre mobile de température*.

157. **Réflexion apparente du froid.** — Lorsque, dans l'expérience des *miroirs conjugués*, on place au foyer F (fig. 110) un ballon de verre contenant un mélange réfrigérant, et au foyer F' un thermomètre, on voit le thermomètre s'abaisser de plusieurs degrés. Cette expérience, célèbre dans la science, semblait conduire à admettre l'existence de rayons frigorifiques. — La théorie de l'équilibre mobile de température permet de rendre compte du résultat, sans la nouvelle hypothèse des rayons frigorifiques. — En effet, supposons, pour plus de simplicité, que les parois de l'enceinte, la surface du thermomètre et celle du ballon soient dépourvues de pouvoir réflecteur et aient des pouvoirs émissifs égaux. Avant que le mélange réfrigérant soit placé en F, le thermomètre F' est à la même température que l'enceinte : or, il envoie sur le miroir B un faisceau de rayons divergents qui sont réfléchis sur le miroir A, et de là vers l'enceinte, en passant par F; dans les mêmes directions, et en sens inverse, se propagent des rayons venant de l'enceinte, passant par F, et rendus convergents vers F'; puisque l'enceinte et le thermomètre ont même pouvoir émissif, par suite même pouvoir absorbant, et pas de pouvoir réflecteur, la perte de chaleur reste, pour le thermomètre, toujours égale au gain, et l'équilibre de température persiste. Au contraire, lorsqu'on vient à placer en F le mélange réfrigérant, les rayons qui venaient de l'enceinte en passant par F sont remplacés par ceux qu'envoie le corps froid; 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.

CONDUCTIBILITÉ

158. Propagation de la chaleur par conductibilité. —

L'observation vulgaire suffit pour montrer que la chaleur peut se transmettre dans les corps par *conductibilité*, c'est-à-dire par une élévation graduelle de la température de leurs couches successives.

Mais les divers corps sont doués de la propriété conductrice à des degrés très-différents. Chacun sait, par exemple, qu'une cuiller d'argent, plongée par l'une de ses extrémités dans un liquide chaud, s'échauffe assez rapidement à son autre extrémité, pour qu'il devienne bientôt impossible de la tenir avec les doigts. Au contraire, une allumette enflammée peut être tenue à la main, sans qu'on ressente une élévation sensible de température. — La méthode suivante permet de comparer entre eux les différents corps solides, au point de vue de leurs propriétés conductrices.

159. Conductibilité des corps solides. — Appareil d'Ingenhousz. — L'appareil d'Ingenhousz se compose d'une petite cuve rectangulaire de laiton (*fig. 113*), dont l'une des faces verticales reçoit

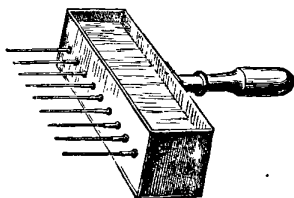


Fig. 113.

les extrémités de tiges de diverses substances, mais de même diamètre : or, 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 que les métaux sont incomparablement plus conducteurs que les substances non métalliques : que, par exemple, 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.

Le tableau suivant indique la classification des corps solides les plus usuels, par ordre de conductibilité décroissante.

Argent.	Fer.	Verre.
Cuivre.	Acier.	Marbre.
Or.	Plomb.	Porcelaine.
Laiton.	Platine.	Poterie.
Zinc.	Bismuth.	Charbon.
Étain.		Bois.

160. Courants produits dans une masse fluide échauffée par la partie intérieure. — Lorsqu'on chauffe un liquide par la partie inférieure, les parties qui reçoivent l'action de la chaleur se dilatent : leur densité diminuant, elles s'élèvent, et sont remplacées par d'autres qui s'échauffent à leur tour. Il s'établit ainsi des courants ascendants de liquide chaud et des courants descendants de liquide froid. — On peut rendre ces courants sensibles en échauffant, par la partie inférieure, une masse d'eau placée dans une cloche renversée (*fig. 114*) : si l'on a eu soin de mettre en suspension dans cette eau un peu de sciure de bois, on la voit former des courbes qui s'élèvent des points directement chauffés, et redescendent en suivant les parois latérales de la cloche. La chaleur se répartit ainsi progressivement, de manière que les diverses parties du liquide ne présentent jamais, à un même instant, que de faibles différences de température.

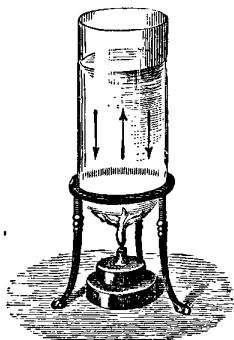


Fig. 114.

161. Faible conductibilité des liquides et des gaz. — L'expérience précédente montre que, pour juger si les liquides sont conducteurs de la chaleur, il est nécessaire de les chauffer de façon qu'il ne puisse pas s'y produire de ces mouvements qui amènent successivement leurs diverses parties en contact avec la source de chaleur. — C'est à quoi l'on parvient en les chauffant par la partie supérieure. Dans ces conditions, on constate que la conductibilité est tellement faible, qu'on peut faire bouillir, à la surface, une masse d'eau placée dans un vase de quelques décimètres de hauteur, sans que le thermomètre indique, dans les couches profondes, une élévation sensible de température.

Les gaz sont encore plus mauvais conducteurs que les liquides : dans la pratique, une couche gazeuse maintenue dans un état d'immobilité absolue peut être considérée comme à peu près incapable de transmettre la chaleur par conductibilité. — C'est là ce qui explique l'emploi des fourrures, de la laine, des étoffes ouatées, comme vêtements pour l'hiver : les filaments dont ces étoffes sont formées emprisonnent, dans leurs interstices, une couche d'air qui empêche la chaleur de se propager au dehors. — Ces mêmes enveloppes, placées autour d'un corps dont la température est inférieure à celle du milieu ambiant, l'empêchent aussi de s'échauffer : c'est ainsi qu'on peut conserver de la glace, en été, pendant plusieurs heures, en l'environnant de couvertures de laine

DÉTERMINATION DES CHALEURS SPÉCIFIQUES

162. Définitions — L'expérience montre que, pour faire éprouver une même élévation de température à des poids égaux de différents corps, il faut leur fournir des quantités de chaleur différentes.

On prend comme unité, dans la mesure des quantités de chaleur, la *calorie*, c'est-à-dire la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1 degré la température de 1 kilogramme d'eau.

On nomme *chaleur spécifique* d'un corps le nombre de calories nécessaires pour élever de 1 degré la température de 1 kilogramme de ce corps.

163. Détermination de la chaleur spécifique des corps solides et liquides, par la méthode des mélanges. — Le procédé connu sous le nom de *méthode des mélanges*, pour la mesure des chaleurs spécifiques, consiste essentiellement dans la série des opérations suivantes. On chauffe, à une température connue T , un poids déterminé P du corps soumis à l'expérience; on le plonge ensuite dans une masse d'eau, dont on connaît également le poids M et la température initiale t . Le corps se refroidit, en cédant à l'eau une partie de sa chaleur, de sorte que l'eau s'échauffe : quand l'équilibre est établi, on détermine la température θ du mélange. — On exprime que la quantité de chaleur perdue par le corps est égale à la quantité de chaleur gagnée par l'eau, et l'on obtient ainsi une équation où la seule inconnue est la chaleur spécifique cherchée.

Soit x la chaleur spécifique du corps, c'est-à-dire le nombre de calories nécessaires pour élever de 1 degré la température de 1 kilogramme de ce corps : pour chaque abaissement de température de 1 degré, le poids P a perdu Px ; en abaissant de $(T - \theta)$ degrés, il a donc perdu $Px(T - \theta)$. D'autre part, d'après la définition même de la calorie, le poids M d'eau a absorbé, pour chaque élévation de température de 1 degré, M calories; en s'élevant de $(\theta - t)$ degrés, il a donc absorbé $M(\theta - t)$. En égalant ces quantités de chaleur, on a

$$(1) \quad Px(T - \theta) = M(\theta - t),$$

d'où l'on tire :

$$x = \frac{M(\theta - t)}{P(T - \theta)}.$$

164. Termes de correction. — En posant l'équation comme on vient de le faire, on n'a tenu compte, ni de l'influence du vase dans lequel est placée l'eau, ni de celle de l'enveloppe dans laquelle est généralement contenu le corps soumis à l'expérience, et qui abandonne de la

chaleur à l'eau. — Pour obtenir des résultats précis, il est nécessaire d'introduire quelques *termes de correction*.

Et d'abord, pour donner à ces termes de correction une valeur aussi petite que possible, on place l'eau qui doit servir à l'expérience dans un vase V (fig. 115) en laiton très-mince. Ce vase, qu'on appelle le *calorimètre*, repose sur des fils de soie croisés, supportés par des montants de bois a : les fils de soie, qui sont très-mauvais conducteurs, n'enlèvent au laiton que des quantités de chaleur tout à fait insensibles. Un thermomètre K, à très-petit réservoir et à tige très-fine, donne la température du liquide aux divers instants. — Si le corps soumis à l'expérience est un corps solide en fragments, on le place dans une petite corbeille en fils de laiton très-fins ; si c'était un liquide ou un corps solide soluble dans l'eau, on le mettrait dans une petite fiole de verre, aussi mince que possible. — Après avoir laissé le corps et son enveloppe, pendant un temps suffisant, dans une étuve comme celle de la figure 94, de manière que la température T soit bien connue, on les introduit dans le calorimètre : on agite pour déterminer le mélange des couches liquides, et on note la température θ à laquelle arrive le thermomètre.

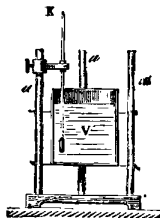


Fig. 115.

Soit maintenant p le poids du calorimètre de laiton, p_1 le poids de la corbeille de laiton qui contient le corps ; soit c la chaleur spécifique du laiton, que nous supposerons connue. — En raisonnant comme plus haut, on voit que la quantité de chaleur perdue par l'enveloppe du corps est $p_1c(T - \theta)$; la quantité de chaleur gagnée par le métal du calorimètre est $pc(\theta - t)$. En introduisant ces termes dans l'équation (1), on obtient :

$$(2) \quad Px(T - \theta) + p_1c(T - \theta) = M(\theta - t) + pc(\theta - t),$$

d'où l'on tire :

$$x = \frac{(M + pc)(\theta - t) - p_1c(T - \theta)}{P(T - \theta)}.$$

Pour abrégér le langage, on désigne quelquefois la quantité pc , c'est-à-dire le produit du poids du calorimètre par sa chaleur spécifique, sous le nom de *valeur du calorimètre transformé en eau* ; on voit, en effet, qu'un poids d'eau égal au produit pc absorberait, en s'échauffant de $(\theta - t)$ degrés, précisément la quantité de chaleur $pc(\theta - t)$ qu'absorbe le métal du calorimètre lui-même.

Remarque. — Nous avons supposé connue la chaleur spécifique c du laiton qui forme le calorimètre et l'enveloppe du corps. Cette donnée est facile à obtenir par un *expérimentum crucis* ; en effet, appliquons la

méthode en prenant, comme corps soumis à l'expérience, un certain poids P' de ce même laiton : soient M' , T' , t' , θ' les données de cette expérience qui correspondent à M , T , t et θ ; on aura l'équation

$$P'c(T' - \theta') + p_1c(T - \theta) = M'(\theta' - t') + pc(\theta - t),$$

d'où l'on tirera

$$c = \frac{M'(\theta' - t')}{(P' + p_1)(T - \theta) - p(\theta - t)}.$$

165. **Résultats.** — Voici quelques-uns des résultats obtenus par cette méthode :

CHALEUR SPÉCIFIQUE DE QUELQUES CORPS SOLIDES ET LIQUIDES.

Acier	0,118	Fonte blanche	0,130
Argent	0,057	Laiton	0,094
Charbon de bois	0,242	Mercure	0,033
Cuivre	0,095	Or	0,032
Diamant	0,147	Platine	0,032
Eau	1,000	Plomb	0,031
Essence de térébenthine	0,426	Soufre	0,202
Étain	0,056	Verre	0,198
Fer	0,114	Zinc	0,096

CHAPITRE III

CHANGEMENTS D'ÉTAT

PASSAGE DE L'ÉTAT SOLIDE A L'ÉTAT LIQUIDE,
ET PASSAGE INVERSE.

166. **Fusion.** — Lorsqu'on porte un corps solide à des températures de plus en plus élevées, il arrive en général un moment où il passe à l'état liquide : on dit alors qu'il entre en *fusion*. — Ce phénomène 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 restant invariable pendant toute la durée du phénomène.*

C'est au moyen de la fusion de la glace qu'a été déterminé le point fixe inférieur du thermomètre. Le point de fusion de la glace est donc, par définition, la température de 0° centigrade. — Les points de fusion des autres corps sont répartis dans l'échelle des températures, comme l'indique le tableau suivant :

POINTS DE FUSION DE QUELQUES CORPS SOLIDES.

Mercure.	— 40°	Plomb.	320°
Glace.	0°	Zinc.	300°
Suif.	+ 35°	Argent.	1000°
Phosphore.	43°	Fonte blanche	1100°
Cire blanche.	68°	Fonte grise	1200°
Soufre.	110°	Acier	1400°
Étain.	250°	Fer.	1500°

On a considéré longtemps comme infusibles un certain nombre de substances, auxquelles on donnait le nom de *réfractaires*. A mesure qu'on est parvenu à produire des températures plus élevées, on a vu diminuer le nombre de ces substances. — Ainsi, en alimentant la flamme d'une lampe par un jet d'oxygène, M. Gaudin a pu fondre le quartz (cristal de roche) ; en activant de même la flamme du gaz d'éclairage et opérant dans un four en chaux vive, MM. Deville et Debray sont parvenus à couler le platine en lingots. Quelques années auparavant, Despretz, en concentrant les rayons solaires à l'aide d'une large lentille, et employant simultanément les actions calorifiques d'un courant électrique intense et d'un chalumeau à gaz oxygène et à hydrogène, a fondu la magnésie et l'alumine, et ramolli des baguettes de charbon de manière à les courber. — Il est donc permis de présumer que, avec des sources de chaleur suffisamment intenses, on parviendrait à fondre tous les corps solides, à l'exception d'un certain nombre de corps composés, dont les éléments se dissocient avant qu'ils entrent en fusion.

167. Chaleur latente de fusion. — Lorsqu'un corps, placé sur un foyer de chaleur, atteint la température à laquelle il commence à fondre, sa température reste constante, ainsi qu'il a été dit plus haut, pendant tout le temps que dure la fusion. De là résulte que, pendant tout ce temps, la quantité de chaleur fournie par le foyer est uniquement employée à produire le changement d'état, *sans élever la température*. Un thermomètre plongé dans la masse n'accuse pas le gain de chaleur qu'éprouve le corps : c'est ce qu'on exprime, assez improprement d'ailleurs, en disant que cette chaleur devient *latente*.

Nous appellerons *chaleur latente de fusion* d'un corps, ou simplement *chaleur de fusion*, la quantité de chaleur qu'absorbe 1 kilogramme de ce corps pour fondre, sans élévation de température.

168. Détermination de la chaleur latente de fusion de la glace, par la méthode des mélanges. — La méthode des mélanges a été appliquée par MM. de la Provostaye et P. Desains, à la détermination de la chaleur latente de fusion de la glace. — Dans un calorimètre semblable à celui qui a été précédemment décrit (*fig. 115*) et ayant un poids p , on place un poids connu M d'eau, à une température t notablement supérieure à zéro. On y plonge un morceau de glace à zéro, après l'avoir essuyé avec du papier buvard ; on agite le liquide, et on note la température finale θ du mélange. Le poids de la glace introduite ne peut évidemment être obtenu par une pesée préalable, pendant laquelle une partie se fondrait ; on l'obtient en déterminant la différence entre les poids du calorimètre avant et après l'expérience : soit P le poids de la glace, ainsi déterminé. — Exprimons que la quantité de chaleur employée pour fondre la glace, et pour élever l'eau de fusion jusqu'à la température du mélange, est égale à celle qu'ont abandonnée l'eau placée dans le calorimètre et le calorimètre lui-même.

Soit x la chaleur latente de fusion de la glace ; le poids P de la glace a absorbé, pour se fondre, Px calories ; l'eau de fusion a pris encore, pour s'échauffer de zéro à θ degrés, une quantité de chaleur $P\theta$. D'autre part, l'eau placée dans le calorimètre et le calorimètre lui-même ont perdu respectivement $M(t - \theta)$ et $pc(t - \theta)$. On a donc l'équation

$$Px + P\theta = (M + pc)(t - \theta),$$

d'où l'on tire

$$x = \frac{(M + pc)(t - \theta) - P\theta}{P}.$$

En opérant ainsi, on trouve, pour chaleur latente de la fusion de la glace, le nombre 79,25. — En d'autres termes, 1 kilogramme de glace absorbe pour fondre, sans changer de température, autant de chaleur qu'il en faudrait pour échauffer d'un degré 79^{kil},25 d'eau.

169. Solidification. — Si l'on fait abstraction des corps qui ne passent de l'état solide à l'état liquide, ou réciproquement, qu'en passant par une série d'états plus ou moins pâteux, on peut dire que le phénomène de la solidification est assujéti à des lois semblables à celles de la fusion. C'est-à-dire qu'un liquide déterminé tend à se solidifier à une température déterminée, qui est précisément la *température de fusion* du solide dans lequel il se transforme, et qu'il conserve alors cette même température pendant tout le temps que dure la solidification de la masse tout entière.

Toutefois il est extrêmement rare qu'une masse *entièrement liquide* commence à se solidifier à la température fixée par cette règle. Le plus ordinairement, on peut abaisser sa température beaucoup au-dessous,

sans que la solidification se produise. C'est le phénomène désigné sous le nom de *surfusion*, dont nous devons indiquer les principales particularités.

170. Phénomènes de surfusion. — Lorsqu'un liquide est maintenu dans un état d'immobilité absolue, et qu'il ne se trouve, en aucun point de sa masse, *aucune parcelle solide* identique à celles dans lesquelles il se transformerait, l'expérience montre qu'il peut se refroidir à une température bien inférieure à son point de solidification normal, sans passer à l'état solide. — Des expériences anciennes avaient montré que ces conditions sont facilement réalisables dans des tubes capillaires; les expériences récentes de M. Gernez prouvent que, même dans des vases de dimensions ordinaires, on peut obtenir les mêmes résultats. L'eau, le soufre, le phosphore, l'acide acétique cristallisable, etc., peuvent présenter la surfusion, pendant un temps à peu près indéfini, pourvu que la condition précédente soit remplie.

Au contraire, si, dans une masse liquide amenée à l'état de surfusion, on vient à introduire une parcelle du corps solide dans lequel le liquide peut se transformer, la solidification commence instantanément, et affecte une portion de la masse d'autant plus considérable que la température primitive était plus basse (*).

Enfin, ce qu'il importe de remarquer, c'est que, au moment où la solidification se produit, *la température remonte et se maintient à la température de fusion du corps*. — Cette particularité s'explique, en remarquant que les parties solidifiées abandonnent leur chaleur latente 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 quantité de chaleur latente dégagée par elle fasse remonter la température de la masse tout entière jusqu'au point de fusion. A partir de ce moment, si les corps environnants continuent à enlever de la chaleur au liquide, la solidification se poursuit lentement, la température restant toujours constante.

171. Changements de volume qui accompagnent la fusion ou la solidification. — Lorsqu'un corps liquide passe à l'état solide, le plus souvent son volume diminue, et par suite sa densité augmente; pour s'en convaincre, il suffit de remarquer, par exemple, que des fragments de soufre solide restent au fond d'une masse de soufre liquide; il en est de même de la cire, du plomb et des métaux en général. — L'eau présente une exception à cette règle : la glace flotte à la surface de l'eau liquide : la densité de la glace est donc moindre que celle de l'eau (elle en est les 0,9 environ).

(*) On obtient des résultats semblables en introduisant dans le liquide un corps solide ayant *la même forme cristalline* que celui dans lequel le liquide peut se transformer.

L'augmentation de volume de l'eau, au moment où elle se congèle, s'effectue avec une force d'expansion que mettent en évidence plusieurs expériences remarquables. — Un canon de pistolet, rempli d'eau, hermétiquement fermé par un boulon à vis, et placé dans un mélange réfrigérant, se déchire quand le liquide intérieur se congèle. Les réservoirs d'eau, les tuyaux de conduite, les corps de pompe, quelque résistants qu'ils soient, se fendent quand ils sont saisis par la gelée au moment où ils sont pleins de liquide. — Les pierres *gélives* sont des pierres poreuses qui, s'imprégnant d'eau pendant la saison des pluies, se désagrègent par l'effet de la gelée. — C'est encore à la force d'expansion de la glace qu'il faut attribuer l'action funeste des gelées sur les végétaux : bien que, dans les espèces capillaires qui constituent les tissus organisés, l'eau éprouve un retard dans son point de solidification, il suffit de quelques heures d'un froid très-intense pour amener la congélation de la sève et briser les parois de ces tissus.

172. Dissolution. — On nomme *dissolution* le phénomène qui se produit lorsqu'un liquide, mis en présence d'un corps solide, le fait passer à l'état liquide et se mélange intimement avec lui. — La dissolution, lorsqu'elle ne se complique d'aucune autre action exercée entre les corps qui sont en présence, est toujours accompagnée d'une absorption de chaleur latente, et ressemble en cela à la fusion ordinaire : par suite, dans tous les cas où il y a simplement dissolution d'un corps solide par un corps liquide, il y a *abaissement de température*. — C'est ainsi que la dissolution de l'azotate d'ammoniaque, dans un poids d'eau égal au sien, fait descendre le mélange à 10 ou 15 degrés au-dessous de zéro.

S'il arrive que le corps solide, se dissolvant d'abord dans le liquide, tende à former avec lui une combinaison chimique, ce second phénomène produit une élévation de température, et l'on n'observe alors que la superposition de ces deux effets. L'effet définitif peut donc être, soit un abaissement de température peu marqué, soit même une élévation de température. — Ainsi un grand nombre de sels anhydres, en se dissolvant dans l'eau, tendent en même temps à prendre un certain nombre d'équivalents d'eau, pour se convertir en sels hydratés : la dissolution de ces sels est souvent accompagnée d'un dégagement de chaleur.

De même, lorsqu'on fait fondre de la glace dans l'acide sulfurique, dont l'affinité pour l'eau est si considérable, on obtient des résultats très-différents, selon les proportions. — Un mélange de 1 partie d'acide sulfurique et de 4 parties de glace produit un froid qui descend jusqu'à -20° . — Un mélange de 4 parties d'acide sulfurique et de 1 partie de glace produit une élévation de température qui peut atteindre à 80° .

173. Mélanges réfrigérants. — On peut obtenir des mélanges réfrigérants en faisant simplement dissoudre des sels hydratés dans l'eau ou dans des acides étendus. — Tel est, par exemple, le mélange d'azotate

d'ammoniaque et d'eau, à poids égaux, dont il a été question plus haut (172). — Tel est aussi le mélange de 3 parties de sulfate de soude et de 2 parties d'acide chlorhydrique, qui est souvent employé pour fabriquer des glaces, des sorbets, etc. Le mélange est introduit dans un vase de fer-blanc AB (fig. 116), lequel est entouré d'une enveloppe de drap, pour le préserver du contact de l'air. Les liquides que l'on veut refroidir sont placés dans le vase métallique CD. On agite vivement, de manière à accélérer l'opération, ce qui est évidemment 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.

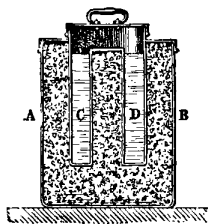


Fig. 116.

En mélangeant des matières salines avec de la glace pilée ou de la neige, on obtient des mélanges réfrigérants très-énergiques. On conçoit, en effet, que la glace absorbe de la chaleur latente pour se fondre, et le sel en absorbe encore à son tour en se dissolvant dans l'eau de fusion. — C'est ainsi qu'un mélange de 2 parties de neige à zéro et de 1 partie de sel marin à la température ordinaire peut descendre jusqu'à -21° . — Avec un mélange de 4 parties de chlorure de calcium monohydraté et de 3 parties de neige, on peut, en prenant des précautions convenables, obtenir un froid de -50° .

PASSAGE DE L'ÉTAT LIQUIDE A L'ÉTAT DE VAPEURS

174. Formation des vapeurs dans le vide. — On appelle *vapourisation* le phénomène général de la transformation des liquides en vapeurs. — Avant d'étudier les diverses formes sous lesquelles ce phénomène peut se produire, il est nécessaire de connaître les propriétés générales des vapeurs. Nous nous occuperons d'abord de la formation des vapeurs *dans le vide*.

Plusieurs tubes barométriques C, D, E, F (fig. 117) étant installés dans une même cuvette, on introduit dans l'un d'eux D, à l'aide d'une pipette recourbée, une petite quantité d'eau ; en E, de l'alcool ; en F, de l'éther. Dès que ces liquides se sont élevés jusqu'à la surface du mercure, dans la chambre barométrique, on voit le mercure s'abaisser, en même temps qu'une partie des liquides se convertit en vapeur. Les dépressions $m'p'$, $m''p''$, $m'''p'''$ sont différentes pour chacun des liquides employés : si l'on a fait en sorte d'introduire, dans chaque tube, un excès de liquide, et si la température est, par exemple, de 10° , on constate que le mercure se déprime d'environ 9 millimètres avec l'eau, 24 millimètres avec l'alcool, 236 millimètres avec l'éther. — 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 semblable à celle des gaz.

175. **Force élastique maximum des vapeurs saturantes.**

— Lorsque, en faisant l'expérience précédente, on introduit une quan-

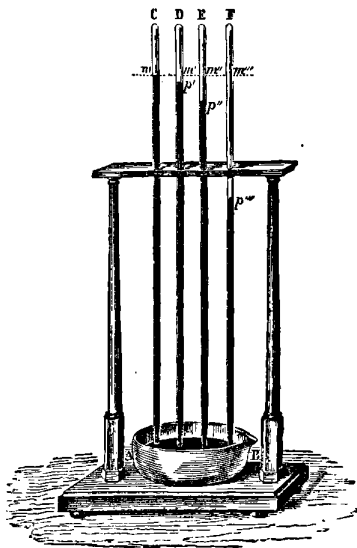


Fig. 117.

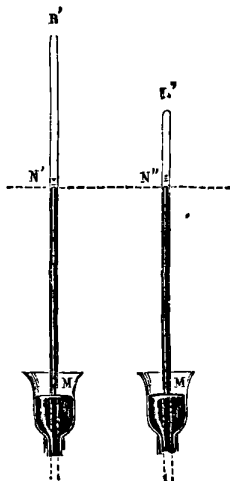


Fig. 118.

Fig. 119.

tité de liquide suffisante pour qu'il en reste *un excès* en contact avec la vapeur formée, 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 la force élastique reste constante, et qu'une partie de la vapeur se liquéfie. — L'expérience se fait à l'aide du baromètre à cuvette profonde (fig. 69). On introduit, dans la chambre bien purgée d'air, une quantité suffisante d'éther pour que, la force élastique de la vapeur ayant réduit la colonne mercurielle à la hauteur MN' (fig. 118), il reste encore une petite quantité d'éther liquide — on peut alors diminuer le volume de la vapeur,

en enfonçant le tube (*fig. 119*), sans que la hauteur du mercure MN'' soit modifiée. La vapeur avait donc acquis immédiatement un *maximum de tension* qu'on ne peut lui faire dépasser : une partie de la vapeur se condense alors au moment où l'on diminue son volume.

Inversement, si on soulève le tube de manière à accroître le volume de la vapeur, on voit encore la hauteur mercurielle rester constante : donc la force élastique de la vapeur ne diminue pas, mais une nouvelle quantité d'éther se vaporise. Il en est ainsi tant qu'il reste du liquide à convertir en vapeur, c'est-à-dire tant que la vapeur reste saturante.

Enfin, supposons qu'on puisse augmenter suffisamment l'espace occupé par la vapeur, pour qu'il ne reste plus trace de liquide ; on observe alors, en soulevant et abaissant successivement le tube, que la force élastique de la vapeur varie en raison inverse de son volume, pourvu que la diminution de volume de la vapeur ne soit jamais assez grande pour en liquéfier une partie. — Donc une vapeur *non saturante* possède une force élastique qui est soumise à la même loi que la force élastique d'un gaz proprement dit, c'est-à-dire à la loi de Mariotte.

176. Mesure de la force élastique maximum de la vapeur d'eau, entre zéro et 100 degrés, par le procédé de Dalton. — Lorsqu'on répète, à des températures diverses, les expériences décrites plus haut (174), on constate que, pour chaque liquide, le maximum de tension de chaque vapeur acquiert une valeur de plus en plus grande à mesure que la température s'élève. — La détermination de la force élastique maximum à diverses températures offre un intérêt spécial pour la *vapeur d'eau*, au point de vue des applications.

L'appareil de Dalton (*fig. 120*) permet de mesurer la tension maximum de la vapeur d'eau aux températures comprises entre zéro et 100 degrés. — Deux baromètres A et B sont installés dans une cuvette de fonte C, placée sur un fourneau F ; dans l'un A, on introduit une petite colonne d'eau, suffisante pour que la chambre soit toujours saturée de vapeur ; l'autre B est un baromètre

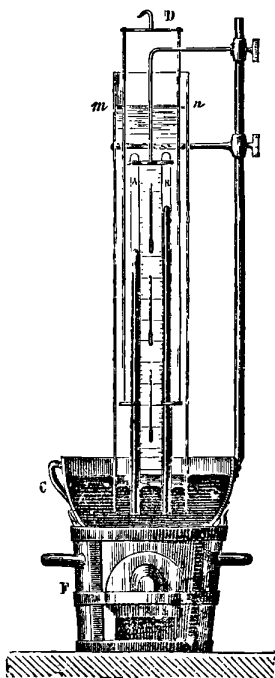


Fig. 120. — Appareil de Dalton.

sec, c'est-à-dire ne contenant que du mercure ; les deux tubes sont entourés d'un manchon de verre contenant de l'eau jusqu'en *mn*. Lorsqu'on chauffe la cuvette, la chaleur se transmet du mercure à l'eau du manchon : un agitateur, qu'on manœuvre au moyen du crochet D, sert à mêler les couches liquides pour rendre la température uniforme. En portant l'appareil à des températures graduellement croissantes et indiquées par des thermomètres fixés au milieu de l'eau, on voit le sommet de la colonne mercurielle s'abaisser dans le tube A ; pour chaque température, Dalton déterminait la dépression du mercure dans le baromètre à vapeur A, au-dessous du niveau dans le baromètre sec B, au moyen d'une règle métallique graduée. — Les hauteurs de mercure ainsi obtenues ne peuvent être prises pour mesures des valeurs de la force élastique maximum, qu'à la condition de faire subir à chacune d'elles une correction semblable à celle qui a été indiquée pour les hauteurs barométriques (150). Ces corrections sont ici indispensables, eu égard aux températures très-différentes auxquelles les mesures sont effectuées.

Les résultats fournis par ces expériences montrent que la tension maximum de la vapeur d'eau, égale à $4^{\text{mm}},6$ au voisinage de zéro, acquiert, à 100° , une valeur égale à la pression atmosphérique. A cette température, le mercure dans le baromètre à vapeur descend jusqu'au niveau de la surface du mercure de la cuvette : cet appareil ne peut donc pas servir à déterminer les tensions pour des températures supérieures à 100° , alors même qu'on remplacerait l'eau du manchon par un liquide qui pût être porté à une température plus élevée.

177. Force élastique maximum de la vapeur d'eau à des températures inférieures à zéro ou supérieures à 100 degrés. — Les expériences de Gay-Lussac ont montré que la glace émet encore, à des températures inférieures à zéro, des vapeurs ayant une tension sensible. — Pour mesurer cette tension, il installait dans une même cuvette deux baromètres, l'un sec, et l'autre contenant de l'eau : la partie supérieure de la chambre du second était un peu courbée et plongeait dans un mélange réfrigérant. La vapeur émise par l'eau liquide venait successivement se condenser en givre dans la partie refroidie : lorsqu'il ne restait plus de trace de liquide au-dessus du mercure, on constatait encore une dépression du sommet de la colonne, par rapport au niveau dans le baromètre sec, dépression qui mesurait la tension de la vapeur.

Enfin, la mesure des forces élastiques de la vapeur d'eau aux températures supérieures à 100 degrés offre, au point de vue de la marche des machines à vapeur, le plus haut intérêt. — Elle a été faite d'abord par Dulong et Arago, puis par M. Regnault, qui a repris l'ensemble des déterminations des tensions de la vapeur d'eau, de -50° à 236° , par des méthodes précises dont le détail ne peut trouver place ici.

C'est aux travaux de M. Regnault que nous empruntons les tableaux qui suivent. Le second tableau permet, en particulier, de déterminer approximativement la température à laquelle doit être chauffée une chaudière, lorsqu'elle doit fournir de la vapeur ayant telle ou telle tension, déterminée par la nature de la machine qu'elle doit mettre en mouvement.

FORCE ÉLASTIQUE MAXIMUM DE LA VAPEUR D'EAU
ENTRE $- 50^{\circ}$ ET $+ 100^{\circ}$:

Température.	Force élastique en millimèt.	Température.	Force élastique en millimèt.
$- 50^{\circ}$	0 ^{mm} ,59	40°	54 ^{mm} ,91
$- 20^{\circ}$	0 ^{mm} ,93	50°	91 ^{mm} ,98
$- 10^{\circ}$	2 ^{mm} ,09	60°	148 ^{mm} ,79
0°	4 ^{mm} ,60	70°	235 ^{mm} ,03
+ 10°	9 ^{mm} ,16	80°	354 ^{mm} ,64
20°	17 ^{mm} ,39	90°	525 ^{mm} ,45
50°	31 ^{mm} ,58	100°	760 ^{mm} ,00 (1 ^{atm})

ENTRE 100° ET 236° :

Température.	Force élastique en atmosph.	Température.	Force élastique en atmosph.
100°	1 atm.	153°	5 atm.
121°	2	181°	10
135°	3	215°	20
145°	4	236°	30

MÉLANGE DES GAZ ET DES VAPEURS

178. **La force élastique d'une vapeur, dans un espace occupé par un gaz, est égale à celle qu'elle aurait dans le vide, à la même température.** — Cette loi peut être vérifiée à l'aide de l'appareil suivant, qui est dû à Gay-Lussac. Deux tubes de verre A et B (*fig.* 121), de diamètres très-inégaux, sont mis en communication, à leur partie inférieure, par une monture métallique D ; le tube B est ouvert à sa partie supérieure, le tube A est mastiqué dans une monture C garnie d'un robinet *r*. — Les deux branches A et B ayant été d'abord remplies de mercure jusqu'au niveau du robinet *r*, on visse au-dessus de ce robinet un ballon M, garni lui-même d'un robinet *r'*, et contenant le *air sec* ou un *gaz sec* quelconque. On ouvre *r* et *r'*, et on laisse écouler du mercure par le robinet inférieur *r''* : une partie du gaz passe dans le

tube A, et, comme sa force élastique décroît, le mercure descend dans la branche B plus bas que dans la branche A. On ferme alors les robinets, on détache le ballon M, et

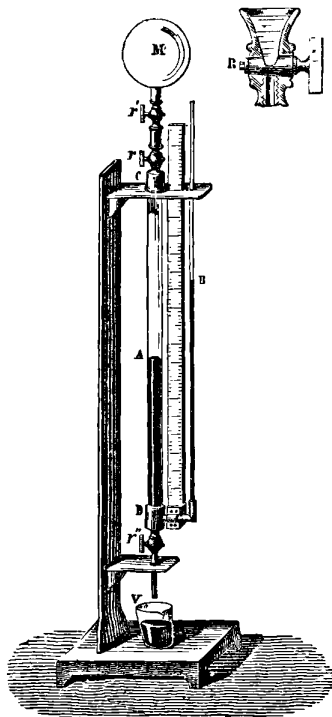


Fig. 121. — Appareil de Gay-Lussac.

on ramène le gaz à la pression atmosphérique, en versant du mercure en B jusqu'à ce que les niveaux du liquide dans les deux tubes soient dans le même plan horizontal : on note le volume V du gaz au moyen de la graduation. Cela fait, on adapte au-dessus de r un robinet à gouttes (figuré à part et à une échelle plus grande, en R), ce robinet n'est percé que d'une petite cavité hémisphérique : dans quelque position qu'on le tourne, il ne peut donc y avoir communication entre l'atmosphère et le canal qui est au-dessous de lui. On verse, dans l'entonnoir qui le surmonte, une certaine quantité du liquide qui est destiné à produire la vapeur, et on fait tourner le robinet plusieurs fois sur lui-même : à chaque tour, la cavité qu'il contient se remplit du liquide de l'entonnoir, et déverse ce liquide dans le manomètre, où il se volatilise. — Une fois la saturation atteinte, ce qu'on reconnaît à la constance du niveau du mercure,

on peut procéder à la mesure de la tension. Pour cela, on verse du mercure en B, de manière que le volume du mélange redeviene V . L'observation montre alors que la différence des niveaux, due à la force élastique de la vapeur, est précisément égale à la force élastique de cette même vapeur dans le vide, à la même température.

La même loi peut s'énoncer encore en disant que la force élastique d'un mélange de gaz et de vapeur est égale à la somme des forces élastiques que chacun d'eux posséderait, s'il occupait seul le volume total du mélange. — On peut remarquer que l'énoncé de cette loi est identique à celui de la loi sur laquelle nous nous sommes appuyés pour résoudre les problèmes relatifs aux mélanges des gaz (87).

ÉBULLITION ET ÉVAPORATION. — CONDENSATION DES VAPEURS
ET DES GAZ.

179. Distinction entre l'ébullition et l'évaporation. — Nous avons désigné sous le nom de *vaporisation* le phénomène général de la transformation d'un liquide en vapeur. — Ce phénomène peut se présenter sous deux formes différentes, qu'il est essentiel de distinguer :

On nomme *ébullition* la production de vapeur au sein même du liquide, sous forme de bulles qui viennent crever à sa surface.

On nomme *évaporation* la production insensible de vapeur à la surface libre du liquide.

180. Lois de l'ébullition. — Lorsqu'on plonge un thermomètre dans un liquide placé sur un foyer de chaleur, on constate que la température, après avoir suivi d'abord une marche ascendante, devient constante au moment où l'ébullition commence, c'est-à-dire au moment où l'on voit apparaître, au sein du liquide, des bulles de vapeur qui s'élèvent et viennent crever à la surface. — L'étude de ce phénomène a conduit aux deux lois suivantes, analogues à celles de la fusion :

1° *Pour un même liquide, placé dans les mêmes conditions, l'ébullition se produit toujours à une même température.*

2° *Cette température une fois atteinte, la vaporisation s'effectue d'une manière successive, la température restant constante pendant toute la durée du phénomène.*

C'est au moyen de l'ébullition de l'eau, sous la pression de 760^{mm}, qu'a été déterminé le point fixe supérieur du thermomètre. Le *point d'ébullition* de l'eau, sous la pression normale, est donc, par définition, la température de 100 degrés centigrades. — Les points d'ébullition des autres liquides, toujours sous la même pression, sont répartis dans l'échelle thermométrique comme l'indique le tableau suivant :

POINTS D'ÉBULLITION DE QUELQUES LIQUIDES, SOUS LA PRESSION
DE 760 MILLIMÈTRES

Acide sulfureux.	—8°	Acide nitrique ordinaire. . .	125°
Éther ordinaire.	+35°,5	Essence de térébenthine. . .	161°
Alcool absolu	78°,5	Acide sulfurique	326°
Acidenitrique monohydraté	86°	Mercure.	360°
Eau.	100°	Soufre.	440°

181. Chaleur latente de vaporisation. — Les deux lois précédentes, semblables à celles de la fusion (166), conduisent aussi à des con-

clusions semblables. — En effet, la température d'un liquide restant constante pendant tout le temps que dure l'ébullition, toute la chaleur qui lui est fournie par le foyer est employée à le transformer en vapeur, *sans élever sa température*. C'est ce qu'on exprime encore en disant que cette chaleur devient *latente*.

Nous appellerons *chaleur latente de vaporisation* d'un corps, ou simplement *chaleur de vaporisation*, la quantité de chaleur qu'absorbe 1 kilogramme de ce corps pour passer à l'état de vapeur, sans élévation de température.

182. Détermination de la chaleur latente de vaporisation de l'eau. — Le procédé employé par Despretz pour déterminer la

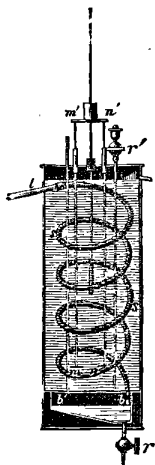


Fig. 122.

chaleur latente de la vapeur d'eau est encore une application de la méthode des mélanges. — Une cornue de verre, contenant de l'eau en ébullition, est mise en communication, par le tube *t*, avec un serpentin *ss* (fig. 122) placé au milieu d'un calorimètre de cuivre, et environné d'eau froide; la partie inférieure de ce serpentin vient déboucher dans une boîte métallique *bb'*: l'eau condensée se réunit dans cette boîte et prend la température de l'eau du calorimètre. Lorsqu'on a laissé marcher l'opération pendant un temps suffisant, on note la température finale du calorimètre; on recueille l'eau condensée, en ouvrant le robinet inférieur *r*, et on la pèse.

Soit *p* le poids du cuivre qui forme le calorimètre et le serpentin, *c* sa chaleur spécifique; *M* le poids d'eau froide qu'on a placé dans l'appareil au commencement de l'expérience, *t* sa température initiale; *T* la température de la vapeur, *P* le poids de l'eau condensée, *θ* la température finale, et *x* la chaleur latente de vaporisation de l'eau. En exprimant que la quantité de chaleur cédée par la vapeur en se condensant, et par l'eau condensée en se refroidissant jusqu'à *θ*, est égale à la quantité de chaleur gagnée par l'eau et par le calorimètre, on a l'équation

$$Px + P(T - \theta) = (M + pc)(\theta - t),$$

d'où l'on tire

$$x = \frac{(M + pc)(\theta - t) - P(T - \theta)}{P}.$$

En opérant ainsi, on trouve que la chaleur latente de vaporisation de l'eau, quand l'ébullition se fait à 100 degrés, c'est-à-dire sous la pression de 760^{mm}, est égale à 537 calories. — En d'autres termes, il faut, pour

faire passer à l'état de vapeur 1 kilogramme d'eau dont la température est déjà 100°, autant de chaleur qu'il en faudrait pour échauffer d'un degré 537 kilogrammes d'eau liquide.

183. Influence de la pression sur la température d'ébullition. — On a pris, pour définir le 100° degré du thermomètre, la température de la vapeur émise par l'eau en ébullition, sous la pression de 760 millimètres ; d'autre part, nous avons fait remarquer (176) que, à 100°, la force élastique de la vapeur d'eau saturante est égale à 760 millimètres. — Ce n'est pas là une coïncidence fortuite : il est facile de montrer, par un raisonnement simple, que, *pour un liquide quelconque, soumis à une pression quelconque, l'ébullition ne peut s'effectuer à une température inférieure à celle pour laquelle la force élastique de la vapeur est égale à la pression que supporte le liquide.* En effet, si l'on imagine une bulle de vapeur formée au sein de la masse liquide, elle ne peut 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 : par suite, une pression au moins égale à celle que supporte la surface libre du liquide.

Cette remarque fournit immédiatement l'explication de ce phénomène, d'observation journalière, qu'on exprime en disant que l'eau *chante* avant de bouillir. — Lorsqu'on chauffe, en effet, une masse d'eau par sa partie inférieure, ainsi qu'on le fait d'ordinaire, il se forme, dans les points les plus chauds, des bulles de vapeur qui commencent à s'élever, mais qui se condensent ensuite en arrivant dans des parties plus froides, où leur force élastique devient inférieure à la pression qu'elles supportent. Il se produit ainsi, au sein de la masse liquide, une succession de mouvements alternatifs, dont la périodicité donne naissance à un son. — C'est seulement quand le liquide tout entier atteint la température de 100°, que les bulles de vapeur peuvent, en s'élevant, conserver une force élastique suffisante pour arriver jusqu'à la surface.

Enfin, nous allons démontrer, par l'expérience, que toute diminution de pression à la surface d'un liquide a pour effet d'abaisser la température à laquelle il peut entrer en ébullition ; tout accroissement de pression sur la surface libre a pour effet d'abaisser la température à laquelle l'ébullition peut se produire. — Ces expériences porteront sur l'eau, en particulier.

184. Ébullition de l'eau au-dessous de 100°, sous des pressions inférieures à 760 millimètres. — Lorsqu'on place, sous le récipient de la machine pneumatique, de l'eau *tiède*, ou même de l'eau à 15 ou 20 degrés, on constate qu'il est facile d'y produire l'ébullition, en raréfiant progressivement l'air qui presse sur sa surface libre. — L'ébullition s'arrête rapidement si l'on cesse de faire fonctionner la machine, parce que la vapeur dégagée vient accroître la pression du gaz resté dans le récipient.

Une expérience facile à réaliser, et qui est due à Franklin, conduit aux mêmes conclusions. — On introduit de l'eau dans un matras de verre,

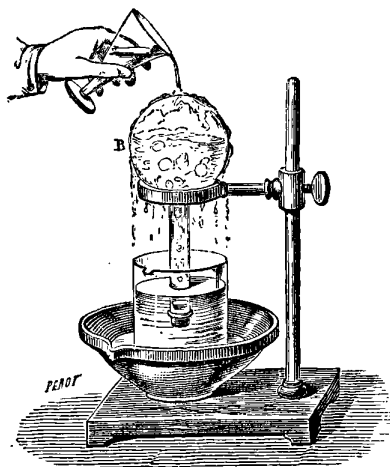


Fig. 123.

et on l'y fait bouillir vivement pendant quelques minutes. La vapeur entraîne avec elle l'air intérieur; on bouche alors le matras et on le retourne, comme l'indique la figure 123. Le liquide cesse d'abord de bouillir; mais, la surface libre ne supportant d'autre pression que celle de la vapeur, on peut déterminer de nouveau l'ébullition en versant sur le ballon de l'eau froide, qui produit une condensation partielle de la vapeur, et, par suite, une diminution de la pression supportée par

le liquide. L'expérience peut être prolongée pendant fort longtemps, si le ballon a été bien purgé d'air. — On a soin, en général, pour éviter que l'air ne rentre par les pores du bouchon, de faire plonger l'extrémité du col dans un vase contenant de l'eau.

Enfin, l'observation a montré que, sur le sommet des hautes montagnes, la pression étant moindre que 760 millimètres, l'eau entre en ébullition à des températures inférieures à 100°. C'est ainsi que, sur le mont Blanc, l'eau bout à 84° environ.

185. **Marmite de Papin.** — En comprimant de l'air dans les appareils où l'on chauffe certains liquides, on parvient, dans l'industrie, à retarder leur point d'ébullition, de manière à leur faire conserver l'état liquide à des températures beaucoup plus élevées. — La *marmite de Papin* (fig. 124) permet de réaliser ces effets dans les laboratoires. Elle se compose d'un cylindre de bronze C, contenant de l'eau et fermé par un couvercle que maintient la vis V : ce couvercle est muni d'une soupape de sûreté, consistant en un petit ajutage, sur lequel s'appuie un levier L, maintenu à l'une de ses extrémités, et chargé à l'autre d'un poids P, dont on règle la position de manière qu'il soit soulevé si la vapeur atteint une tension trop considérable. L'ébullition est impossible dans cet appareil, tant que le poids P est Omnis, si tant que la pression de la va-

peur qui se forme lentement au-dessus du liquide empêche toujours le dégagement des bulles dans la masse. Mais si l'on vient à enlever le levier, la vapeur s'échappe en un jet de plusieurs mètres, et la plus grande partie du liquide est réduite en vapeur, par une ébullition tumultueuse.

186. Influence de la présence de bulles gazeuses, au sein d'une masse liquide, pour déterminer l'ébullition.

— Lorsqu'on observe avec attention l'ébullition d'un liquide dans un vase de verre, on voit que les bulles de

vapeur se dégagent toujours de certains points de la paroi, à l'exclusion des autres. Une étude attentive du phénomène a montré que ces points sont ceux dans lesquels ont pu se loger quelques bulles d'air, soit à cause des aspérités de la surface, soit à cause de la présence de matières grasses, qui empêchent le liquide de mouiller la paroi : ces bulles forment alors une sorte d'*atmosphère intérieure*, dans laquelle se répand la vapeur qui tend à se former; le départ de chaque bulle laissant après elle une partie du mélange gazeux adhérent à la paroi, les bulles qui se dégagent ensuite continuent à partir des mêmes points.

De nombreuses expériences ont montré que cette condition, de la présence de bulles gazeuses au sein de la masse liquide, est indispensable pour que l'ébullition se produise effectivement au moment où la température est devenue assez élevée pour qu'elle soit *possible*. — Lorsqu'on place de l'eau dans un vase de verre nettoyé par des lavages successifs à l'alcool, à l'éther et à l'acide sulfurique, et lorsqu'on a soin, en outre, de purger cette eau, par une ébullition préalable, de l'air qui pouvait s'y trouver dissous, on constate qu'on ne peut plus la faire entrer en ébullition qu'à des températures très-élevées, même en diminuant la pression qui s'exerce à sa surface. Si, au contraire, on apporte, au sein de la masse liquide, une bulle d'air ou d'un gaz quelconque, en y introduisant, par exemple, une petite veche fixée à l'extrémité d'un tube de

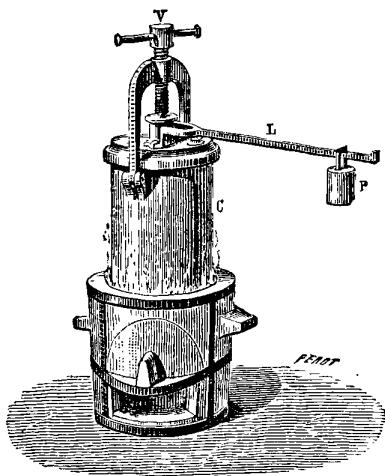


Fig. 124. — Marmite de Papin.

verre, l'ébullition s'y établit régulièrement, à la température indiquée par la théorie (183). — Les expériences de M. Gernez ont montré que ces phénomènes peuvent être facilement reproduits, dans les conditions les plus diverses, soit avec l'eau, soit avec un liquide quelconque.

Il est dès lors facile d'expliquer ce fait, d'observation journalière, que l'ébullition, lorsqu'elle a duré longtemps dans un même vase, devient de plus en plus difficile : elle se fait par soubresauts, et la température du liquide s'élève progressivement au-dessus du point d'ébullition normal. Ce résultat est dû à ce qu'une ébullition prolongée chasse successivement les gaz qui étaient d'abord restés adhérents à la paroi. — Cette explication est d'ailleurs justifiée par une ancienne expérience de Gay-Lussac. Après avoir fait bouillir longtemps de l'eau dans un vase de verre, on la retire du feu : l'ébullition cesse, bien que la température soit supérieure à 100°; si l'on projette alors de la limaille de fer dans cette eau, il se produit une vive ébullition, par l'introduction de l'air que la limaille entraîne au milieu du liquide.

187. Influence des substances dissoutes, sur la température d'ébullition. — La présence de corps en dissolution fait subir à la température d'ébullition des variations parfois très-considérables : c'est ainsi que l'eau saturée de sel marin ne bout qu'à 108 degrés; que l'eau chargée de chlorure de calcium peut ne bouillir qu'à 180 degrés.

Quoi qu'il en soit, quel que soit l'état de la paroi du vase, quelles que soient les substances en dissolution dans le liquide, la température *de la vapeur elle-même*, à une certaine distance de la surface libre du liquide, est toujours la même, pourvu que la pression soit constante. — C'est pourquoi il est indispensable, dans la détermination du 100° degré des thermomètres (113), de placer le réservoir, non pas dans le liquide, mais dans la vapeur même, à une petite distance de la surface liquide.

188. Évaporation. — Nous avons appelé *évaporation* la production insensible de vapeur à la surface libre d'un liquide. Quoique la vapeur se forme toujours avec d'autant plus d'abondance que la température du liquide est plus élevée, cependant le phénomène se produit à toute température.

L'expérience a montré aussi que, toutes choses égales d'ailleurs, l'évaporation est d'autant plus rapide que l'espace environnant est plus éloigné de la saturation; par suite, l'agitation de l'air à la surface d'un liquide tend à activer l'évaporation, en enlevant les couches saturées et les remplaçant par d'autres. — Ainsi s'explique l'efficacité des courants d'air, pour sécher rapidement les étoffes humides : ainsi s'explique encore, pour nos contrées, l'action des vents du nord qui, même pendant l'hiver, séchent plus vite la terre que ne le font les chaleurs de l'été.

189. Froid produit par l'évaporation. — L'abaissement de température qu'on observe toujours quand un liquide s'évapore prouve

qu'il y a ici, comme dans le phénomène de l'ébullition, absorption d'une certaine quantité de chaleur latente, laquelle est employée à effectuer la transformation d'une partie du liquide en vapeur. Cette chaleur est empruntée au liquide lui-même et aux corps avec lesquels il est en contact ; de là un refroidissement, parfois assez considérable.

Vient-on, par exemple, à environner de coton le réservoir d'un thermomètre, et à le mouiller avec de l'éther, on voit l'évaporation abaisser rapidement la température du thermomètre au-dessous de zéro.

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. 125), 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 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. — Ce procédé a été appliqué récemment, par M. Éd. Carré, à la construction d'un appareil qui permet de congeler assez rapidement l'eau contenue dans des carafes où l'on fait le vide au moyen d'une pompe analogue à la machine pneumatique.

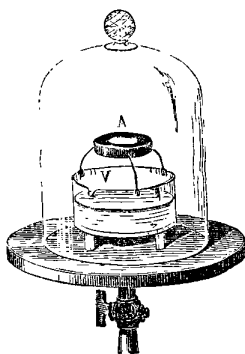


Fig. 125.

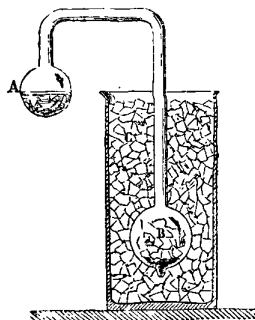


Fig. 126.

Le *cryophore de Wollaston* (fig. 126) permet de produire la congélation de l'eau dans le vide, 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 : la boule B est plongée dans un mélange réfrigérant. En construisant l'appareil, on l'a purgé d'air, en faisant bouillir pendant

quelque temps l'eau intérieure avant de fermer la pointe effilée qui termine la boule B. — La différence de température qui existe entre A et B produit une distillation de l'eau, de la boule A vers la boule B : il y a donc une évaporation rapide de l'eau en A, et, au bout de quelques minutes, on constate que le liquide qui reste en A est entièrement congelé.

LIQUÉFACTION DES VAPEURS ET DES GAZ.

190. **Condensation des vapeurs. — Distillation.** — On réserve ordinairement le nom de *vapeurs*, aux fluides élastiques provenant de la vaporisation des substances qui sont solides ou liquides aux températures ordinaires Il suffit, pour condenser ces vapeurs, de les faire

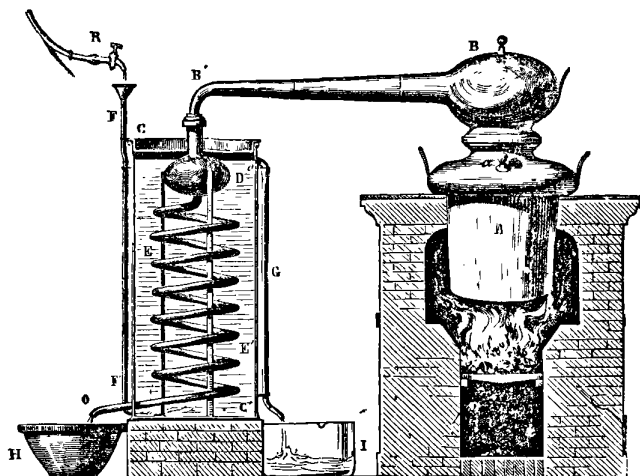


Fig. 127. — Alambic :

rendre dans des appareils environnés d'eau froide. — C'est sur ce principe qu'est fondée la *distillation*, qui sert, en général, à purifier les liquides volatils des matières étrangères avec lesquelles ils peuvent être mélangés.

Pour distiller de petites quantités de liquides, on emploie simplement une cornue de verre, dont le col vient s'engager dans le goulot d'un ballon entouré d'eau froide. Le liquide à distiller étant introduit dans la cornue, on l'amène à l'ébullition en plaçant la cornue sur un fourneau ; les vapeurs viennent se condenser dans le ballon.

191. **Alambic.** — L'appareil qui sert à la distillation de l'eau, dans les laboratoires, porte le nom d'*alambic* (fig. 127). — L'alambic se compose : 1° d'une *chaudière* A dans laquelle on chauffe l'eau qu'on fera bouillir

sur un fourneau; 2^o 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 arrive dans ce tube, dont les parois sont en contact extérieurement avec l'eau froide que contient le réservoir; l'eau provenant de la condensation s'écoule par l'extrémité O. — En se liquéfiant, la vapeur abandonne au condenseur sa chaleur latente (181); la température de l'eau environnante s'élève donc rapidement, et il est essentiel de la renouveler sans cesse. Pour cela, on a adapté sur le côté du réservoir un tube à entonnoir FF', qui amène au fond du vase l'eau froide fournie par un robinet R; l'eau qui s'échauffe gagne la partie supérieure, et s'écoule par l'orifice *o* et le tube G.

L'eau de source ou de rivière, que l'on introduit dans la chaudière de l'alambic, contient toujours en dissolution diverses matières étrangères; la vapeur qui s'en dégage est, au contraire, formée d'eau pure, et les matières étrangères restent dans la chaudière.

192. **Liquéfaction des gaz.** — Après avoir constaté que les vapeurs non saturantes se comportent comme des gaz, les physiciens furent conduits à penser que les corps généralement désignés sous le nom de *gaz* ne sont autre chose que des vapeurs plus ou moins éloignées de leur point de liquéfaction. Dès lors, on entreprit diverses séries d'expériences, portant successivement sur chacun des gaz étudiés en Chimie, et destinées à obtenir la liquéfaction de ces gaz. — Les moyens employés furent: d'une part, la *compression*, puisque la diminution progressive du volume a pour effet de rapprocher les vapeurs de la saturation; d'autre part, le *refroidissement*, puisque la tension maximum des vapeurs diminue avec la température. Enfin, pour certains gaz, on employa simultanément la compression et le refroidissement.

Ces diverses expériences, et en particulier celles de Faraday, conduisirent à la liquéfaction de la plupart des gaz connus. Un certain nombre d'entre eux purent même être obtenus à l'état solide, par un abaissement de température suffisamment considérable.

Cependant, jusqu'à la fin de l'année 1877, six gaz avaient résisté à toutes les tentatives faites pour les liquéfier, et avaient été désignés sous le nom de *gaz permanents*: parmi eux, se trouvaient l'oxygène, l'azote et l'hydrogène. — Au mois de décembre 1877, M. Cailletet est parvenu à liquéfier ces gaz eux-mêmes, en sorte qu'il n'y a plus aujourd'hui de gaz permanent (*).

On peut donc dire, d'une manière absolument générale, qu'il n'existe aucune différence réelle entre les gaz et les vapeurs: *tous les gaz* peuvent, comme les vapeurs, reprendre l'état liquide, dans des conditions convenables de pression et de température.

(*) M. Raoul Pictet, de Genève, sans connaître les expériences de M. Cailletet, a également liquéfié l'oxygène et l'hydrogène, à peu près à la même époque.

CHAPITRE IV

NOTIONS GÉNÉRALES SUR LES MACHINES A VAPEUR

193. **Emploi de la vapeur pour produire le mouvement.**

— On désigne sous le nom général de *machines à vapeur*, des machines dont le mouvement est produit par la force élastique des vapeurs. Malgré les tentatives faites, à diverses reprises, pour utiliser les vapeurs de divers liquides, la *vapeur d'eau* est toujours, de beaucoup, la plus généralement employée. C'est seulement des machines à vapeur d'eau qu'il sera ici question. — La force élastique de la vapeur d'eau croît d'ailleurs très-rapidement avec la température, puisque, de 100 degrés à 180 degrés, la force élastique de la vapeur d'eau saturée croît de 1 atmosphère à 10 atmosphères (voir le second tableau de la page 131). — Nous indiquerons d'abord les diverses parties d'une machine type, qui n'est autre que celle qui est connue dans l'industrie sous le nom de *machine de Watt*.

La vapeur d'eau, produite dans une chaudière, est amenée, par des conduits, dans un cylindre A (fig. 128), dans lequel peut se mouvoir un piston. Supposons que la vapeur arrive *alternativement* en dessous et en dessus du piston; supposons, en outre, que, à l'instant où la vapeur arrive au-dessous du piston, celle qui était primitivement en dessus puisse s'échapper, et réciproquement. La force élastique de la vapeur imprimera au piston un mouvement rectiligne alternatif: on cherche d'ordinaire à

transformer ce mouvement en un mouvement circulaire continu, imprimé à un arbre qui met lui-même en mouvement tous les organes de l'usine. — Cette transformation s'effectue comme il suit:

La tige qui est fixée au piston, glissant à frottement doux dans une boîte à cuir située à l'extrémité supérieure du cylindre, vient se lier à l'extrémité d'un *balancier* DF mobile autour du point E; cette liaison se fait par l'intermédiaire d'un parallélogramme de

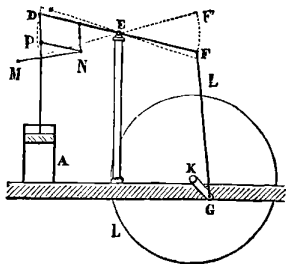


Fig. 128.

tiges métalliques, dit *parallélogramme articulé*, et destiné à éviter les flexions alternatives qu'éprouverait la tige, pendant le mouvement du balan-

cier, si elle était articulée directement elle-même au point D. Les quatre côtés de ce parallélogramme sont, en effet, articulés entre eux à leurs extrémités, en sorte que leurs angles puissent varier sans que les longueurs des côtés varient : le sommet N, opposé à l'extrémité D du balancier, est relié à un point fixe M par une tige rigide MN, qui est mobile autour de M, en sorte que N est assujéti à décrire un arc de cercle autour du point M ; ce mode de liaison, imaginé par Watt, a pour résultat de faire décrire une ligne *sensiblement droite* à l'extrémité P de la tige du piston, l'extrémité D du balancier décrivant un arc de cercle. Le mouvement de va-et-vient du piston fait décrire au point F l'arc de cercle FF', alternativement dans un sens et dans l'autre : le point F est réuni à l'extrémité d'une *manivelle* KG par l'intermédiaire d'une *bielle* FG, et l'on voit sans peine que 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, qui est entraîné dans le mouvement et qui sert à le régulariser.

Lorsque la vapeur arrive, comme nous l'avons supposé, alternativement d'un côté et de l'autre du piston, la machine est dite à *double effet*.

194. **Emploi du condenseur.** — Pour comprendre l'utilité du condenseur, examinons d'abord le jeu d'une machine *sans condenseur*.

Supposons que, à un moment donné, la vapeur arrive dans le cylindre au-dessous du piston, par le tube *t* (fig. 129) ; à ce même instant, l'espace C, au-dessus du piston, doit être mis en communication avec l'atmosphère par le tube *t'*, afin que la vapeur primitivement arrivée dans cet espace puisse s'échapper librement. Dès lors, le piston est sollicité de bas en haut par une force égale à la différence des pressions exercées sur ses deux faces, d'un côté par la force élastique de la vapeur, de l'autre par la pression atmosphérique. — Quand le piston arrive au haut de sa course, une disposition qui sera décrite plus loin intervertit les communications : la vapeur de la chaudière arrive maintenant par *t'* ; celle qui était contenue en D s'échappe par *t* dans l'atmosphère ; le piston est donc sollicité de haut en bas par une force égale en grandeur à la précédente. — En laissant ainsi échapper la vapeur dans l'atmosphère après qu'elle a produit son effet, on fait donc intervenir la pression atmosphérique comme une force résistante, diminuant à chaque instant la force motrice qui agit sur le piston.

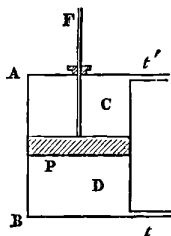


Fig. 129.

Cette perte est presque entièrement supprimée par l'emploi du *condenseur*, qui est dû à Watt. — Le condenseur est une enveloppe métallique

fermée, et vide d'air, dans laquelle pénètre, sous forme de pluie, un jet continu d'eau froide : quand la vapeur de la chaudière arrive par le tube *t*, le tube *u* est mis en communication, non plus avec l'atmosphère, mais avec le condenseur. Or, si la température moyenne dans le condenseur est 45°, la force élastique de la vapeur d'eau y sera seulement d'un dixième d'atmosphère environ (voir le premier tableau de la page 129). On voit donc que la vapeur contenue dans l'espace C, sous une pression primitivement égale à celle de la chaudière, afflue dans le condenseur où elle se liquéfie, jusqu'à ce que la tension dans cet espace ne soit plus que d'un dixième d'atmosphère. Le phénomène de l'abaissement de la pression est d'ailleurs tellement instantané, qu'on peut considérer la force résistante comme étant toujours exprimée par une pression d'un dixième d'atmosphère, c'est-à-dire par *la force élastique de la vapeur d'eau correspondant à la température des parties les plus froides de l'espace où elle est contenue*. C'est le principe connu sous le nom de *principe de Watt*. — L'utilité du condenseur est donc manifeste.

195. **Emploi de la détente.** — Lorsque le cylindre est mis en communication avec la chaudière par l'une de ses extrémités pendant *toute la course du piston*, on laisse échapper, à la fin de la course, un volume de vapeur égal à celui du cylindre, et avec une tension égale à celle qui règne dans la chaudière. — Watt a eu l'idée de ne laisser arriver la vapeur de la chaudière dans le cylindre que pendant *une partie de la course* du piston : en interceptant ensuite le tube d'arrivée, on laisse cette vapeur augmenter de volume, *se détendre* ; sa force élastique va alors en diminuant ; mais, pourvu que l'accroissement de volume ne soit pas trop considérable, elle continue toujours à agir comme une force motrice, supérieure à la pression qui s'exerce sur l'autre face du piston.

L'économie que l'on trouve dans l'emploi de la *détente* peut se calculer d'une manière rigoureuse : nous nous contenterons de faire concevoir que cette économie est réelle. — Supposons que, dans une machine munie d'un condenseur, la force élastique de la vapeur dans la chaudière soit de 2 atmosphères, et qu'on laisse arriver la vapeur dans le cylindre pendant *la première moitié* seulement de la course du piston. On ne dépensera, pour un même nombre de coups de piston, que la moitié de la vapeur qu'on aurait dépensée sans détente : mais, 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 toutes les premières moitiés des courses du piston ; mais, en outre, pendant toutes les secondes moitiés des courses, le piston sera encore soumis à l'action d'une force motrice variant entre 2 atmosphères et 1 atmosphère, par conséquent toujours supérieure à la force résistante qui s'exerce sur l'autre face. Il y aura donc, pour une même dépense de vapeur, augmentation de l'effet produit.

196. **Machines à basse pression, à moyenne pression, et à haute pression.** — Au point de vue de la valeur de la tension sous laquelle la vapeur arrive 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 ces machines, il y a généralement avantage à supprimer le condenseur, parce que, en perdant une atmosphère comme force motrice, on évite la dépense de travail nécessaire pour renouveler incessamment l'eau injectée dans le condenseur, dépense qui serait ici considérable.

197. **Distribution de la vapeur dans le cylindre. Tiroir.**

— Les communications du cylindre avec la chaudière doivent être établies, comme on l'a vu, de façon que, l'une des extrémités du cylindre communiquant avec la chaudière, l'autre communique avec le condenseur ou avec l'atmosphère : en outre, ces communications doivent être alternativement interverties à chaque course du piston dans un sens ou dans l'autre. — Ces conditions sont simultanément réalisées à l'aide d'un dispositif extrêmement ingénieux, qui porte le nom de *tiroir*.

La vapeur arrive de la chaudière, par le tube F, dans une capacité FG (fig. 150), fixée sur la partie latérale du cylindre : c'est la *boîte à vapeur*.

Dans l'épaisseur de la paroi du cylindre sur laquelle cette boîte est appliquée, sont creusés deux conduits aA, bB, qui viennent aboutir chacun à l'une des extrémités du cylindre. Enfin, dans cette même paroi, est creusé un autre conduit, dont la figure ne représente que l'entrée K, et qui va aboutir dans le condenseur.

Les centres des orifices a, K, b

de ces trois conduits sont situés sur une même génératrice du cylindre. Dans la *boîte à vapeur*, est placé le *tiroir mn*, mis en mouvement par une tige E qui passe dans une boîte à étoupes et qui est mue elle-même par la machine : cette pièce, dont les figures ci-dessus n'indiquent que la section, a exactement la forme de nos tiroirs ordinaires, c'est-à-dire qu'elle peut être

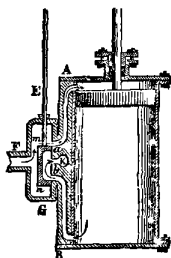


Fig. 150.

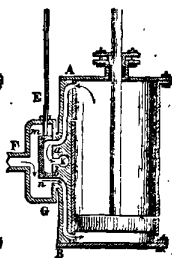


Fig. 151.

comparée à une boîte rectangulaire qui manquerait de l'une de ses faces, de celle précisément qui s'appliquerait sur la surface extérieure du cylindre. — Le mouvement de la tige E est réglé de façon que, quand le piston est au haut de sa course, le tiroir se place dans la position indiquée par la figure 130 : la vapeur peut passer de la boîte dans la partie supérieure du cylindre, par le conduit aA dont l'orifice a est libre : en même temps, la vapeur qui se trouvait au dessous du piston peut s'échapper par le conduit Bb dans l'intérieur du tiroir, et de là, par le conduit K, dans le condenseur. Le piston se met donc en mouvement de bas en haut. — Quand le piston est arrivé au bas de sa course, la tige E amène le tiroir dans la position indiquée par la figure 131 : la vapeur passe alors de la boîte à vapeur dans le conduit bB et dans la partie inférieure du cylindre ; et la vapeur qui se trouvait au-dessus du piston peut s'échapper par le conduit Aa dans le tiroir, et de là, par le conduit K, 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.

198. **Description des pièces essentielles de la machine de Watt.** — La machine imaginée par Watt est une machine à double effet et à condenseur : la figure 132 en représente les pièces essentielles, pour la plupart en coupe verticale : le balancier, placé à la partie supérieure, n'a pu être indiqué sur cette figure.

La vapeur, arrivant de la chaudière par a , pénètre dans la boîte à vapeur et, selon la position du tiroir, elle se rend au-dessus ou au-dessous du piston dans le cylindre : dans la position indiquée par la figure, elle agit sur la surface supérieure du piston.

Le mouvement du piston B se transmet, par la tige C, à un balancier placé comme l'indique la figure théorique 128. L'autre extrémité de ce balancier est articulée avec la bielle G (fig. 132), laquelle imprime ainsi un mouvement de rotation continu à la manivelle HK, et à l'arbre K sur lequel la manivelle est fixée et qui porte le volant L.

Le condenseur c est mis en communication alternativement avec les deux extrémités du cylindre A, par l'intermédiaire du tiroir et du conduit ménagé dans l'épaisseur de la paroi du cylindre ; ce conduit, situé en arrière du plan de la figure, vient s'ouvrir dans le condenseur en d ; un jet continu d'eau froide, puisée dans un réservoir RR, arrive dans le condenseur par l'excès de la pression atmosphérique sur celle qui règne dans le condenseur.

Les mouvements du tiroir, qui doivent concorder avec ceux du piston B, sont produits par la machine elle-même. Pour cela, l'arbre K porte un

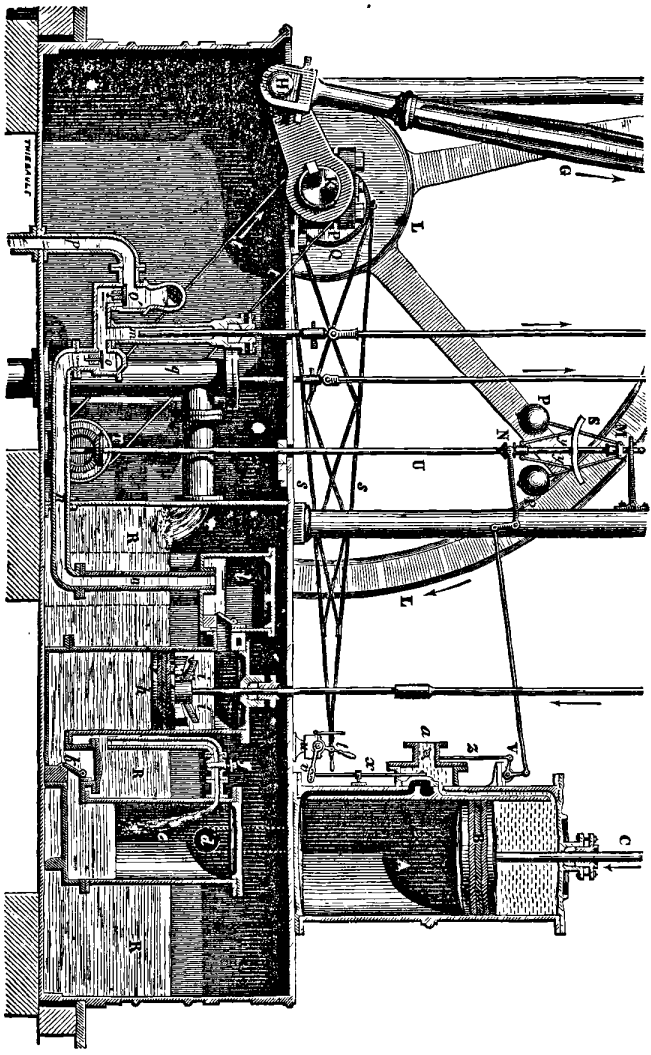


Fig. 132. - Machine de Watt.

disque circulaire P, monté excentriquement, c'est-à-dire dont le centre n'est pas situé sur l'axe de l'arbre : le contour de ce disque est embrassé par un anneau Q, dans lequel il peut glisser ; l'anneau lui-même est relié aux tiges métalliques s, s, qui viennent s'adapter à l'extrémité t du levier coudé tuv ; enfin, au point v vient s'articuler la tige verticale x, qui porte le tiroir à sa partie supérieure. Il est aisé de voir que, pendant le mouvement de l'arbre K, les points de l'excentrique qui sont le plus éloignés de l'axe sont reportés, tantôt vers la droite de l'axe K, comme l'indique la figure, tantôt vers la gauche, quand l'arbre a tourné d'un demi-tour : de là résulte que l'anneau Q et les tringles s sont reportés successivement vers la droite et vers la gauche. Or, si l'extrémité t du levier coudé tuv est poussée le plus possible à droite, comme l'indique la figure, son extrémité v est située le plus bas possible, et il en est de même de la tige verticale x et du tiroir ; au contraire, quand l'arbre aura fait un demi-tour, t sera le plus possible à gauche, v le plus haut possible, et il en sera de même de la tige x et du tiroir. On voit donc que, à chaque allée et venue de B, correspond une allée et venue du tiroir, en sorte que les rapports de position, une fois convenablement établis, sont indéfiniment conservés.

La pompe h, située immédiatement à gauche du condenseur, sert à aspirer l'eau chaude qui s'y accumulerait, en même temps que l'air qui se dégage constamment de l'eau aérée venant de R : de là, le nom de *pompe à air*. Le piston h de cette pompe est mis en mouvement par une longue tige fixée au balancier : l'eau qui a franchi les soupapes i, i, et qui est élevée par le piston h dans son mouvement ascensionnel, est déversée dans un petit réservoir l. — Une partie de cette eau chaude est aspirée par la *pompe alimentaire m*, dont le piston est également mis en mouvement par le balancier : l'eau y arrive par un tuyau nn, soulève la soupape o et remplit le corps de pompe m ; puis, lorsque le piston m descend, elle soulève l'autre soupape o', et est refoulée par le tuyau p, jusque dans la chaudière. On a ainsi l'avantage d'employer, pour alimenter la chaudière, de l'eau déjà échauffée. — On utilise encore le mouvement du balancier pour faire fonctionner une troisième pompe q, qui va puiser de l'eau froide dans un puits ou dans un cours d'eau, et qui maintient le réservoir R constamment rempli.

Enfin, le *régulateur à force centrifuge S* empêche le mouvement de la machine de s'accélérer ou de se ralentir quand il survient des variations dans la grandeur des résistances qu'elle doit vaincre. Le mouvement de rotation de l'arbre K est transmis, par la courroie sans fin tt, aux roues d'angle T et à la tige U qui porte le régulateur : celui-ci se compose de deux boules pesantes P, P, fixées à l'extrémité de deux tiges métalliques articulées en M à un point fixe de la tige U ; lorsque la vitesse de rotation augmente, les deux boules tendent à s'écarter de la tige : elles soulèvent,

par l'intermédiaire des deux tiges y, y , la bague N qui glisse librement le long de U; alors, le système de leviers coudés qui commence en N et finit en V soulève la petite tige verticale z , et tend à fermer la soupape qui se trouve dans le tuyau d'arrivée de la vapeur a ; au contraire, quand le mouvement de la machine se ralentit, le poids des boules P tend à les rapprocher de la tige U, et, la soupape du tuyau a s'ouvrant davantage, la vapeur arrive en quantité plus considérable.

199. **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*, lorsqu'elle est capable d'effectuer un travail de 75 kilogrammètres par seconde, c'est-à-dire, par exemple, d'élever, par seconde, 75 kilogrammes à un mètre de hauteur. Une machine vaut 2, 3 chevaux, lorsqu'elle est capable d'effectuer, par seconde, un travail de 2, 3 fois 75 kilogrammètres.

Cette unité, qu'on nomme le *cheval-vapeur*, diffère en réalité beaucoup de la puissance d'un cheval ordinaire. En d'autres termes, la puissance d'une machine, en chevaux-vapeur, ne représente nullement le nombre de chevaux qu'il faudrait employer effectivement pour remplacer la machine elle-même. — En effet, un cheval attelé à un manège, de manière que sa force de traction soit employée à imprimer un mouvement de rotation à un arbre, effectuée, pendant les heures où il est attelé, un travail qui ne dépasse pas 42 kilogrammètres par seconde; en sorte que, pendant ce temps, sa puissance est à celle du cheval-vapeur dans un rapport qui est seulement un peu supérieur à $\frac{1}{2}$. Mais, si l'on tient compte du repos qu'il est indispensable de lui laisser prendre, et qu'on calcule son travail moyen en divisant son travail journalier par le nombre de secondes du jour tout entier, on trouve que sa puissance est à celle du cheval-vapeur dans le rapport $\frac{1}{5,5}$, c'est-à-dire que, pour faire fonctionner d'une manière continue une machine ayant une puissance de 10 chevaux-vapeur, il faudrait employer 55 chevaux ordinaires, fonctionnant d'une manière alternative.

CHAPITRE V

HYGROMÉTRIE

200. **Définitions.** — On nomme *état hygrométrique* de l'air, ou *fraction de saturation*, à un moment déterminé, le rapport entre la tension

actuelle de la vapeur d'eau dans l'atmosphère et la tension maximum à la même température. Si l'on désigne par f la force élastique de la vapeur d'eau dans l'air à un instant donné, par F la force élastique maximum à la même température, l'état hygrométrique sera le quotient $\frac{f}{F}$. — C'est ce rapport qu'il importe de connaître, bien plutôt que la tension même de la vapeur d'eau dans l'air, au moment considéré, pour savoir si la vapeur est voisine ou non de son point de liquéfaction, c'est-à-dire si l'air est *humide* ou *sec*.

Les *hygromètres* sont des instruments destinés à fournir, à chaque instant, la valeur de l'état hygrométrique.

201. **Hygromètre à cheveu.** — Tout le monde connaît ces petits instruments, d'une construction grossière, qui servent à prévoir la pluie ou le beau temps, et qui représentent, tantôt un moine dont le capuchon vient abriter la tête quand le temps est à la pluie, tantôt un petit personnage qui rentre sous un abri, etc. Dans ces instruments, le mouvement de la pièce mobile est produit par une corde à boyau, qui se détord plus ou moins selon qu'elle est plus ou moins humide. — La plupart des substances organiques ont la propriété d'absorber l'humidité de l'air, et de s'allonger d'autant plus que l'atmosphère est plus humide : d'après cette remarque, H. B. de Saussure a construit un hygromètre où l'état hygrométrique de l'air est accusé par les variations de longueur d'un cheveu assujéti d'une manière convenable.

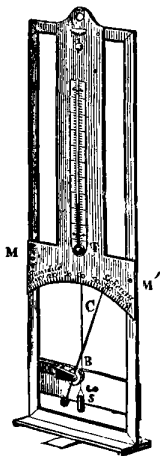


Fig. 153.

Hygromètre à cheveu.

Le cheveu est fixé en A (fig. 153), à une pièce située derrière le cadre métallique de l'appareil : en B, il vient s'attacher sur l'une des gorges d'une double poulie, qui porte une aiguille légère C, parcourant un cadran divisé MM'. Sur l'autre gorge de la poulie s'enroule, dans le même sens, un fil de soie tendu par un petit poids s. Le cheveu a été débarrassé de la matière grasse dont il était enduit, par une immersion d'une demi-heure dans de l'eau bouillante renfermant environ un centième de carbonate de soude : il a été ensuite lavé à l'eau pure, et séché.

Pour graduer l'instrument, on détermine d'abord deux points fixes : 1° le centième degré, ou point d'humidité extrême ; 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 à sa partie inférieure, et dont les parois elles-mêmes ont été mouillées ; 2° le zéro, ou point de l'air d'une température

l'aiguille dans un vase contenant une couche d'acide sulfurique concentré, qui absorbe l'humidité de l'air. — L'espace compris entre ces deux points fixes est ensuite divisé en 100 parties égales, qui sont les *degrés* de l'hygromètre.

Mais cette graduation ne suffit pas pour faire connaître immédiatement l'état hygrométrique des milieux où l'instrument se trouvera placé : ainsi, quand l'hygromètre marque 50°, il n'en résulte nullement, comme on va le voir, que l'état hygrométrique soit égal à 0,50 ou $\frac{1}{2}$. — Gay-Lussac a employé, pour construire une table fournissant les valeurs de l'état hygrométrique qui correspondent aux degrés de l'instrument, la méthode suivante. Après avoir préparé un certain nombre de mélanges d'acide sulfurique et d'eau, dans des proportions diverses, il mesurait la tension de la vapeur émise par chacun de ces mélanges, en les introduisant dans des tubes barométriques disposés comme ceux de la figure 117 : l'expérience montre que cette tension est toujours moindre que celle de la vapeur émise par l'eau pure, à la même température, et d'autant moindre que l'acide sulfurique est en plus forte proportion. L'hygromètre était ensuite introduit successivement dans des vases contenant, à leur partie inférieure, une petite couche de chacun de ces mélanges : on notait, à chaque fois, le degré marqué par l'aiguille et la température ambiante. Or, dans chaque cas, on connaissait, comme nous venons de l'indiquer, la tension actuelle de la vapeur f ; d'autre part, les tables construites pour la vapeur émise par l'eau pure (p. 131) donnaient la tension maximum F correspondante à la même température : on pouvait donc calculer la valeur du quotient $\frac{f}{F}$ qui représentait l'état hygrométrique.

Les expériences de Gay-Lussac ont été faites à la température de 10° : voici quelques résultats, extraits de la table construite par lui, pour l'instrument sur lequel il opérait :

Degrés de l'hygromètre.	États hygrométriques.	Degrés de l'hygromètre.	États hygrométriques.
0.	0,000	60.	0,363
10.	0,046	70.	0,472
20.	0,094	80.	0,712
30.	0,148	90.	0,791
40.	0,208	100.	1,000
50.	0,278		

On voit, par cette table, que l'état hygrométrique correspondant au 50° degré, bien loin d'être exactement 0,50, est seulement égal à environ 0,28 : ces expériences sont donc indispensables pour arriver à la connaissance de l'état hygrométrique, par les indications d'instruments de ce

genre. — Il est d'ailleurs nécessaire de construire une table de graduations spéciale pour chaque instrument, si l'on veut obtenir des résultats précis : il est très-rare que deux instruments différents, placés dans des conditions identiques, autres que celles qui ont servi à déterminer les points fixes, fournissent une même indication.

202. **Problème.** — *Étant donné l'état hygrométrique m de l'air, à un moment déterminé, et la température t , calculer le poids de vapeur d'eau contenu dans un mètre cube d'air. — On sait que la densité de la vapeur d'eau, par rapport à l'air, est 0,622.*

L'état hygrométrique donné m représente le rapport $\frac{f}{F}$ de la force élastique actuelle de la vapeur d'eau à la force élastique maximum, pour la même température t ; or les tables de tension font connaître la force élastique maximum F pour la température t ; donc f est connu, puisqu'on a $f = mF$. — Pour avoir le poids d'un mètre cube de vapeur d'eau, sous la pression f et à la température t , nous raisonnerons comme s'il s'agissait d'un gaz, et nous chercherons d'abord le poids du même volume d'air, dans les mêmes conditions de pression et de température. Or le poids d'un litre d'air à 0° et sous la pression de 760 millimètres étant 1^{er},293, le poids d'un mètre cube serait 1293 grammes; par suite, le poids d'un mètre cube d'air, sous la pression f et la température t , est

$$1293^{\text{er}} \cdot \frac{f}{760} \cdot \frac{1}{1 + \alpha t}$$

D'autre part, la densité de la vapeur d'eau par rapport à l'air étant 0,622, on aura le poids d'un mètre cube de vapeur dans les conditions données, en multipliant le poids de l'air par 0,622. Donc, en remplaçant f par mF , et α par sa valeur connue 0,00367, il vient

$$p = 1293^{\text{er}} \cdot \frac{mF}{760} \cdot \frac{1}{1 + 0,00367 t} \cdot 0,622.$$

ROSÉE ET MÉTÉORES AQUEUX

203. **Formation de la rosée.** — On donne le nom de *rosée* à ces gouttelettes d'eau qui apparaissent, pendant les nuits sercines, sur les corps placés en plein air.

Après une journée chaude, quand le soleil a disparu, la surface du sol échauffé continue à rayonner vers les espaces célestes, et sa température s'abaisse : l'air qui constitue l'atmosphère rayonne aussi de la chaleur; mais, comme il a un pouvoir émissif moindre, son abaissement de température est moins considérable. Donc, si la vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère n'a pas atteint le point de saturation, les corps

qui couvrent le sol peuvent arriver à se couvrir de gouttelettes d'eau condensée, sans que l'atmosphère perde sa transparence.

Ces remarques faites, il est facile de s'expliquer l'influence des principales circonstances qui favorisent ou empêchent le dépôt de rosée :

1° La présence des nuages, le voisinage d'arbres ou d'édifices élevés qui masquent une partie du ciel, diminuent la quantité de rosée, ou même l'empêchent de se former. — Dans ce cas, en effet, l'échange de chaleur qui s'effectue, entre le sol et les corps qui sont à une température voisine, ne produit plus qu'un refroidissement peu intense.

2° Un vent léger favorise la formation de la rosée ; un vent violent rend le dépôt impossible. — On conçoit, en effet, qu'un vent léger renouvelle lentement les couches d'air, qui apportent successivement la vapeur d'eau qu'elles contiennent ; si, en même temps, ce vent est humide, comme l'est en France le vent qui vient du sud-ouest, la rosée sera abondante. Au contraire, un vent violent réchauffe les corps par son contact, et ne laisse pas à l'air le temps de se refroidir.

3° Les corps de diverses natures se couvrent de quantités de rosée très-inégales. — Les feuilles, le bois, la terre, qui ont un grand pouvoir émissif, et qui sont des corps très-peu conducteurs, sont ceux où la rosée se forme le plus abondamment. Sur les pierres, les métaux polis, qui ont un pouvoir émissif faible et qui sont des corps conducteurs, il ne s'en forme que des quantités beaucoup moindres.

204. **Givre.** — Le *givre*, ou gelée blanche, est une petite couche de glace spongieuse, qui se forme dans les mêmes circonstances que la rosée, par un abaissement de température encore plus considérable. La vapeur d'eau se congèle alors, dans l'air lui-même, au voisinage des corps refroidis ; elle vient se déposer sur eux en formant une sorte de neige.

205. **Brouillards et nuages.** — Les *brouillards* sont produits par des gouttelettes d'eau, qui proviennent de la condensation de la vapeur dans l'air, et qui en altèrent plus ou moins la transparence. — Les *nuages* ne sont que des brouillards occupant les régions élevées de l'atmosphère : c'est ce que l'on constate lorsque l'on traverse des régions occupées par des nuages, soit en gravissant les flancs des montagnes, soit dans les ascensions aérostatiques.

La cause générale de 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'eaux, 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.

Il est important de remarquer enfin que le mélange de deux masses

d'air non saturées, mais voisines de leur point de saturation, et à des températures différentes, peut donner lieu à la condensation d'une partie de la vapeur qu'elles contiennent. Ainsi, par exemple, un mètre cube d'air, à 15° et à peu près saturé de vapeur, contient, comme il est facile de le calculer, 13 grammes de vapeur d'eau : un mètre cube à 25° en contient 22^{gr},5. Le mélange contiendrait donc 35^{gr},5, ou 17^{gr},35 de vapeur d'eau par mètre cube ; or la température du mélange est voisine de 20°, et, à cette température, on trouve qu'un mètre cube d'air saturé ne peut contenir plus de 17^{gr},1 de vapeur : il y aura donc condensation d'une partie de la vapeur, c'est-à-dire formation d'un brouillard.

206. **Pluie, neige, grêle.** — Quand les gouttelettes d'eau qui forment les nuages acquièrent un volume suffisant, elles tombent par leur propre poids et forment la *pluie*.

La *neige* est de la vapeur d'eau qui s'est solidifiée dans les hautes régions de l'atmosphère. Chaque flocon est formé par la réunion de petites aiguilles prismatiques de glace, groupées le plus souvent en étoiles régulières (fig. 134). — Quand la neige traverse, en tombant, des régions de l'at-

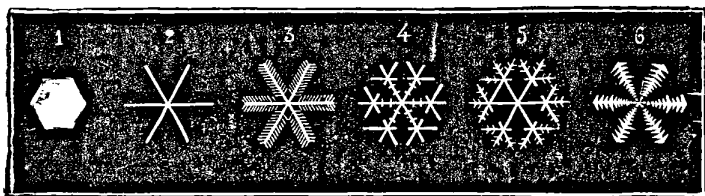


Fig. 134.

mosphère où la température est supérieure à zéro, elle peut se résoudre en pluie.

La formation de la *grêle* doit être rattachée aux phénomènes électriques qui s'accomplissent dans l'atmosphère pendant les pluies d'orage ; mais les diverses particularités du phénomène ne sont pas encore suffisamment expliquées. — Les *grêlons* sont, le plus souvent, de forme sphéroïdale ou ovoïde : ils sont formés d'un noyau blanc et opaque, environné de couches plus transparentes. — La chute de la grêle est toujours précédée d'un bruit particulier, qui paraît se produire dans le nuage lui-même, et qui acquiert parfois une grande intensité : on l'attribue à la rencontre des grêlons qui s'entre-choquent avant de tomber sur la terre. Dans les plus violents orages, la grêle dure rarement plus d'un quart d'heure ; après quoi, tous les phénomènes qui accompagnent l'orage perdent presque instantanément leur intensité.

CHAPITRE VI

DISTRIBUTION DE LA TEMPÉRATURE A LA SURFACE
DU GLOBE

207. Températures moyennes. — La température moyenne d'un jour, en un lieu déterminé, est la moyenne des températures observées dans ce lieu, d'heure en heure, de minuit à minuit. — L'expérience a montré que la moyenne de ces vingt-quatre observations diffère peu de la moyenne de trois observations, faites, la première au lever du soleil, la seconde à midi, la troisième au coucher du soleil.

La température moyenne d'un mois est la moyenne des températures de tous les jours de ce mois.

La température moyenne d'une année est la moyenne des températures des mois de cette année.

La température moyenne d'un lieu est la moyenne des températures d'un grand nombre d'années. — Pour obtenir une moyenne ayant quelque constance, l'expérience a montré qu'il faut au moins dix années d'observations consécutives. — La température moyenne de Paris, fournie par trente années d'observations, est de 10°,8.

208. Lignes isothermes, isothères et isochimènes. — Pour représenter la distribution des températures moyennes à la surface du globe, on a construit sur la sphère les trois systèmes de lignes suivants, dont l'idée première est due à M. de Humboldt.

1° *Lignes isothermes* (ἴσος, égal, θερμός, chaleur), qui réunissent les points ayant la même température moyenne de l'année.

2° *Lignes isothères* (ἴσος, égal, θέρος, été), qui réunissent les points ayant la même température moyenne des trois mois de l'été (juin, juillet, août).

3° *Lignes isochimènes* (ἴσος, égal, χειμών, hiver), qui réunissent les points ayant la même température moyenne des trois mois de l'hiver (décembre, janvier, février).

209. Climats. — On nomme *climat* d'un lieu l'ensemble des conditions météorologiques auxquelles il est soumis dans l'espace d'une année. — Au point de vue des conditions de température, il est facile de voir que la considération *simultanée* des trois espèces de lignes précédentes fournira des résultats précieux sur les climats des divers points. Si l'on sait, par exemple, qu'un point du globe est traversé par la ligne isotherme de 10°, on connaîtra sa température moyenne annuelle : mais cette seule

donnée ne fournirait pas une notion suffisante sur son climat, car cette moyenne peut résulter, soit d'une succession de jours très-chauds suivis de jours très-froids, soit d'une succession de températures peu différentes de 10 degrés pendant toute l'année. Mais, si l'on sait, en outre, que ce point se trouve situé en même temps sur la ligne isotherme de $+25^{\circ}$, et dans le voisinage de la ligne isochimène de -5° , on saura, par là même, que la température de l'été y est très-élevée, et la température de l'hiver très-basse. — Si, au contraire, une autre région, située sur la même ligne isotherme de 10° , est traversée par la ligne isotherme de $+15^{\circ}$ et par la ligne isochimène de $+5^{\circ}$, elle présente dans le cours de l'année une température beaucoup plus uniforme et un climat tout différent. — Ces différences ont, au point de vue des conditions hygiéniques et de la végétation, une extrême importance.

On distingue généralement trois espèces de climats :

1° *Climats constants*, pour lesquels la température moyenne de l'été ne présente avec celle de l'hiver qu'une différence de 6 à 7 degrés.

2° *Climats tempérés*, pour lesquels la température moyenne de l'été offre, avec celle de l'hiver, une différence d'une quinzaine de degrés.

3° *Climats excessifs*, pour lesquels la différence des températures moyennes de l'été et de l'hiver est plus considérable.

210. Influence de la latitude. — Les points du globe qui sont situés à des latitudes différentes présentent, par cela même, des différences quant aux durées relatives du jour et de la nuit, à une même époque de l'année; le temps pendant lequel le soleil les échauffe, et le temps pendant lequel ils se refroidissent, sont donc variables, de l'un à l'autre. La hauteur à laquelle le soleil s'élève au-dessus de l'horizon varie également, et c'est là encore une cause d'inégalité dans la température. — On s'explique ainsi le partage du globe en cinq grandes zones, dont les limites géographiques sont les suivantes :

1° La *zone torride*, limitée par les deux tropiques, c'est-à-dire par les deux parallèles qui sont situées, de part et d'autre de l'équateur, à la latitude de $23^{\circ}28'$. — Cette zone est caractérisée par un *climat très-constant* et par une *température moyenne annuelle très-élevée*.

2° Les deux *zones tempérées*, situées de part et d'autre de la zone torride : chacune d'elles est limitée, d'une part par les tropiques, de l'autre par le cercle polaire, c'est-à-dire par le parallèle qui est situé à $25^{\circ}28'$ du pôle (latitude $66^{\circ}32'$). — Dans chaque zone tempérée, à mesure qu'on s'éloigne du tropique, le climat, d'abord *tempéré*, tend à devenir *excessif*, et la température moyenne annuelle devient *de plus en plus basse*.

3° Les deux *zones glaciales*, comprises chacune entre l'un des cercles polaires et le pôle correspondant. — La température, extrêmement basse pendant des nuits dont la longueur devient de plusieurs mois, ne peut atteindre qu'une moyenne très-peu élevée pendant les longs jours, à

cause de la grande obliquité des rayons solaires. Aussi, ces zones sont-elles caractérisées par une température moyenne très-basse : ce sont les régions des *glaces perpétuelles*, dont les limites varient peu avec les saisons.

211. Influence du voisinage des mers. — Le voisinage des mers tend à rendre les climats des côtes moins variables, à la même latitude, que ceux des continents. — Cette influence s'explique, si l'on remarque que, en raison de leurs diverses propriétés physiques, les eaux s'échauffent et se refroidissent beaucoup plus lentement que la terre ferme. — En outre, l'abondance de la vapeur d'eau, qui produit souvent des nuages près des côtes, tempère l'ardeur du soleil pendant le jour, et diminue aussi la perte de chaleur que la terre éprouve, par rayonnement, pendant la nuit.

Aussi, les *climats maritimes* doivent-ils être classés le plus ordinairement parmi les climats tempérés, et souvent même parmi les climats constants ; au contraire, les *climats continentaux* peuvent être, sous la même latitude, des climats excessifs. — Parmi les climats maritimes, les plus constants sont les *climats insulaires*, offerts par les îles qui sont placées au milieu de mers très-étendues. — Ces différences sont rendues frappantes par les caractères spéciaux de la végétation, pour chacun de ces climats.

212. Influence de l'altitude. — L'observation montre encore que, en chaque point du globe, la température diminue à mesure qu'on s'élève dans l'atmosphère : cet abaissement de température est d'environ 1 degré pour un accroissement de hauteur ou d'*altitude* de 180 mètres. — Cette simple remarque montre que, si l'on veut se rendre compte des valeurs des températures observées en tel ou tel lieu, on devra avoir égard, non-seulement à sa latitude et à sa situation près des côtes ou dans l'intérieur des continents, mais aussi à sa hauteur au-dessus du niveau de la mer.

On s'explique également ainsi comment la limite des *neiges perpétuelles* se trouve, sur les diverses montagnes, à des altitudes variables selon la position géographique de ces montagnes elles-mêmes. A Quito, dans le voisinage de l'équateur, elle est à 4800 mètres au-dessus du niveau de la mer ; dans les montagnes de l'Islande, au voisinage du cercle polaire boréal, elle n'est qu'à 956 mètres au-dessus de ce même niveau.

DES VENTS

213. Des vents en général. — Les *vents* sont dus aux courants qui se produisent lorsque, pour une cause quelconque, l'équilibre est rompu entre les différentes couches de l'atmosphère. — Ainsi, quand une région a été fortement échauffée par les rayons du soleil, les couches d'air voisines du sol, qui ont participé à cet échauffement, s'élèvent et

sont remplacées par de l'air plus froid, qui afflue des régions voisines. — Des coups de vent violents peuvent résulter du vide produit, dans une région de l'atmosphère, par la condensation brusque d'une grande quantité de vapeur d'eau, comme cela a lieu dans les orages; l'air des régions voisines se précipite vers cet espace, où la pression a éprouvé une diminution subite.

214. Vents réguliers. — On nomme *vents réguliers* ceux qui soufflent à des époques fixes, en des points déterminés, de façon qu'on en puisse prévoir la durée ou le retour, et les différents caractères. — Les uns sont des vents *constants*, c'est-à-dire soufflant d'une manière continue, les autres sont des vents *périodiques*, c'est-à-dire revenant à des intervalles de temps réguliers.

Les seuls vents absolument constants sont les *vents alizés*, qui soufflent toute l'année dans le voisinage de l'équateur, et dont l'influence se fait sentir à une grande distance. — Pour nous rendre compte de la production de ces vents, nous remarquerons que, dans les régions voisines de l'équateur, la température moyenne est plus élevée que sous les autres latitudes, de sorte que l'air qui est en contact avec le sol tend à s'élever : de plus, les eaux occupant une étendue beaucoup plus grande que les continents, il se fait dans ces régions une évaporation très-active. Pour ces deux raisons, il se produirait, si la terre était immobile, une ascension des couches inférieures de l'atmosphère, qui seraient remplacées par de l'air arrivant des zones tempérées : on aurait donc des courants dirigés, à la surface du sol, *des pôles vers l'équateur*. Mais la terre tourne autour de la ligne des pôles, et entraîne avec elle l'atmosphère qui l'environne. Ce sont ces deux vitesses qui produisent, comme l'a démontré Halley, les vents alizés, soufflant, pour l'hémisphère boréal, dans la direction *nord-est*, et, pour l'hémisphère austral, dans la direction *sud-est*. Ces deux vents se rencontrent en arrivant sur l'équateur lui-même, et produisent un vent d'*est*. — Il règne en même temps, dans les régions élevées de l'atmosphère, des *contre-alizés*, qui ramènent l'air de l'équateur vers les pôles : ce sont des vents de *sud-ouest* pour l'hémisphère austral, et de *nord-ouest* pour l'hémisphère boréal. Ces vents, dont l'existence est également d'accord avec la théorie, peuvent être constatés par la direction dans laquelle ils transportent les nuages élevés ou les cendres de certains volcans.

Parmi les vents périodiques, on peut citer les *brises* qui se produisent presque chaque jour sur les côtes. — La *brise de mer* souffle le matin : au lever du soleil, la terre s'échauffant plus vite que la mer, il s'établit une ascension de l'air en contact avec le sol, et, par suite, un appel de l'air de la mer. La *brise de terre* s'élève, au contraire, au coucher du soleil, à cause du refroidissement plus rapide de la terre ferme.

Les *moussons* sont des vents périodiques qui règnent pendant six mois

de l'année dans un sens, et pendant les six autres mois en sens contraire. On distingue, dans notre hémisphère, la *mousson de printemps*, qui souffle de la mer vers la terre quand la terre commence à s'échauffer sous l'influence des rayons solaires, et la *mousson d'automne*, qui souffle de la terre vers la mer quand la température de la terre commence à s'abaisser au-dessous de celle de la mer. Les moussons sont particulièrement sensibles dans la mer des Indes.

Le *mistral*, qui souffle dans le midi de la France et qui est un vent du nord-ouest, est produit par l'échauffement des plaines de la Camargue et de la Crau. C'est un vent très-sec, parce qu'il amène, dans ces plaines, de l'air qui n'a passé que sur des continents, et qui, s'échauffant encore, s'éloigne de plus en plus de son point de saturation.

215. **Vitesse des vents.** — La vitesse du vent varie entre 1 mètre par seconde, qui est la vitesse d'un vent à peine sensible, et 40 mètres par seconde, qui est celle des ouragans. Le vent qui convient le mieux à la marche des navires a une vitesse d'environ 9 mètres par seconde.

LIVRE III. — ÉLECTRICITÉ ET MAGNÉTISME

CHAPITRE PREMIER

DÉVELOPPEMENT ET DISTRIBUTION DE L'ÉLECTRICITÉ

216. **Développement de l'électricité par le frottement.** — **Corps conducteurs, et non conducteurs.** — Le frottement développe, dans l'ambre jaune (*ήλεκτρον*), la propriété d'attirer les corps légers, tels que des barbes de plume, de petits morceaux de papier, etc. — Cette propriété, connue des philosophes de l'antiquité, a été attribuée à une cause particulière, qui a reçu le nom d'*électricité*.

Dès le seizième siècle, on put constater que la même propriété appartient à un grand nombre de corps, comme le verre, le soufre, la résine, etc.; mais un grand nombre d'autres, et en particulier les métaux, parurent d'abord incapables de s'électriser par le frottement.

Au commencement du dix-huitième siècle, une expérience célèbre de Gray vint montrer que la propriété électrique, communiquée par le frottement à un tube de verre, peut se transmettre à un bouchon qui ferme

ce tube, à une tige de sapin plantée dans le bouchon, à une corde de chanvre attachée à la tige; enfin, qu'une boule d'ivoire, placée à l'extrémité de cette corde, à plusieurs centaines de pieds de distance, acquiert également la propriété d'attirer les corps légers. En touchant, avec le tube électrisé, un enfant placé sur un gâteau de résine, on vit encore sa main et ses vêtements acquérir les mêmes propriétés.

Par ces expériences, et d'autres analogues, on fut conduit à considérer l'électricité comme due à un fluide subtil, que le frottement développe sur les corps comme l'ambre ou le verre, et qui peut se répandre dans certains autres corps, tels que le bois, l'ivoire, les métaux, le corps humain, etc. — Nous donnerons le nom de *corps conducteurs* à ceux qui paraissent n'opposer à la propagation du fluide électrique qu'une résistance insensible. — Le sol lui-même est conducteur, car l'expérience montra bientôt que, si, après avoir constaté la propriété électrique dans un corps conducteur, on le met en communication avec le sol, par le corps de l'opérateur ou par un autre corps conducteur quelconque, il perd cette propriété.

Il est maintenant facile de démontrer, par l'expérience, que *tous les corps peuvent être électrisés par le frottement*. — Et d'abord, puisqu'une tige de verre, tenue à la main par une de ses extrémités et frottée à son autre extrémité, manifeste la propriété électrique dans les points frottés, c'est que le fluide électrique n'a pu se propager dans toute la longueur de la tige, pour se répandre dans le corps de l'opérateur et dans le sol : en d'autres termes, le verre *n'est pas conducteur*. Il en est de même de l'ambre, de la résine, et en général de tous les corps sur lesquels on peut, sans précaution particulière, manifester l'électricité développée par le frottement.

Dès lors, pour savoir si les corps conducteurs, comme les métaux, peuvent être directement électrisés par le frottement, il est nécessaire de placer, entre eux et la main de l'opérateur, un corps *mauvais conducteur*, ou *isolant*, qui empêche le fluide, s'il vient à se développer, de se perdre dans le sol. Or, si l'on frotte un cylindre métallique A (fig. 135), en le tenant par un manche de verre M, on constate que le métal acquiert la propriété d'attirer les corps légers. — En général, *tous les corps sont électrisables par le frottement*, mais les corps conducteurs ne peuvent donner de signes d'électrisation que s'ils sont isolés du sol par un corps mauvais conducteur.

L'air est un corps mauvais conducteur : il est clair, en effet, que, si l'air n'était pas isolant, l'électricité ne pourrait être maintenue à la surface des corps, et les phénomènes électriques nous seraient inconnus. — Cependant, l'air de-



Fig. 135.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

tricité difficiles à réaliser quand l'état hygrométrique est un peu élevé.

217. Distinction des deux électricités. — Un des corps légers qu'il est le plus commode d'employer, pour l'étude des propriétés des corps électrisés, est le *pendule électrique* : c'est une petite balle de sureau A (fig. 156), isolée par un fil de soie E fixé lui-même à un support de verre C.

Si, après avoir frotté un bâton de résine, on l'approche de la balle de sureau, on constate qu'elle est attirée, vient toucher la résine, et est ensuite repoussée ; or le sureau, corps conducteur, a pris une partie de l'électricité de la résine ; on en peut donc conclure que deux corps chargés de l'électricité de la résine se repoussent. — Pendant que le sureau est ainsi électrisé, frottons un bâton de verre et approchons-le du pendule : la balle de sureau est vivement attirée. Donc l'électricité du verre n'est pas identique à celle de la résine. — Nous donnons à ces deux électricités différentes les noms d'électricité *vitree* ou *positive*, et d'électricité *résineuse* ou *negative*.

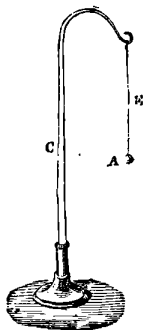


Fig. 156.

De même, si l'on touche la petite balle avec la main, pour conduire dans le sol le fluide qui s'y trouve, et qu'on en approche ensuite un bâton de verre électrisé, on verra qu'il y a attraction, contact, puis répulsion. On constatera ensuite que la balle, chargée de l'électricité qui lui aura été communiquée par le verre, sera attirée par la résine.

De l'ensemble de ces expériences, on peut conclure :

- 1° Que deux corps chargés de la même électricité se repoussent ;
- 2° Que deux corps chargés, l'un d'électricité positive, l'autre d'électricité négative, s'attirent.

Il est clair, d'ailleurs, que des expériences de ce genre ne peuvent conduire à distinguer une troisième espèce d'électricité ; car si l'on prend un pendule chargé, par exemple, d'électricité négative, et qu'on en approche un corps quelconque électrisé, selon qu'on observera une attraction ou une répulsion, on en conclura que le corps est chargé d'électricité positive ou d'électricité négative.

218. Deux corps frottés, l'un contre l'autre acquièrent des électricités contraires. — Lorsqu'on frotte l'un contre l'autre deux corps bien isolés, par exemple un plateau de verre C (fig. 157) et un plateau de bois B couvert d'une étoffe de laine, ces plateaux étant supportés tous deux par des manches de verre, on constate, en les approchant ensuite d'un pendule électrisé, que le premier est chargé

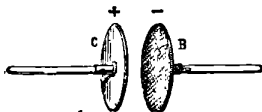


Fig. 157.

d'électricité positive, et le second d'électricité négative. — On obtient des résultats analogues, quels que soient les corps qu'on frotte l'un contre l'autre.

219 Hypothèse des deux fluides. — État neutre. — Les résultats précédents ont conduit le physicien anglais Symmer à une hypothèse qui a été adoptée, au moins provisoirement, par les physiciens, à cause de la facilité avec laquelle elle permet de relier entre eux les phénomènes et d'en prévoir de nouveaux. — Cette hypothèse consiste à admettre qu'il existe, dans tous les corps, deux fluides différents, qu'on appelle *fluide positif* et *fluide négatif* : les molécules de chacun d'eux se repoussent entre elles, et attirent les molécules du fluide contraire.

Lorsqu'un corps n'est pas électrisé, on admet qu'il contient, dans tous ses points, les deux fluides en quantités égales, de sorte que les actions contraires de ces fluides sur les fluides extérieurs ne peuvent se manifester ; on dit alors que le corps est à l'état neutre.

Dans cette théorie, le frottement de deux corps l'un contre l'autre accumule le fluide positif dans l'un, le fluide négatif dans l'autre, en sorte que, au moment de la séparation, chacun d'eux contient l'un des deux fluides en quantité prédominante.

Enfin, on admet que les molécules de chacun des deux fluides ont, pour les molécules matérielles des corps, une sorte d'adhérence, résultant de l'attraction qu'elles éprouvent de la part de ces molécules elles-mêmes. — Dès lors, si deux corps ont été frottés l'un contre l'autre, et séparés ensuite, ils doivent manifester une tendance au rapprochement, à cause de l'adhérence des molécules matérielles pour les fluides qui prédominent dans chacun d'eux, et qui s'attirent : la réunion des deux corps doit les ramener à l'état neutre. C'est, en effet, ce que montre l'expérience. — Quant à l'interprétation de l'attraction qui se produit entre les corps à l'état neutre et les corps électrisés, elle sera donnée plus loin.

220. Les actions électriques sont inversement proportionnelles aux carrés des distances. — Coulomb a déterminé, par des expériences précises et délicates, qui ne peuvent être décrites ici, la loi suivant laquelle varie l'action, attractive ou répulsive, qui s'exerce entre deux petites sphères électrisées, quand on fait varier la distance qui les sépare. — Lorsque les deux sphères, chargées d'électricités de même nom, conservent chacune une charge constante, et qu'on les place successivement à différentes distances, *les forces répulsives sont inversement proportionnelles aux carrés des distances.* — Lorsqu'elles sont chargées d'électricité contraire, les *forces attractives* suivent la même loi.

Or, la vérification expérimentale de cette loi est d'autant plus exacte que les dimensions des deux sphères sont plus petites par rapport à la

distance qui les sépare. On doit donc admettre que cette loi est aussi celle suivant laquelle varient les actions qui s'exercent entre les molécules électriques, dont les dimensions sont considérées comme infiniment petites, et qui sont placées à des distances très-grandes par rapport à ces dimensions elles-mêmes.

221. L'électricité se porte à la surface des corps conducteurs. — Prenons une sphère métallique A (fig. 138), isolée par un fil de soie ou par un pied de verre, et deux hémisphères métalliques creux B, C, qui peuvent s'appliquer exactement sur la sphère et qu'on maintient par des manches de verre.

Électrisons la sphère A, en la mettant en communication avec la machine électrique, et couvrons-la ensuite avec les hémisphères : en reti-

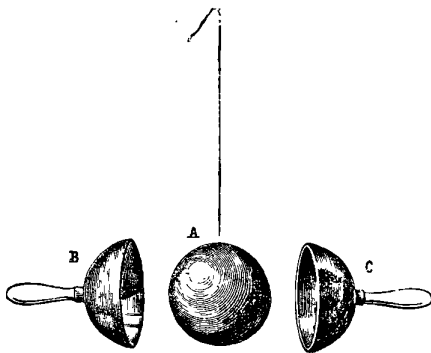


Fig. 138.

rant les hémisphères et les approchant d'un pendule électrique, 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 du système formée par la sphère et par les deux calottes métalliques qui la couvraient.

L'expérience conduit à un résultat semblable, quelle que soit la forme des corps conducteurs que l'on emploie.

222. Influence de la forme des corps conducteurs sur la distribution de l'électricité à leur surface. — Pour étudier la distribution de l'électricité à la surface des corps conducteurs de diverses formes, on emploie un *plan d'épreuve*, c'est-à-dire un petit disque de clinquant, isolé au bout d'une longue tige de gomme laque P (fig. 159). L'expérience et la théorie montrent que, lorsqu'on touche avec ce disque un point quelconque d'un corps électrisé et isolé, il se charge d'une quantité d'électricité proportionnelle à la charge du point touché. — Si donc on touche successivement, avec le même plan d'épreuve, différents points, M, N, ..., d'un conducteur isolé et électrisé, et si l'on détermine, à chaque fois, les valeurs des actions répulsives 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 proportion-

nelles aux charges des points touchés. — Telle est la méthode qui a été

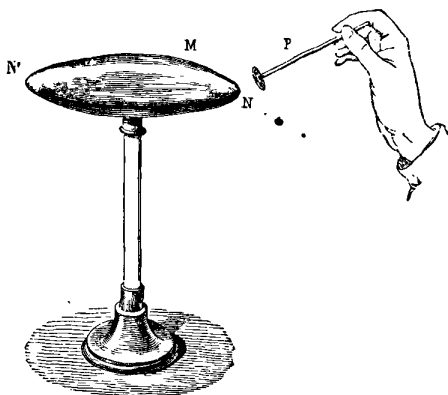


Fig. 159.

employée par Coulomb, pour étudier la distribution de l'électricité à la surface de corps conducteurs de formes diverses.

En opérant ainsi, on trouve que, sur une sphère métallique, la quantité d'électricité est sensiblement la même en tous les points de la surface; c'est ce qu'il était facile de prévoir, par raison de symétrie.

Sur un ellipsoïde *C* (*fig. 159*), les quantités d'électricités accumulées aux extrémités des axes sont proportionnelles aux longueurs de ces axes : la charge est donc plus grande en *N* et en *N'* qu'en tout autre point.

223. **L'électricité s'accumule vers 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, l'électricité doit tendre à s'accumuler vers cette extrémité. — Or, s'il en est ainsi, les molécules de fluide de même nom qui se sont accumulées vers la pointe doivent exercer les unes sur les autres une répulsion, en vertu de laquelle le fluide tendra à s'échapper dans l'air environnant; si la charge électrique est très-grande, cette *tension* doit devenir capable de vaincre la résistance de l'air, et le fluide doit s'échapper successivement dans l'air qui entoure la pointe.

C'est ce que l'on peut constater en adaptant, sur une machine électrique qui fonctionne régulièrement, une pointe métallique: la machine perd successivement sa charge, et il devient impossible d'en tirer des étincelles. — C'est pourquoi, on a toujours soin de limiter par des surfaces arrondies les corps conducteurs qu'on veut charger d'électricité.

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 le fluide qui s'échappe par une pointe se porte sur l'air environnant, il se produit une répulsion entre l'air et la pointe. — Si la pointe est fixe, l'air est vivement chassé, et, si le fluide se renouvelle d'une manière continue, il se produit un courant

d'air très-vif, qui peut souffler la flamme d'une bougie. — Inversement, dans le *tourniquet électrique* (fig. 140), on a un système de pointes qui sont mobiles et qui peuvent reculer sous l'influence de la répulsion de l'air. L'appareil se compose d'un certain nombre de tiges métalliques horizontales, terminées par des pointes courbées dans le même sens et fixées dans une chape qui est placée sur un pivot métallique C : le pivot étant mis en communication avec la machine, l'appareil se met en mouvement en sens inverse de la direction des pointes, c'est-à-dire dans le sens des flèches qu'indique la figure.

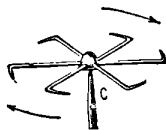


Fig. 140.

DÉVELOPPEMENT D'ÉLECTRICITÉ PAR INFLUENCE

224. **Expérience fondamentale.** — Soit un cylindre métallique isolé et à l'état neutre BC (fig. 141), en présence duquel nous placerons un corps électrisé quelconque : par exemple, une sphère A chargée d'électricité positive. Chacune des extrémités B, C porte un couple de petits pendules, formés de balles de sureau suspendues à des fils conducteurs de lin. — Dès que la sphère électrisée A est mise en présence du cylindre, on voit les pendules de chaque couple s'écarter l'un de l'autre. Il y a donc, en B et C, développement d'électricité. — Quant à la nature des fluides développés, on peut la déterminer en approchant d'abord, des pendules de l'extrémité B, un bâton de résine chargé d'électricité négative : on constate qu'il produit une répulsion. Si l'on approche ensuite, des pendules de l'extrémité C, un bâton de verre chargé d'électricité positive, on constate qu'il agit également sur eux par répulsion. L'extrémité B est donc chargée d'électricité *négative* ; l'extrémité C, d'électricité *positive*. C'est là d'ailleurs un résultat qu'il était facile de concevoir, puisque, des deux fluides dont la réunion constituait pour BC l'état neutre, le fluide négatif attiré par A a dû s'accumuler vers B, le fluide positif repoussé a dû se réfugier vers C. — Si, à ce moment, on éloignait la sphère A, les fluides séparés dans le cylindre se réuniraient, et le cylindre retomberait à l'état neutre.

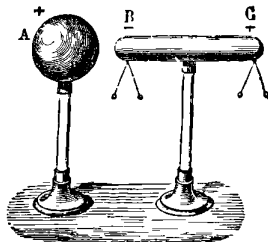


Fig. 141.

Si maintenant on touche avec le doigt l'extrémité C, pendant que la sphère est en présence du cylindre, le fluide positif s'écoule dans le sol, et les pendules C retombent. Au contraire, la divergence des pendules B

augmente : le fluide négatif reste donc maintenu en B par l'attraction de A, et il s'en accumule même en ce point une quantité plus grande, par la décomposition d'une nouvelle quantité de fluide neutre dans le corps de l'opérateur, et, en général, dans le système de conducteurs qui établissent la communication avec le sol. — Si maintenant on supprime la communication avec le sol, et qu'on éloigne A, les deux couples de pendules divergent de nouveau : on peut constater qu'ils sont alors chargés d'électricité négative, comme toute la surface du cylindre. — On voit donc que l'on a ainsi chargé le cylindre BC, sous l'influence de A, d'une électricité *contraire à celle de A*.

Remarque. — L'expérience donnerait encore le même résultat, si, au lieu de mettre le point C en communication avec le sol, on touchait *un autre point quelconque* du cylindre, même le point B. — C'est ce dont on peut se rendre compte, en remarquant que le cylindre, le corps de l'opérateur et le sol forment toujours un système de corps conducteurs, dans lequel la sphère A attire le fluide négatif vers les points les plus voisins d'elle, et repousse le fluide positif dans le sol. Quand on vient à supprimer la communication, le cylindre doit donc rester toujours chargé de fluide *contraire à celui du corps influent*.

225. **Attraction des corps légers par les corps électrisés.**

— C'est par le développement de l'électricité par influence qu'on peut s'expliquer l'attraction qu'exercent les corps électrisés sur les corps légers. — Soit une balle de sureau, par exemple, à laquelle on présente un bâton de verre chargé d'électricité positive. Le sureau étant conducteur, son fluide neutre est décomposé ; le fluide négatif s'accumule dans les points qui sont les plus voisins du bâton de verre, et le fluide positif dans les points les plus éloignés. D'autre part, il est indispensable d'admettre, pour expliquer la conservation des fluides dans les corps conducteurs en général, qu'il existe à leur surface *une couche d'air adhérente*, dans laquelle s'accumule l'électricité libre. Or l'attraction qui s'exerce, entre le fluide positif du bâton de verre et le fluide négatif accumulé sous la couche d'air adhérente à la balle, est supérieure à la répulsion exercée par le bâton de verre sur le fluide positif de la balle, puisqu'elle s'exerce à une distance moindre : elle doit donc tendre à mettre la balle en mouvement vers le bâton de verre.

226. **Étincelle électrique. — Communication de l'électricité à distance.** — L'étincelle électrique est due, en général, à la combinaison des deux fluides contraires, qui s'effectue entre un corps électrisé et un corps conducteur mis en présence, quand l'attraction exercée entre ces deux fluides est suffisante pour vaincre la résistance de l'air.

Une fois l'étincelle produite, le résultat est le même que si l'électricité du corps influent était passée, ou totalité ou en partie, sur le corps in-

fluence. En effet, d'une part, le corps influent a perdu une partie de sa charge; d'autre part, si le corps influencé est isolé, on constate que, après l'étincelle, il a acquis une charge de même nature que celle du corps influent. — L'étincelle constitue donc une sorte de *communication de l'électricité à distance*, et l'on dit souvent que l'un des corps *a pris à l'autre une partie de son électricité* : on voit que, dans la théorie que nous avons adoptée, c'est là une manière abrégée d'exprimer le résultat d'un phénomène un peu plus complexe.

Si le corps influencé est muni d'une pointe dirigée vers le corps influent, le fluide attiré s'écoule successivement par la pointe et va neutraliser le fluide du corps influent. C'est ce qui arrive, par exemple, quand on présente, à une machine électrique en activité, une pointe métallique en communication avec le sol; l'expérience montre qu'il est impossible alors de charger la machine.

227. **Électroscope à feuilles d'or.** — L'électroscope à feuilles d'or sert à déterminer la nature du fluide développé dans un corps électrisé. Il se compose d'une tige métallique BB' (fig. 142), portant à sa partie inférieure deux petites feuilles d'or, a, b, et fixée dans la tubulure d'une cloche de verre C. L'air intérieur est maintenu sec par des fragments de chlorure de calcium; la cloche est couverte d'un vernis isolant, et la tige est elle-même placée, soit dans un bouchon garni de gomme laque, soit dans l'axe d'un tube de verre assujéti par une monture métallique.

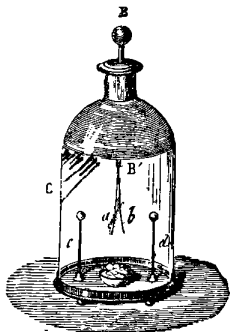


Fig. 142.
Électroscope à feuilles d'or.

On commence par charger l'instrument, d'une électricité connue. Pour cela, on en approche, par exemple, un bâton de résine électrisé négativement, et on touche du doigt l'extrémité B de la tige : le fluide positif de la tige et des feuilles d'or est maintenu en B par la résine, tandis que le fluide négatif est repoussé dans le sol (224, *Remarque*); les feuilles d'or restent verticales. Si maintenant on enlève le doigt, et qu'on éloigne ensuite le bâton de résine, le fluide positif qui avait été retenu en B se répand sur toute la tige et sur les feuilles d'or : les feuilles divergent. L'instrument reste donc chargé de fluide positif, et, en général, du fluide *contraire à celui du corps qu'on a employé pour le charger*.

L'instrument étant chargé, si l'on veut en faire usage pour reconnaître de quelle électricité est chargé un corps quelconque, par exemple un bâton de soufre qu'on aura frotté, on approche lentement ce corps

de l'extrémité B : s'il détermine un rapprochement des feuilles d'or, c'est qu'il attire une partie de leur électricité et qu'il est lui-même chargé du fluide négatif : en l'approchant davantage, on arriverait d'ailleurs, le plus souvent, à produire une divergence, par la décomposition du fluide qui est resté neutre dans la tige. — Au contraire, si en rapprochant le corps soumis à l'expérience, de l'électroscope chargé de fluide positif, on observe immédiatement une divergence plus grande des feuilles, c'est que ce corps est chargé de fluide positif.

Les tiges métalliques *c*, *d*, qui sont placées de part et d'autre des feuilles d'or, servent à augmenter la sensibilité de l'instrument ; sous l'influence du fluide développé dans les feuilles, leur extrémité supérieure se charge de fluide contraire, et attire les feuilles elles-mêmes. En outre, si la divergence des feuilles devient trop grande, elles viennent toucher ces deux tiges, et se déchargent ainsi dans le sol.

228. Machine électrique. — Dans la machine électrique ordinaire (fig. 143), l'électricité est produite par le frottement d'un plateau de verre contre deux paires de coussins. Le plateau PP' est circulaire : une manivelle G permet de le faire tourner autour d'un axe horizontal, de façon à faire passer successivement ses différents points entre les deux paires de coussins BB, B'B', qui sont fixés dans des montants de bois verticaux. Deux cylindres métalliques isolés C, C', qu'on nomme les *conducteurs* de la machine, portent chacun un fer à cheval métallique F, F', qui embrasse le plateau et qui est muni de pointes métalliques dirigées vers le verre.

Considérons, pendant la rotation, les points du plateau qui viennent de franchir l'une des paires de coussins : ils sont chargés de fluide positif. Lorsqu'ils arrivent entre les branches du fer à cheval suivant, ils décomposent par influence le fluide neutre des conducteurs, repoussent le fluide positif vers les parties les plus éloignées, et attirent le fluide négatif vers les pointes des fers à cheval, par lesquelles ce fluide s'écoule. De là résulte : 1° que les conducteurs restent chargés de fluide positif ; 2° que les points du plateau qui ont franchi les fers à cheval sont ramenés à l'état neutre. — Ces mêmes points, en repassant dans la paire de coussins suivante, s'électrifient de nouveau, et ainsi de suite (*).

À mesure que l'on fait tourner le plateau, la charge des conducteurs augmente. Elle ne peut cependant pas augmenter indéfiniment ; en effet, il arrive un moment où le fluide positif qui est déjà accumulé dans les conducteurs, repoussant le fluide positif que le plateau tendrait à mettre encore en liberté, l'empêche de venir s'ajouter à la charge des cylindres.

Il faut remarquer aussi qu'il s'effectue, par les supports de verre et

(*) La chaîne métallique M sert à conduire dans le sol le fluide négatif dont se chargent les coussins, par le coussin.

par l'air lui-même, une déperdition continuelle, laquelle diminue beaucoup la charge que les cylindres pourraient acquérir. Lorsque l'air est humide, on cherche à diminuer la déperdition, en plaçant des fourneaux sous les conducteurs, pour dessécher l'air qui les environne, et en essayant

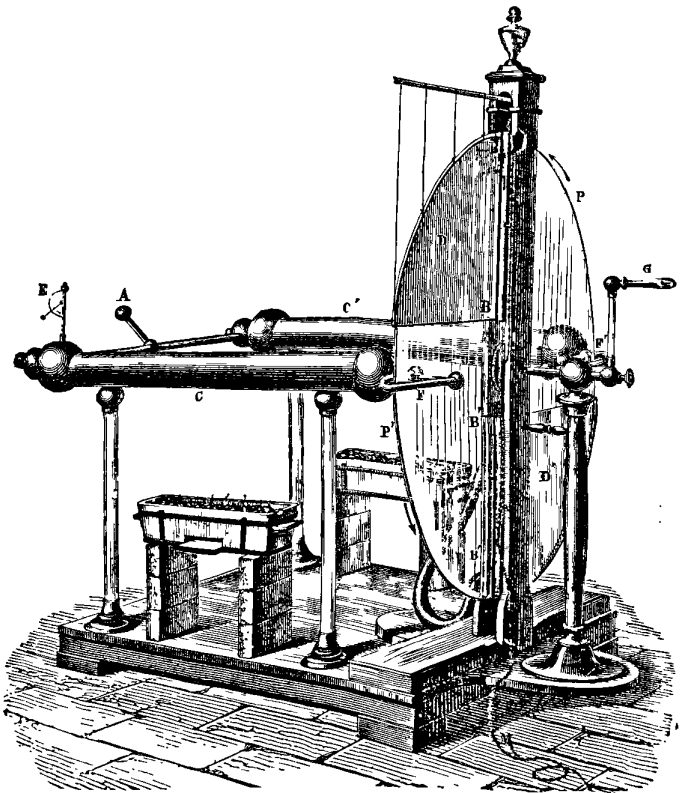


Fig. 145. — Machine électrique.

les pieds de verre avec un linge sec. — Le fluide développé sur le plateau tend à se perdre aussi, dans le temps que chacun de ses points met pour parvenir d'une paire de coussins au fer à cheval suivant; c'est pourquoi on place, sur ce trajet, des quarts de cercle D, D', qui sont formés chacun de deux feuillets de taffetas de soie, entre lesquels passe le plateau. ..

Un *électromètre de Henley E*, c'est-à-dire une petite balle de sureau supportée par une tige conductrice d'ivoire, est placé sur les conducteurs : l'angle de divergence de la tige permet d'apprécier, à chaque instant, la charge de la machine.

229. Électrophore. — On donne le nom d'*électrophore* à une sorte de machine électrique de petite dimension et peu coûteuse (*fig. 144*). C'est un disque ou *gâteau* de résine, coulé dans un moule, et sur lequel on pose un plateau d'un plus petit diamètre, qui est en métal ou

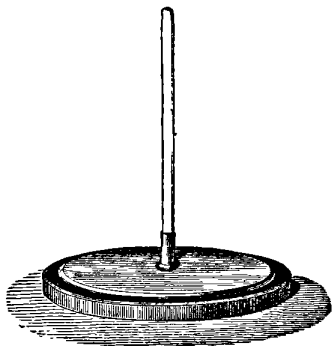


Fig. 144. — Électrophore.

en bois couvert d'une feuille d'étain : ce plateau est muni, en son centre, d'un manche de verre isolant. — On électrise le gâteau de résine, en le frappant avec une peau de chat : il se charge d'électricité négative. On y dépose alors le plateau métallique, dont le fluide neutre est décomposé par influence : le fluide négatif est repoussé vers la face supérieure ; le fluide positif est attiré vers la face inférieure, et n'est pas sensiblement neutralisé par le fluide négatif de la résine, parce que la résine n'est pas

conductrice et qu'elle ne touche le métal que par un petit nombre de points. En approchant le doigt de la face supérieure du plateau, on obtient une petite étincelle, due à la combinaison du fluide négatif de cette face avec le fluide positif de la main, et le plateau reste chargé de fluide positif, maintenu sur sa face inférieure : ce fluide se répand sur ses deux faces lorsqu'on le soulève par le manche de verre. Le plateau peut alors donner une étincelle quand on en approche le doigt, ou servir à changer d'électricité un corps conducteur quelconque.

Le gâteau de résine, une fois électrisé, peut continuer à développer du fluide positif dans le plateau métallique, un nombre de fois presque indéfini : on l'emploie, par exemple, dans les laboratoires de chimie, pour charger des bouteilles de Leyde.

230. Carillon électrique. — Grêle électrique. — Une tige métallique horizontale (*fig. 145*) communique avec les conducteurs de la machine électrique, et soutient, par des chaînes métalliques, deux timbres *T, T'* : entre ceux-ci est un autre timbre *T''*, suspendu par un fil de soie, et communiquant avec le sol par une chaîne de métal : dans les intervalles des timbres, sont de petites balles métalliques *b, b'*, suspendues par des fils de soie. Lorsque on fait marcher la machine, les timbres *T, T'*

se chargent de fluide positif : le timbre T'' se charge, par influence, de fluide négatif. Il en résulte que la balle b , par exemple, est d'abord attirée par T ; en touchant ce timbre, elle se charge de fluide positif, et est alors

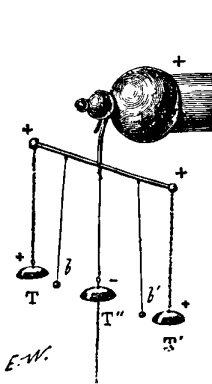


Fig. 145.

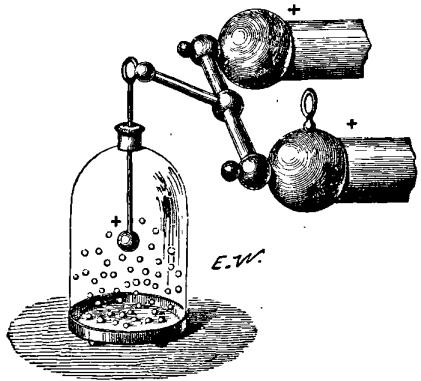


Fig. 146.

attirée par T'' ; en touchant T'' , elle se charge de fluide négatif, en sorte qu'elle est attirée de nouveau par T , et ainsi de suite. La balle b' oscille de même entre les timbres T' et T'' .

L'expérience de la *grêle électrique* s'explique d'une manière semblable. Une tige métallique fixée dans une cloche de verre (*fig. 146*) communique avec la machine électrique et se charge de fluide positif; le plateau métallique qui supporte la cloche, et qui communique avec le sol, se charge, par influence, de fluide négatif. De petites balles de sureau, placées dans l'appareil, sont agitées d'un mouvement continu, du plateau vers la tige, et de la tige vers le plateau. — C'est par des mouvements dus à une cause semblable que Volta a cru pouvoir expliquer le bruit qui se fait entendre dans les nuages orageux, avant la chute de la grêle (206).

L'expérience de la *danse des pantins* n'est qu'une modification de la précédente, dans laquelle on remplace les balles par de petits pantins façonnés avec de la moelle de sureau.

ÉLECTRICITÉ DISSIMULÉE OU CONDENSÉE. CONDENSATEURS.

231. Principe de la condensation. — Condensateur à plateaux. — Lorsqu'un plateau métallique isolé A (*fig. 147*) est mis en communication avec une machine électrique fonctionnant d'une manière

continue, et fournissant, par exemple, de l'électricité positive, il ne peut jamais acquérir qu'une charge limitée : cette limite est atteinte lorsqu'une

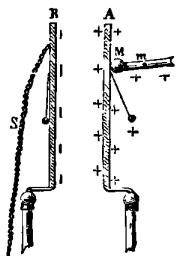


Fig. 147.

molécule de fluide m , située dans le conducteur intermédiaire, éprouve des répulsions égales de la part du fluide de A et de la part du fluide de la machine. — Si maintenant on place en présence de A un autre plateau B, mis en communication avec le sol, il y aura répulsion dans le sol du fluide positif de ce plateau, et attraction du fluide négatif sur la face qui regarde A. En même temps, ce fluide négatif, agissant à son tour sur le fluide de A, l'accumulera sur la face intérieure : de là, une diminution de la force répulsive exercée par A sur la molécule m et sur les molécules voisines, de sorte qu'une nouvelle quantité de fluide positif

pourra passer sur A. Donc, par le fait seul de la présence du plateau B communiquant avec le sol, il y aura accumulation ou *condensation* d'électricité positive sur le plateau A.

L'appareil ainsi formé prend le nom de *condensateur* : le plateau qui

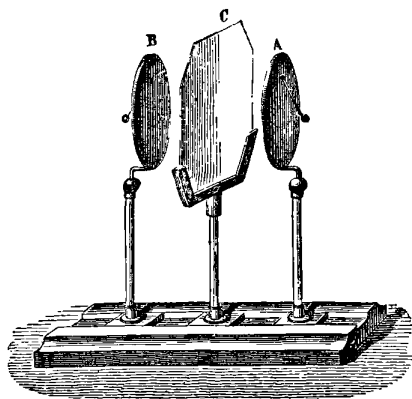


Fig. 148.

communique avec la source d'électricité est le *plateau collecteur*, celui qui communique avec le sol est le *plateau condensateur*.

Le plus souvent, on place entre les deux plateaux métalliques une lame de verre C (*fig. 148*), vernie à la gomme laque, qui a le double avantage d'augmenter la condensation, et d'opposer une résistance plus grande que l'air à la combinaison des fluides

contraires, qui sont accumulés de part et d'autre.

252. **Électricité libre et électricité dissimulée.** — Lorsqu'on charge, comme il vient d'être dit, un condensateur portant de petits pendules sur les faces extérieures de ses plateaux métalliques (*fig. 149*), on constate que le pendule du plateau collecteur A est le seul qui diverge : celui du plateau condensateur B reste en repos, comme si ce

plateau n'était pas chargé. Cependant, si, après avoir isolé ces deux plateaux de la machine et du sol, on vient à les éloigner comme le représente la figure 148, on constate que le pendule de B diverge fortement, et il est facile de reconnaître que ce plateau est chargé d'électricité *negative* : on constate, en même temps, que le pendule du plateau A diverge beaucoup plus fortement qu'il ne faisait auparavant. — Dès qu'on rapproche les plateaux, les pendules reviennent à la position indiquée par la figure 149.

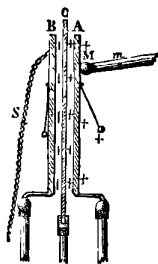


Fig. 149.

Dès lors, lorsque les plateaux sont rapprochés, on peut dire : 1° que tout se passe, relativement aux corps qui communiquent avec B, comme si B *n'était pas chargé* ; 2° que tout se passe, relativement aux corps qui communiquent avec A, comme si A était seul et ne contenait qu'une *partie de sa charge actuelle*. — D'après cela, il est facile de concevoir : 1° comment on a été conduit à donner à l'électricité de B l'épithète, assez impropre d'ailleurs, de *dissimulée* ; 2° comment on a pu considérer l'électricité de A comme composée de deux parties : l'une, qui est située à la face interne, dont l'action est neutralisée par celle de B et qui peut prendre également le nom d'électricité *dissimulée* ; l'autre, qui est située sur la face externe, dont l'action se manifeste sur les corps extérieurs, et qu'on a nommée électricité *libre*.

253. **Bouteille de Leyde.** — La bouteille de Leyde reproduit, avec une forme différente, les parties essentielles du condensateur à plateaux : c'est, de tous les condensateurs, le plus employé.

Un flacon de verre C (*fig. 150*) contient des feuilles d'or ou de clinquant AA ; au milieu de ces feuilles, vient plonger une tige métallique T, terminée en pointe à sa partie inférieure et maintenue dans le goulot par un bouchon verni à la gomme laque : une feuille d'étain BB est appliquée sur la surface extérieure du flacon, mais elle ne s'élève que jusqu'aux trois quarts environ de sa hauteur : le reste de la surface du flacon est couvert d'un vernis isolant. — Quand on prend la bouteille par la panse, la feuille d'étain ou *armature extérieure* est ainsi mise en communication avec le sol ; si l'on applique la tige T sur les conducteurs de la machine, cette tige et les feuilles d'or, qui forment l'*armature intérieure*, se chargeront d'électricité positive, comme le plateau A du condensateur à plateaux (*fig. 149*).

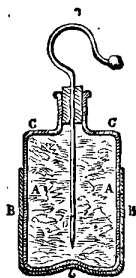


Fig. 150.

Tout ce qui a été dit du condensateur à plateaux est applicable à la bouteille de Leyde : quand on opère comme nous venons de l'indiquer,

l'armature intérieure seule contient de l'électricité libre ; il y a de l'électricité condensée de chaque côté de la paroi de verre, aux surfaces qui sont en contact avec les deux armatures.

234. Décharge successive d'un condensateur. — Un condensateur ayant été chargé, et isolé ensuite de la source, si l'on approche le doigt du plateau A, qui contient de l'électricité libre et dont le pendule diverge, on en tire une petite étincelle, et le pendule retombe au repos. En même temps, le pendule du plateau B diverge : on conçoit en effet que, au moment où l'on enlève une partie du fluide dont la présence en A maintenait le fluide de B accumulé à la face interne, une partie du fluide de B devient libre. — Si l'on vient maintenant à toucher B, on obtient encore une petite étincelle, et le pendule de B retombe : en même temps, le pendule de A diverge, ce qui s'explique comme précédemment, les rôles des deux plateaux étant simplement intervertis ; et ainsi de suite. — On désigne ce mode de décharge sous le nom de *décharge successive*.

En continuant à toucher alternativement les deux plateaux, on remarque que les divergences successives de l'un ou de l'autre pendule vont en diminuant sensiblement, et que les étincelles deviennent de plus en plus faibles. Donc, les quantités d'électricité qui deviennent libres, à chaque contact, vont toujours en décroissant. Comme on n'enlève d'ailleurs, à chaque fois, qu'une fraction du fluide restant, on conçoit qu'on ne puisse jamais décharger ainsi le conducteur d'une manière complète : l'expérience prouve en effet que, si l'air est bien sec, on peut répéter les contacts un très-grand nombre de fois, et obtenir toujours des étincelles sensibles.

La même expérience peut s'exécuter avec une bouteille de Leyde, qu'on placera sur un support isolant après l'avoir chargée, et dont on touchera successivement l'une et l'autre armature.

La disposition suivante, due à Franklin, permet à la décharge successive de s'effectuer d'elle-même. L'armature intérieure d'une bouteille de Leyde porte un timbre C (fig. 151) ; l'armature extérieure communique avec une tige métallique verticale, portant également un timbre A ; entre les deux tim-

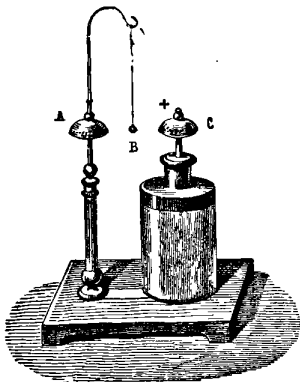


Fig. 151.

bres, est une petite balle métallique B, suspendue par un fil de soie.

Cette petite balle est d'abord attirée par C; puis repoussée par C et attirée par A, et ainsi de suite: il se produit donc un carillon continu, jusqu'à ce que les fluides, successivement devenus libres, aient produit une neutralisation à peu près complète sur les deux armatures.

235. Décharge instantanée. — La décharge instantanée s'obtient en faisant communiquer les deux armatures d'un condensateur par un corps conducteur. — Si, par exemple, on touche avec une main l'un des plateaux d'un condensateur chargé et isolé du sol, et si l'on approche l'autre main de l'autre plateau, on obtient une forte étincelle, et l'appareil est presque complètement déchargé. Il en est de même lorsque, tenant dans une main l'armature extérieure d'une bouteille de Leyde, on approche l'autre main de la tige qui termine l'armature extérieure. — Mais la combinaison des deux fluides à travers le corps humain produit toujours une commotion pénible; elle peut même devenir dangereuse, lorsqu'on opère

avec des condensateurs à grande surface et fortement chargés. On emploie alors, pour établir la communication entre les deux armatures, un *excitateur* (fig. 152) formé de deux arcs métalliques P, P', articulés à charnière: pour plus de sûreté, on isole même

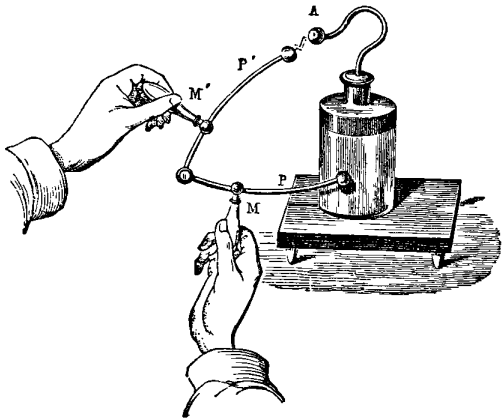


Fig. 152.

l'arc métallique par des manches de verre M, M', que l'on tient à la main.

Après une seule décharge, le condensateur n'est jamais ramené à un état complètement neutre: lorsque, au bout de quelque temps, on touche de nouveau les armatures avec l'excitateur, on obtient une nouvelle étincelle; de même encore, une troisième au bout de quelque temps, et ainsi de suite. La principale cause de ces *résidus* d'électricité est l'adhérence des fluides pour la lame isolante: nous allons voir, en effet, que les fluides condensés s'accumulent *dans cette lame elle-même*.

236. Dans un condensateur, les fluides développés ré-

se situent sur les faces du corps isolant. — Soit une bouteille de Leyde à armatures mobiles (fig. 153), c'est-à-dire dont l'armature intérieure A et l'armature extérieure B peuvent se séparer du verre intermédiaire C. Ces trois pièces étant placées l'une dans l'autre, chargeons

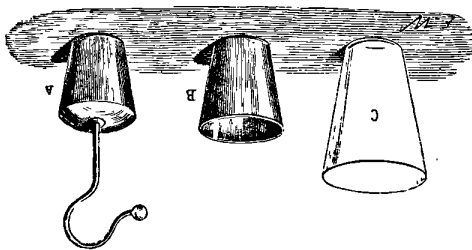


Fig. 153.

la bouteille et plaçons-la sur un plateau isolant; puis, enlevons avec la main l'armature intérieure, ce qui conduira son électricité dans le sol; retirons ensuite le vase de verre C, et mettons l'armature extérieure B en communication avec le sol. Si nous recomposons alors la bouteille, nous pourrions obtenir avec l'excitateur une décharge très-forte : l'électricité condensée était donc restée adhérente au verre lui-même.

257. Batteries électriques. — On donne le nom de batteries à

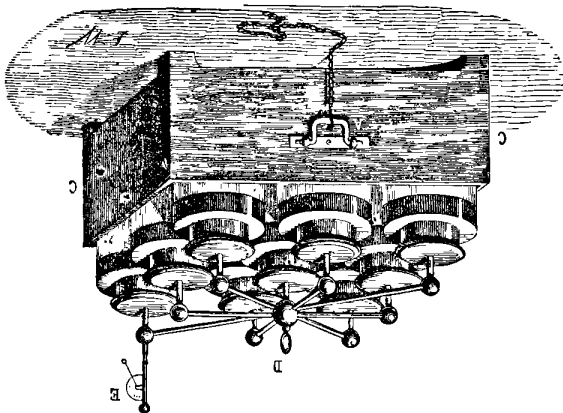


Fig. 154.

des réunions de grosses bouteilles de Leyde ou jarres (fig. 154). Toutes

les armatures intérieures sont réunies en D; les armatures extérieures communiquent par l'intermédiaire d'une feuille d'étain, qui garnit l'intérieur de la caisse C, et qui communique ordinairement elle-même avec la poignée extérieure A. — Pour charger la batterie, il suffira de mettre les armatures intérieures en communication avec une machine électrique, et les armatures extérieures en communication avec le sol par une chaîne métallique.

258. Électromètre condensateur. — L'électromètre condensateur, qui est dû à Volta, n'est autre chose qu'un électroscope à feuilles d'or (227), dans lequel la partie supérieure de la tige est munie d'un condensateur. Cette tige porte, en effet, un plateau métallique horizontal A (fig. 155), dont la face supérieure est couverte d'une couche mince de vernis à la gomme laque; sur ce plateau, on en pose un second B, dont la face inférieure est couverte de ce même vernis : ces deux plateaux et les couches de vernis qui les séparent constituent le condensateur. — Supposons qu'on ait à reconnaître la nature de la charge d'une source à très-faible tension, mais pouvant fournir de l'électricité d'une manière continue. La source est mise en communication avec la face supérieure du plateau B, tandis qu'on touche A avec la main : il y a alors accumulation du fluide de la source sur B, jusqu'à ce que l'électricité libre ait une tension égale à celle de la source elle-même; en même temps, le fluide de nom contraire est condensé en A. Si, après avoir supprimé les communications

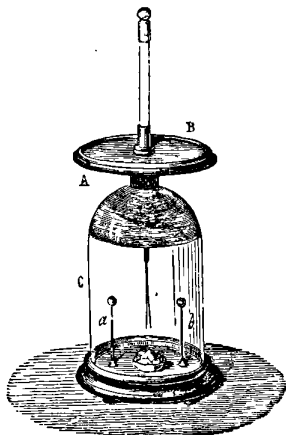


Fig. 155.

avec la source et avec le sol, on enlève le plateau B, par le manche de verre qu'il porte en son centre, le fluide accumulé en A, n'étant plus maintenu contre la couche de vernis, se répand sur la tige et sur les feuilles. On observera alors une divergence, et il ne restera plus qu'à reconnaître la nature du fluide dont l'instrument est resté chargé, en approchant de A un corps chargé d'une électricité connue. — Cet appareil permet d'étudier des sources d'électricité qui n'auraient aucune action sensible sur l'électroscope ordinaire.

259. Effets des décharges électriques. — Les décharges électriques produisent, dans les corps qu'elles traversent, des actions diverses, parmi lesquelles se manifestent, avec plus ou moins d'intensité selon les

circonstances, des effets *mécaniques*, *calorifiques*, *lumineux*, *chimiques* et *physiologiques*.

1° *Effets mécaniques*. — Une lame de verre C (fig. 156) étant placée entre deux pointes métalliques, on fait passer la décharge d'une bouteille de Leyde entre ces deux pointes, en mettant en communication la chaîne B avec l'armature extérieure de la bouteille, et touchant la boule A avec l'armature intérieure: la décharge laisse un trou dans le verre.

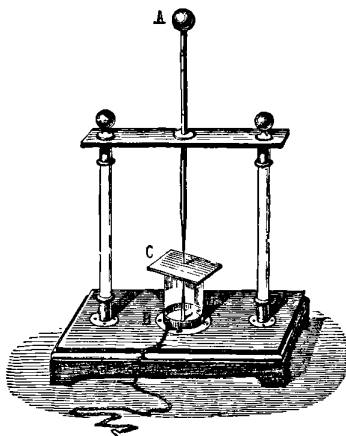


Fig. 156.

De même, en faisant passer la décharge d'une batterie puissante au travers d'un morceau de bois bien sec, on le fait voler en éclats.

On peut remarquer encore que c'est à l'ébranlement mécanique produit dans l'air, qu'est dû le *bruit* de l'étincelle, dans les circonstances ordinaires.

2° *Effets calorifiques*. — En

traversant des fils métalliques fins, les décharges y déterminent une élévation de température qui peut aller jusqu'à les volatiliser. — Le même effet se produit quand la décharge se propage dans une feuille d'or très-mince; c'est ce qui donne

lieu à l'expérience connue sous le nom de *portrait de Franklin*.

Dans un carton B (fig. 157), on a pratiqué des découpures représentant grossièrement le portrait de Franklin: sur ce carton, on applique une

feuille d'or, de manière que ses bords touchent les deux petites lames métal-

liques F, F'; on la maintient en rabattant sur elle les deux cartons A, C.

On place alors le carton B sur un ruban de soie blanche, et on presse le

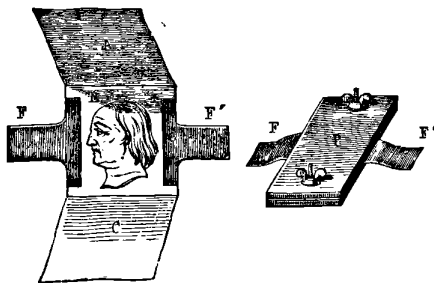


Fig. 157.

On place alors le carton B sur un ruban de soie blanche, et on presse le

tout entre deux plaques de bois P. On fait passer la décharge d'une batterie entre les lames F, F' : les particules d'or volatilisées traversent les découpures, et l'on trouve sur le ruban de soie le portrait de Franklin, imprimé par les parcelles d'or.

3° *Effets lumineux.* — Les *étincelles*, qui jaillissent des machines électriques et des condensateurs, au travers de l'air et des corps mauvais conducteurs, sont les manifestations lumineuses les plus ordinaires des décharges. — Quand une machine fonctionne sans qu'il y ait, en présence de ses conducteurs, de corps assez voisins pour en tirer des étincelles, il se produit des *aigrettes* lumineuses, qu'on distingue dans l'obscurité, sur les parties saillantes, et qui sont accompagnées d'un craquement continu : ce sont des décharges de la machine vers les corps éloignés. — Dans d'autres circonstances, elles se transforment en une simple *lueur*, sans production d'aucun bruit

Le *tube étincelant* (fig. 158) est destiné à produire simultanément un grand nombre d'étincelles. C'est un tube de verre sur la surface intérieure duquel on a collé de petits losanges de clinquant, dont les pointes sont



Fig. 158.

en regard les unes des autres, et qui sont disposés suivant une spirale dont les extrémités communiquent avec les montures métalliques A, B. Lorsqu'on met l'une des montures en communication avec le sol, et qu'on approche l'autre monture de la machine, on voit, à chaque décharge, des étincelles jaillir à la fois dans les intervalles de tous les losanges. — Le *carreau étincelant* est une lame de verre sur laquelle on produit des effets semblables, au moyen d'une petite bande d'étain qui fait un grand nombre de zigzags, et qui présente des solutions de continuité dont l'ensemble forme un dessin.

On a encore étudié les effets lumineux des décharges dans un espace vide, par exemple dans le tube que représente la figure 15, et dont les montures métalliques portent de petites tiges intérieures, destinées à faire passer les décharges. Lorsque, après avoir fait le vide aussi bien que possible, on met l'une des montures en communication avec la machine électrique, et l'autre avec le sol, on voit apparaître une trainée de lumière rougeâtre, dans tout l'espace qui sépare les deux tiges.

4° *Effets chimiques.* — Les décharges électriques peuvent déterminer des combinaisons chimiques : c'est ce que montre l'expérience du *pistolet de Volta*. Le vase métallique A (fig. 159) a sa paroi traversée par une tige métallique B, - mastiquée dans un tube de verre qui l'isole : on y in-

troduit un mélange de deux volumes d'hydrogène et de 1 volume d'oxygène, et l'on ferme le vase avec un bouchon B. Prenant alors le vase à la main, on approche de la machine électrique l'extrémité D de la tige : il jaillit une étincelle entre la paroi métallique et l'extrémité intérieure E de la tige : les deux gaz se combinent pour former de la vapeur d'eau, et, sous l'influence de la haute température qui se produit, le bouchon est violemment projeté.

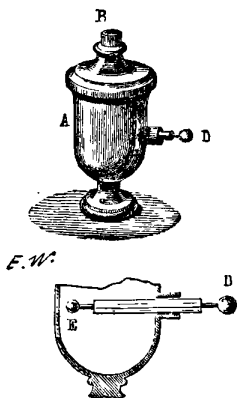


Fig. 159.

En employant une disposition expérimentale un peu différente, on constate qu'une *série d'étincelles*, traversant un mélange d'azote et d'oxygène en présence d'une solution de potasse, donne naissance à de l'acide azotique, et, par suite, à de l'azotate de potasse.

Au contraire, les décharges électriques peuvent produire la décomposition de certains corps composés : ainsi, sous l'influence d'une *série d'étincelles*, l'ammoniaque est

décomposée en azote et hydrogène ; l'acide carbonique, en oxyde de carbone et oxygène, etc.

5° *Effets physiologiques.* — La décharge électrique, quand elle se fait à travers nos organes, y produit une commotion qui dépend de son intensité. Les commotions produites par les condensateurs sont toujours beaucoup plus violentes que celles des machines proprement dites. — La commotion d'une bouteille de Leyde peut être ressentie à la fois par un grand nombre de personnes se tenant par la main, de manière à former une chaîne continue : la première prend à la main la panse de la bouteille, la dernière vient toucher l'armature intérieure. — Avec la décharge de batteries puissantes, on a pu obtenir des commotions assez fortes pour tuer, sur le coup, des animaux d'assez grandes dimensions.

ÉLECTRICITÉ ATMOSPÉRIQUE

240. **État électrique de l'atmosphère et des nuages.** — L'atmosphère est toujours chargée d'électricité *positive*, quand le temps est serein. C'est ce qu'on peut constater en modifiant l'électroscope à feuilles d'or (*fig. 142*), comme l'a fait de Saussure. Il suffit de remplacer la boule qui surmonte la tige par une pointe métallique, pour constater que l'appareil se charge, sous l'influence de l'électricité de l'atmosphère, de fluide positif : le fluide négatif attiré s'écoule alors par la pointe, et

les feuilles restent chargées du même fluide que l'atmosphère. — Le sol et les corps qui sont à sa surface sont chargés d'électricité *négative*, comme on peut s'en assurer en plaçant le même électroscope sous un arbre ou sous un édifice.

Les nuages sont aussi chargés d'électricité : les nuages orageux surtout sont remarquables par la tension qu'ils possèdent. Ces faits, soupçonnés d'abord par Franklin, furent constatés bientôt par de nombreuses expériences. — En 1752, Dalibard, sur les indications de Franklin, fit élever, à Marly-la-Ville, une barre de fer de 40 pieds de haut, terminée à sa partie supérieure par une pointe, et fixée inférieurement sur un support isolant. Lorsque des nuages orageux venaient passer au-dessus de la tige, elle donnait des étincelles quand on en approchait un fil de cuivre, tenu par un manche isolant et communiquant avec le sol. — A peu près à la même époque, Franklin lui-même eut l'idée de lancer dans les airs, au milieu de la plaine de Philadelphie, un cerf-volant surmonté d'une pointe métallique, et de le diriger vers des nuages orageux : la corde de chanvre était isolée de l'opérateur par un cordon de soie. Dans les premiers moments, le chanvre étant peu conducteur, on n'obtint que des traces douteuses d'électricité ; mais, une pluie fine étant venue mouiller le chanvre et le rendre conducteur, Franklin put tirer de la corde des étincelles de plusieurs pouces. — Une expérience semblable, faite en 1755 à Nérac, par de Romas, donna des effets plus puissants encore : la corde du cerf-volant ayant été entourée d'un fil de cuivre, il en fit jaillir des lames de feu de dix pieds de long, dont le bruit était comparable à celui d'un coup de pistolet. — De pareilles expériences ne doivent être faites qu'avec les plus grandes précautions : ces décharges sont foudroyantes et peuvent tuer instantanément l'expérimentateur qu'elles viendraient frapper.

Les nuages sont chargés tantôt de fluide positif, tantôt de fluide négatif. — C'est ce dont on peut se rendre compte en remarquant qu'un nuage formé au milieu de l'atmosphère doit être chargé d'électricité positive, comme l'air lui-même. — Au contraire, un brouillard qui se produit à la surface du sol, et qui, en s'élevant, forme un nuage, doit être électrisé négativement. — Enfin, un nuage chargé d'électricité positive peut agir par influence sur un nuage placé au-dessous de lui, et le charger d'électricité négative.

241. Foudre. — Éclair. — Tonnerre. — La *foudre* est une décharge qui éclate, soit entre deux nuages, soit entre un nuage et la terre. L'*éclair* est le phénomène lumineux qui l'accompagne : le *tonnerre* est le bruit de la décharge.

Les éclairs offrent le plus souvent l'aspect de sillons lumineux, en forme de zigzags ; ils franchissent parfois des distances de 15 à 20 kilomètres. — Lorsque les décharges se produisent dans des régions très-

élevées de l'atmosphère, où la pression est très-faible, on n'observe que des lueurs rougeâtres, éclairant une région limitée de la voûte céleste.

Le bruit du tonnerre ne nous arrive jamais que quelques secondes après la lumière de l'éclair : cet intervalle, entre les deux perceptions, tient à ce que le son parcourt seulement 340 mètres environ par seconde, tandis que la lumière met un temps inappréciable à nous parvenir. On peut évaluer approximativement la distance qui nous sépare des nuages orageux, par le temps qui s'écoule entre l'apparition de l'éclair et le coup de tonnerre qui suit. — Le roulement du tonnerre doit être attribué, tantôt aux échos produits par les objets situés à la surface de la terre ou par les nuages eux-mêmes ; tantôt à la production *simultanée* de plusieurs décharges, entre plusieurs nuages situés à *des distances différentes de l'observateur* : dans ce dernier cas, on conçoit que ces décharges soient perçues par l'oreille comme si elles étaient successives.

Lorsque la foudre éclate entre un nuage électrisé et le sol, on dit que *la foudre tombe*. Elle frappe de préférence les points qui offrent des saillies par rapport aux corps environnants : les montagnes, les clochers, les arbres isolés au milieu des plaines ; aussi, n'est-ce jamais dans le voisinage de ces abris qu'on doit se réfugier dans les temps d'orage.

Quant aux effets de la foudre, ils ne se distinguent de ceux des décharges de nos appareils que par leur grandeur. — Ce sont des effets *mécaniques*, arrachant et transportant les pierres, et déchirant en filaments le tronc des arbres ; des effets *calorifiques*, rougissant et fondant les fils de sonnettes ou les dorures, et mettant le feu aux matières combustibles ; des effets *chimiques*, donnant lieu à la formation d'acide azotique et d'azotate d'ammoniaque dans les pluies d'orage ; des effets *physiologiques*, amenant quelquefois les lésions les plus graves, et d'autres fois la mort sans lésion apparente.

Il arrive enfin que l'homme ou les animaux soient victimes de la foudre, sans en être directement frappés : c'est le phénomène qu'on a désigné sous le nom de *choc en retour*. — Supposons qu'un nuage chargé, par exemple, d'électricité positive, passe à une petite distance du sol : il décompose par influence le fluide neutre des objets situés à la surface de la terre, attire le fluide négatif et repousse le fluide positif. Pendant que cette influence s'exerce, s'il arrive que le nuage se décharge tout à coup sur un autre point, il s'opère une recombinaison subite des fluides dans les corps influencés : de là, chez les animaux, une commotion qui peut déterminer instantanément la mort.

242. Paratonnerres. — Lorsqu'une pointe métallique, communiquant avec le sol, est dirigée vers un corps électrisé, et en particulier vers un nuage que nous supposerons chargé, par exemple, d'électricité positive, le fluide neutre de cette pointe et des corps conducteurs qui communiquent avec elle est décomposé par influence : le fluide positif est

repoussé dans le sol, et le fluide négatif afflue vers l'extrémité de la pointe, qui le laisse échapper d'une manière continue. Le système des corps conducteurs qui communiquent avec la pointe ne peut donc *conserver* aucune charge électrique, en sorte qu'il ne peut se produire aucune décharge entre ce système de corps et le nuage électrisé. — C'est cette observation qui a conduit Franklin à l'établissement des *paratonnerres*, destinés à préserver les édifices de la foudre.

Les conditions dans lesquelles un paratonnerre doit être installé, pour être efficace, ont été l'objet de recherches multipliées de la part des savants. Les conclusions auxquelles ils sont parvenus peuvent être résumées comme il suit.

Le paratonnerre doit se composer d'une tige de fer, de 8 à 10 mètres de longueur, terminée à la partie supérieure par une pointe de cuivre. La base de la tige doit être mise en communication avec le sol, au moyen d'un *conducteur* qui sera, soit une tige de fer carrée ayant environ 2 centimètres de côté, soit un câble de fils de fer, qu'on aura couvert de goudron pour éviter l'oxydation. — Le conducteur doit *communiquer avec toutes les pièces métalliques un peu volumineuses* de l'édifice, afin que les fluides développés dans ces pièces, par l'influence des nuages, puissent s'échapper par la pointe du paratonnerre. — Si plusieurs paratonnerres sont installés sur un même édifice, tous leurs conducteurs doivent communiquer entre eux par des tiges métalliques intermédiaires.

L'un des points les plus importants à réaliser, dans l'établissement d'un paratonnerre, est la communication de l'extrémité inférieure du conducteur avec le sol. Il est *indispensable* que cette communication se fasse par une masse d'eau considérable et s'étendant très-loin dans le sol, comme l'eau d'un puits ou d'une source. Les citernes, dont les parois sont imperméables à l'eau, sont un moyen de communication insuffisant, et dont l'effet serait plutôt dangereux qu'utile : la braise de boulanger, dont on enveloppe quelquefois les ramifications des conducteurs, est également insuffisante. — Pour rendre la surface de contact entre l'eau et l'extrémité du conducteur aussi étendue que possible, on contourne le fer en hélice, ou l'on y cloue des feuilles de tôle.

On admet généralement, comme un fait d'expérience, qu'un paratonnerre préserve de la foudre les objets qui sont autour de lui, dans un cercle dont le rayon est double de la hauteur de la tige.

CHAPITRE II

—

MAGNÉTISME

243. Attraction qui s'exerce entre l'aimant et le fer. — Substances magnétiques. — On donne le nom d'*aimants* aux substances qui possèdent la propriété d'attirer le fer.

L'*aimant naturel* ou *Pierre d'aimant* ($\mu\alpha\gamma\eta\eta\varsigma$) est un oxyde de fer, auquel on donne en chimie la formule Fe^2O^3 , et qu'on appelle encore oxyde magnétique. On en trouve, dans certaines mines, des échantillons qui ont une puissance remarquable.

En soumettant des barreaux d'acier à des traitements qui seront étudiés plus loin, on leur communique la propriété d'attirer le fer : ils prennent alors le nom d'*aimants artificiels*. — Cette propriété ne peut, par aucun procédé, être communiquée d'une manière permanente au fer parfaitement pur, qui reçoit le nom de *fer doux*.

Le fer n'est pas le seul corps qui soit attirable à l'aimant : quelques autres métaux, tels que le nickel, le cobalt, le chrome, le sont également. On leur donne le nom de *substances magnétiques*.

244. Pôles des aimants. — Quand on plonge un barreau aimanté, ou un aimant quelconque, dans de la limaille de fer, on remarque que les grains de limaille s'attachent en filaments autour de deux points P, P' (fig. 160), situés au voisinage des extrémités, et qu'on nomme les *pôles*. Ces filaments deviennent d'autant plus courts qu'on s'approche davantage du milieu ; la ligne médiane MN

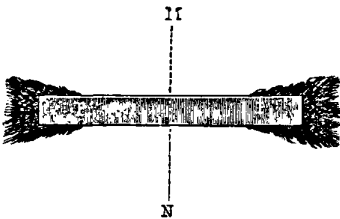


Fig. 160.

ne paraît pas exercer sur la limaille d'attraction sensible : cette région MN est ce qu'on nomme la *ligne neutre* (*).

L'inégale activité des diverses régions d'un aimant peut encore être

(*) Les aimants naturels ou les barreaux mal aimantés présentent quelquefois dans leur longueur plusieurs centres d'attraction, séparés par des régions inactives. — Ces points ont reçu le nom de *points conséquents*; les causes qui en déterminent la formation sont encore mal connues.

manifestée par l'expérience suivante. On place un barreau aimanté au-dessous d'une feuille de carton horizontale AB (*fig. 161*), qui le couvre

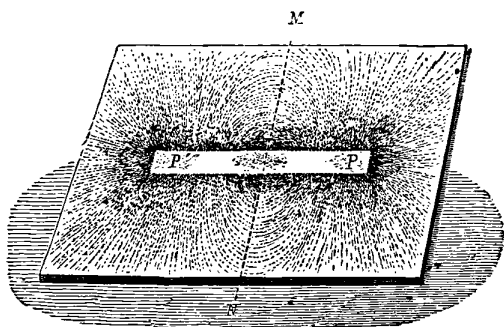


Fig. 161.

entièrement ; puis, au moyen d'un tamis, on laisse tomber une pluie de limaille de fer sur cette feuille, d'une certaine hauteur. On voit les grains se grouper de manière à dessiner le contour du barreau, comme l'indique la figure : ils forment, autour des pôles P, P', de longs filaments qui convergent vers chacun de ces points, et dont quelques-uns vont, en se courbant en arcades par-dessus la ligne médiane, rejoindre le pôle opposé. — Au-dessus de la ligne médiane, se trouve un peu de limaille de fer, qui est restée où elle était tombée, sans paraître éprouver d'attraction.

245. Distinction des deux pôles, au moyen de l'action exercée par la terre sur un aimant. — Un barreau aimanté

étant suspendu horizontalement par un fil sans torsion (*fig. 162*), et abandonné à lui-même, on le voit, après quelques oscillations, prendre une direction fixe, qui est à peu près celle du nord au sud, et à laquelle il revient toujours quand on l'en écarte. — Si l'on vient à retourner le barreau, de manière à diriger vers le sud celui de ses deux pôles qui s'était tourné vers le nord, et réciproquement, et qu'on l'abandonne de nouveau, on le voit faire une demi-révolution, et revenir, après quelques oscillations, à sa position primitive. Cette dernière remarque

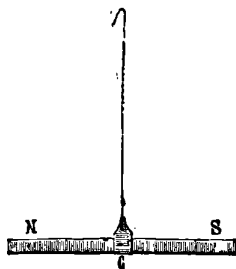


Fig. 162.

sont pas identiques : nous leur donnerons provisoirement les noms de *pôle nord* et *pôle sud*.

246. Action réciproque des pôles de deux aimants. — Soit une aiguille aimantée dont on aura déterminé le pôle nord N et le pôle sud S (*fig. 163*), et un barreau dont on aura également déterminé

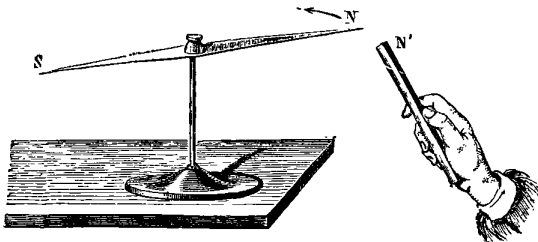


Fig. 163.

le pôle nord N' et le pôle S'. Lorsqu'on présente au pôle nord N le pôle nord N', on observe une répulsion. De même le pôle sud S' repousse le pôle sud S. — Au contraire, le pôle nord N' attire le pôle sud S.

Donc, *deux pôles de même nom se repoussent, et deux pôles de noms contraires s'attirent.*

247. Hypothèse de l'aimant terrestre. — **Origine des dénominations de pôle austral et pôle boréal.** — D'après ce qui précède, nous pouvons, dès maintenant, nous faire une idée de l'action exercée par la terre sur un aimant placé à la surface.

En effet, si un barreau aimanté M' est suspendu horizontalement au-

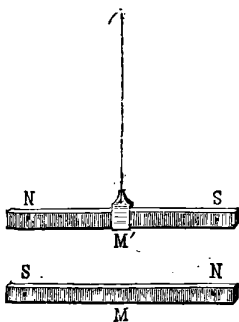


Fig. 164.

dessus d'un autre barreau fixe M (*fig. 164*), l'équilibre ne peut exister que s'il vient se placer parallèlement à M, les pôles de noms contraires étant en regard, comme l'indique la figure : s'il est écarté de cette position, on l'y voit revenir, après quelques oscillations. On peut donc assimiler l'action de la terre sur un aimant mobile à celle d'un barreau fixe, qui serait orienté sensiblement du nord au sud. Cet aimant fictif a reçu le nom d'*aimant terrestre* : la théorie conduit à regarder ses deux pôles comme situés à une grande distance de la surface du globe. — On nomme *pôle*

austral de cet aimant fictif, celui qui est situé dans l'hémisphère austral ; *pôle boréal*, celui qui est situé dans l'hémisphère boréal.

Par suite, si l'on considère un barreau aimanté en équilibre à la surface de la terre, et qu'on veuille appliquer à ses deux pôles des dénominations semblables, on devra regarder les pôles du barreau comme s'étant placés en sens inverse de ceux de l'aimant terrestre. On devra donc nommer *pôle austral* celui qui se dirige vers le nord, et *pôle boréal* celui qui se dirige vers le sud. — Ce système de dénominations, qui emprunte le nom de chacun des pôles d'un aimant, non pas au point de l'espace vers lequel il se dirige, mais au pôle de l'aimant terrestre dont il est l'analogie, est adopté à peu près exclusivement, au moins dans le langage scientifique.

248. Hypothèse des deux fluides. — Il est commode, pour expliquer les phénomènes du magnétisme, d'admettre, comme nous l'avons fait pour l'électricité, deux *fluides magnétiques*, tels que chacun d'eux repousse le fluide de même nom et attire le fluide de nom contraire. — Ces deux fluides ont reçu les noms de *fluide austral* et *fluide boréal*.

Quand un barreau n'est pas aimanté, on admet qu'il contient les deux fluides, distribués de telle façon que leurs actions contraires sur une molécule de fluide extérieur quelconque se détruisent : on dit alors que le barreau est à l'état *neutre*. — On dit, comme dans la théorie des fluides électriques (219), que deux quantités de fluides contraires sont *égales*, lorsque, par leur réunion, elles peuvent amener à l'état neutre le corps qui les contient.

249. Aimantation par influence. — Lorsque l'un des pôles d'un aimant, le pôle austral A, par exemple, est placé à une petite distance d'un barreau de fer doux, on constate que celui-ci devient un aimant lui-même, sous l'influence du premier : ses deux extrémités *a*, *b* (fig. 165) attirent la limaille de fer.

De plus, en leur présentant successivement un même pôle d'une aiguille aimantée, on constate que l'extrémité *b*, voisine de A, manifeste les propriétés d'un pôle boréal ; l'extrémité *a*, celles d'un

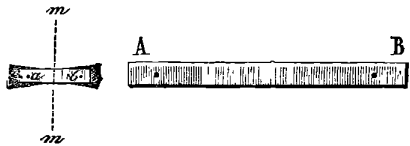


Fig. 165.

pôle austral. — On admet que le fer doux contenait, avant l'expérience, les deux fluides également distribués en tous ses points, et que l'approche du pôle A, repoussant le fluide austral et attirant le fluide boréal, a suffi pour donner à ces fluides le même mode de distribution que dans un aimant véritable. — Mais, dès qu'on éloigne l'aimant A B, l'influence qui séparait les fluides dans le fer doux *ab* étant supprimée, ces fluides obéissent à leurs actions mutuelles, et le fer doux retombe à l'état neutre.

C'est l'aimantation par influence qui permet d'expliquer l'attraction exercée par le pôle d'un aimant sur une pièce de fer doux. — En effet, dès que l'influence du pôle A (*fig. 165*) a déterminé dans le barreau *ab* la formation de deux pôles, l'attraction réciproque des pôles A et *b* l'emporte sur la répulsion qui s'exerce entre A et *a*, à cause de la différence des distances auxquelles ces actions s'exercent. La résultante de ces deux actions est donc une force attractive, qui augmente à mesure qu'on rapproche les deux corps.

Il faut ajouter enfin qu'un morceau de fer doux, tel que *ab*, qui est aimanté par influence, peut exercer lui-même une action semblable sur un autre morceau de fer doux. C'est ainsi qu'on peut suspendre au pôle d'un aimant une file de barreaux de fer, dont chacun s'aimante sous l'influence de celui qui le précède. — C'est ainsi encore que les grains de limaille de fer, en s'attachant autour des pôles d'un aimant, affectent la forme de filaments dont la direction converge vers ces pôles (*fig. 160*).

250. Aimantation permanente de l'acier. — Force coercitive. — Un barreau d'acier trempé, placé dans les mêmes conditions que le barreau de fer doux *ab* (*fig. 165*), ne manifeste d'abord aucune trace d'aimantation par influence. Ce n'est qu'au bout d'un temps assez long, et en le soumettant à des chocs pendant qu'il est en présence de AB, qu'on peut voir s'y développer des pôles. Mais, en revanche, une fois qu'on lui a communiqué ainsi une aimantation sensible, il la conserve même après qu'on l'a éloigné de AB.

On interprète ces résultats en admettant que l'acier trempé se distingue du fer doux par la résistance qu'éprouvent les fluides à s'y mettre en mouvement. Quand il est à l'état neutre, les fluides ne se séparent qu'avec une grande difficulté; mais, l'aimantation une fois développée, ils n'obéissent que très-difficilement aux actions qui tendraient à ramener l'état neutre. — On appelle *force coercitive*, cette résistance que l'acier trempé oppose aux mouvements des fluides magnétiques.

251. Expérience des aimants brisés. — Soit une aiguille d'acier aimantée AB (*fig. 166*), dont nous aurons déterminé le pôle austral A

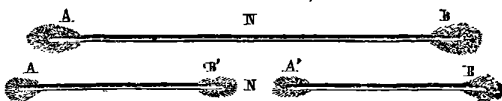


Fig. 166.

et le pôle boréal B, en faisant usage, par exemple, d'un autre aimant mobile sur un pivot. Brisons cette aiguille suivant sa ligne neutre N : nous constaterons que chacun des fragments attire la limaille de fer par ses deux extrémités, et que le fragment de droite a un pôle austral en A et un pôle boréal en B' : le fragment de gauche a de même

un pôle austral en A', un pôle boréal en B. Si l'on vient à briser de même l'un de ces fragments AB', chacun des fragments partiels devient encore un aimant complet, présentant deux pôles et une ligne neutre, et ainsi de suite. — D'après cette expérience, il est impossible d'admettre que, par le fait de l'aimantation de l'aiguille AB, le fluide austral et le fluide boréal se soient *transportés* l'un dans la moitié gauche de cette aiguille, l'autre dans la moitié droite.

Coulomb admet que les fluides ne peuvent se mouvoir que dans de très-petits espaces, qu'il nomme *éléments magnétiques*. Chaque élément contient et *conservé toujours* des quantités égales de l'un et de l'autre fluide : l'aimantation a seulement pour résultat de modifier la distribution des deux fluides dans chacun des éléments successifs, de telle manière que la résultante des actions exercées par eux, sur un corps extérieur, se réduise à deux forces passant, l'une par un point situé vers l'extrémité gauche de l'aiguille, l'autre par un point situé vers l'autre extrémité. — On peut alors s'expliquer, sans difficulté, l'apparition de nouveaux pôles dans les fragments d'un aimant brisé. En effet, chaque fragment comprend toujours un certain nombre d'éléments magnétiques, dans lesquels la distribution des fluides reprend une disposition semblable à ce qu'elle était dans l'aimant total : la résultante des actions de ces fluides peut donc encore se réduire à deux forces, appliquées en deux points voisins des extrémités du fragment, en sorte que celui-ci peut encore avoir deux pôles.

PROCÉDÉS D'AIMANTATION

252. Méthode de la simple touche. — La méthode de la *simple touche*, applicable, par exemple, à l'aimantation des aiguilles, consiste à frotter l'aiguille à aimanter sur l'extrémité d'un barreau puissant, en la faisant glisser suivant sa longueur et toujours dans le même sens. Si l'on a employé, par exemple, le pôle austral du barreau, il se forme un pôle boréal dans la moitié de l'aiguille qui est arrivée la dernière au contact de cette extrémité. — Ce procédé ne développe jamais qu'une aimantation peu énergique.

253. Méthode de la touche séparée. — Pour appliquer la méthode de la *touche séparée*, on installe solidement, sur un plan horizontal, deux aimants puissants AM, BM' (*fig. 167*), qu'on sépare par une règle de bois L, de telle façon que les extrémités de la pièce à aimanter s'ap-

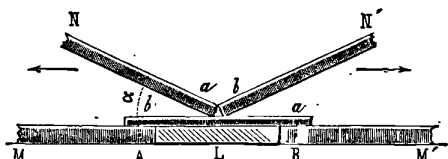


Fig. 167.

puient sur leurs pôles de noms contraires A, B. On applique deux barreaux aN , bN' sur le milieu de la pièce à aimanter, en plaçant leurs pôles a et b respectivement du même côté que les pôles A et B des aimants fixes, et les inclinant de manière que leurs directions fassent, de part et d'autre, des angles d'environ 50 degrés avec l'horizon : on les fait alors glisser en sens contraire, chacun vers l'une des extrémités. On enlève ensuite les deux barreaux, on les reporte au milieu, et l'on recommence un certain nombre de fois la même opération, avec les mêmes précautions. — Il est aisé de voir que, pendant cette opération, les quatre barreaux agissent simultanément, pour donner à la pièce une aimantation de même sens : avec la disposition indiquée sur la figure, son pôle austral sera en a et son pôle boréal en b . — On peut ainsi communiquer, par exemple, aux aiguilles de boussole et aux lames d'acier, une aimantation assez énergique : il est bon d'ailleurs d'exercer les frictions successivement sur les deux faces.

254. Méthode de la double touche. — La pièce à aimanter étant installée sur deux aimants fixes AM, BM' (fig. 168), comme dans la méthode précédente, et les deux barreaux aN et bN' étant séparés par

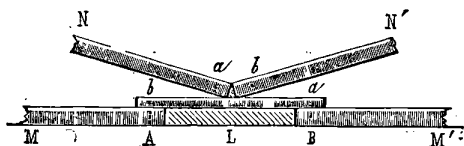


Fig. 168.

une petite cale de bois, on les fait glisser ensemble, et sans les séparer, vers l'une des extrémités de la pièce, puis vers l'autre, et ainsi de

suite : on termine l'opération par l'extrémité opposée à celle vers laquelle on s'était dirigé d'abord, et l'on s'arrête au milieu. Le pôle austral et le pôle boréal se développent respectivement en a et b , comme l'indique la figure. — Ce procédé est beaucoup plus énergique que les deux précédents.

255. Aimantation à saturation. — **Influence de la trempe et de la température.** — Lorsqu'on soumet un barreau d'acier aux procédés d'aimantation les plus puissants, on constate qu'il acquiert d'abord une intensité magnétique très-grande, et variable avec la méthode employée ; mais cette intensité diminue dans les instants qui suivent, et tend, en général, vers un état permanent, toujours le même quelle que soit la méthode dont on ait fait usage. On dit alors que le barreau est aimanté à saturation.

Quant aux conditions desquelles dépend l'intensité magnétique à saturation, la principale semble être le degré de dureté qu'on a donné à l'acier par la trempe. — En général, un même barreau peut acquérir, à saturation, une intensité magnétique d'autant plus grande qu'il a été trempé plus dur, c'est-à-dire qu'il a été trempé à une température plus

élevée. Au contraire, un même barreau, trempé d'abord très-dur et recuit ensuite à différentes températures, puis aimanté à saturation après chaque recuit, acquiert une intensité magnétique d'autant moindre que le recuit a eu lieu à une température plus haute.

Après l'aimantation, les variations de température ont encore une influence sur l'intensité magnétique. — De petites variations de température ne font varier que passagèrement l'intensité; mais un aimant porté au rouge perd d'une manière définitive toute trace d'aimantation.

256. **Armures et contacts des aimants.** — Les armures des aimants sont des pièces de fer doux, qu'on laisse en présence des aimants, afin de combattre les causes qui tendraient à diminuer l'aimantation. — Ainsi, pour conserver les barreaux aimantés, on les place, deux par deux, dans une même boîte, parallèlement et les pôles de noms contraires en regard les uns des autres (fig. 169).



Fig. 169.

On interpose de petites cales de bois, pour s'opposer à leur rapprochement, et l'on applique, sur leurs deux extrémités, de petites pièces de fer doux *ab*, *ab* : ces armures s'aimantent, sous l'influence concordante des deux barreaux; leur aimantation réagit à son tour sur les fluides des barreaux, et tend à conserver l'intensité magnétique.

Les aimants naturels sont ordinairement assujettis entre des armures de fer doux, qui y restent constamment fixées, et qui ont le même effet.

On donne le nom de *contact* à une pièce de fer doux *C*, qui s'applique à la fois sur les deux pôles des aimants en fer à cheval (fig. 170); elle sert à maintenir séparés les fluides de l'aimant et à suspendre des poids qu'on lui fait supporter. L'action de chacun des pôles sur cette pièce tendant à accroître l'aimantation développée par l'autre, l'aimant peut alors porter une charge qui dépasse de beaucoup le double des poids que supporterait un seul pôle (*).

M. Jamin a construit récemment des aimants en fer à cheval, dont la puissance dépasse tous ceux qu'on avait construits jusqu'alors. — Pour former un de ces aimants, on aimante séparément, jusqu'à saturation, un certain nombre de lames d'acier trempé : on les place les unes

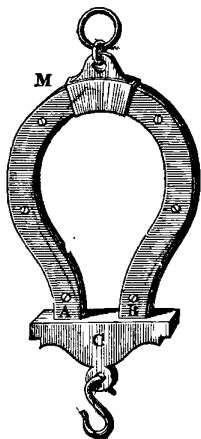


Fig. 170.

(*) L'expérience montre que, si l'on se donne à nourrir l'aimant, c'est-à-dire

dans les autres, de manière à en former un fer à cheval dont les extrémités sont maintenues par des armures de fer doux, assujetties dans une position fixe par des brides de cuivre.

MAGNÉTISME TERRESTRE

257. Méridien magnétique. — Définition de la déclinaison et de l'inclinaison. — Lorsqu'un aimant est assujetti de manière à se mouvoir librement dans un plan horizontal, autour de son milieu, il se place, sous l'action de la terre, dans une position telle que la ligne de ses pôles prenne une direction déterminée, voisine de la ligne nord-sud (245). — On appelle *méridien magnétique* le plan vertical qui passe par la ligne des pôles d'un semblable aimant, lorsqu'il est en équilibre.

Pour déterminer le méridien magnétique, il est peu commode de se servir de barreaux aimantés, dont la largeur rend toujours un peu incertaine la position exacte de la ligne des pôles. On emploie plutôt des aiguilles taillées en forme de losange (*fig. 165*), et portées par un pivot vertical, sur lequel elles s'appuient par une petite chape d'agate fixée en leur milieu. On peut alors admettre que la ligne des pôles coïncide avec la ligne des pointes NS. — Ces aiguilles sont en acier : on les a d'abord *trempées* à une haute température, puis *recuites* à une température moins élevée, pour ne leur laisser qu'une force coercitive convenable (255) : on les a ensuite aimantées. Pour distinguer les deux pôles l'un de l'autre, on conserve ordinairement, sur la moitié qui se dirige vers le nord, la teinte bleue que l'aiguille a prise pendant le recuit, et qui est due à une oxydation superficielle : on enlève cet oxyde dans la moitié qui se dirige vers le sud.

Une semblable aiguille, mobile *dans un plan horizontal* autour de son milieu, ne prend pas, en général, rigoureusement la direction du nord au sud : elle fait avec cette direction un angle AON (*fig. 171*), qu'on appelle la *déclinaison* du lieu. — On voit d'ailleurs que cet angle mesure l'angle dièdre formé par le méridien magnétique et le méridien géographique.

La déclinaison d'un lieu est dite *orientale* lorsque le pôle austral de l'aiguille se porte à l'est du méridien magnétique; *occidentale*, lorsque le pôle austral se porte à l'ouest du méridien magnétique.

Soit maintenant une aiguille aimantée AB (*fig. 172*), mobile *dans un*

d'augmenter progressivement les poids qu'il soutient, on peut arriver à une charge totale de plus en plus considérable. — Cependant, si l'on dépasse la charge-limite que l'aimant peut porter, de manière à détacher le contact, l'intensité magnétique devient tout à coup moindre qu'elle n'était primitivement : il faut recommencer à le nourrir, avec une charge moindre, pour lui rendre peu à peu sa force.

plan vertical autour d'un axe horizontal mn qui la traverse en son milieu. — Si l'on oriente le plan que décrit l'aiguille suivant le méridien ma-

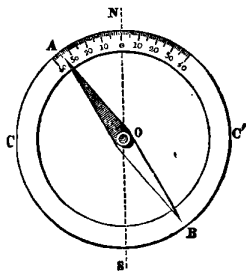


Fig. 171.

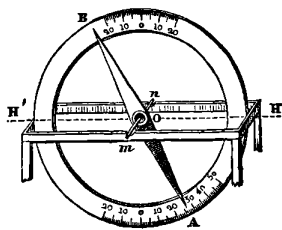


Fig. 172.

gnétique, l'expérience montre que, dans la plupart des points du globe, l'aiguille prend une direction inclinée BA . — On nomme *inclinaison* d'un lieu *l'angle aigu* AOH que fait la moitié australe d'une aiguille aimantée, mobile dans le plan du méridien magnétique, avec la ligne horizontale $H'H$ menée dans ce plan.

258. **Boussoles.** — Lorsqu'on connaît, au moyen des observations astronomiques, par exemple, le méridien géographique d'un lieu, on emploie, pour déterminer successivement la déclinaison et l'inclinaison de ce lieu, des instruments qu'on désigne sous le nom de *boussole de déclinaison* et *boussole d'inclinaison*.

D'après la définition même de la déclinaison, la *boussole de déclinaison* doit se composer essentiellement d'une aiguille aimantée, parfaitement mobile autour de son milieu, et d'un cercle horizontal divisé CC' dont le centre coïncidera avec le milieu de l'aiguille (*fig. 171*). On orientera ce cercle de manière que le diamètre passant par le zéro soit dans le méridien géographique; et la position de l'aiguille donnera, au moyen d'une simple lecture, la déclinaison AON du lieu.

La *boussole d'inclinaison* se compose essentiellement d'une aiguille mobile autour d'un axe horizontal mn (*fig. 172*), et d'un cercle divisé vertical dont le centre est exactement sur l'axe de rotation de l'aiguille. On oriente le plan du cercle dans le méridien magnétique, ce qui est facile si l'on connaît le méridien géographique et la déclinaison du lieu. — La position de l'extrémité australe de l'aiguille donne, au moyen d'une simple lecture, l'inclinaison HOA du lieu.

Inversement, on emploie, en mer, la *boussole marine* pour déterminer le *méridien géographique* ou la direction nord-sud, en un point dont on connaît approximativement la déclinaison. — Cette boussole, dont la construction se rapproche de celle de la boussole de déclinaison, se compose

d'une aiguille aimantée mobile sur un pivot vertical, au centre d'une boîte qui se place toujours d'elle-même dans une position horizontale, malgré les oscillations du navire : ce dernier résultat s'obtient au moyen d'une suspension de Cardan. Une ligne fixe a été tracée sur le fond de la boîte, c'est la *ligne de foi*, qu'on installe dans la direction de la quille du navire; une lame horizontale circulaire de talc, portant une division en degrés et la rose des vents, est fixée à l'aiguille elle-même. On peut donc observer, à chaque instant, l'angle que fait la ligne de foi avec l'aiguille, c'est-à-dire l'angle formé par la quille du navire avec le méridien magnétique. Si donc on connaît la déclinaison du lieu, il suffit de l'ajouter à l'angle observé, ou de l'en retrancher, selon les cas, pour obtenir l'angle que fait l'axe du navire avec le méridien géographique.

259. Variations de la déclinaison et de l'inclinaison, en un même lieu. — La déclinaison, en chaque point du globe, est soumise à des variations continues. 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, quand la température s'abaisse. Ces écarts sont plus grands pendant la saison chaude que pendant l'hiver.

En évaluant chaque année, à Paris, depuis 1580, la *déclinaison moyenne annuelle*, on a constaté qu'elle a subi des variations remarquables. En 1580, la déclinaison était *orientale* et égale à $41^{\circ} 30'$; elle a été en diminuant jusqu'en 1663, où elle est devenue nulle; elle est alors devenue *occidentale*, et a été en croissant jusqu'en 1814, où elle a atteint un maximum égal à $22^{\circ} 24'$; depuis cette époque, elle a été en décroissant, et, en 1876, la déclinaison occidentale moyenne a été d'environ 17° . — Ces variations, constatées également dans les autres points du globe où l'on a pu faire des observations suivies, ont reçu le nom de *variations séculaires* : les données que nous possédons à cet égard ne sont pas encore assez nombreuses pour qu'on en puisse conclure la loi à laquelle elles sont soumises.

L'*inclinaison* éprouve des variations semblables à celles de la déclinaison, mais leur amplitude est toujours moins considérable. — Leur valeur absolue est d'ailleurs moins bien connue, et plus difficile à évaluer, à cause des frottements de l'axe de rotation de l'aiguille sur ses supports. — En 1876, l'inclinaison moyenne à Paris a été un peu supérieure à 65° et demi.

Enfin, on a donné le nom de *variations accidentelles* ou d'*orages magnétiques* à de véritables perturbations, survenant brusquement dans les mouvements de l'aiguille aimantée. Les recherches faites en des points distribués sur toute la surface du globe, semblent indiquer que ces orages ne sont pas locaux, mais qu'ils apparaissent simultanément, avec des

intensités diverses, en un grand nombre de points. La cause qui les produit ne peut donc pas être attribuée à des phénomènes qui s'accompliraient dans l'atmosphère, à une petite distance de la surface du globe.

260. Aimantation par l'action de la terre. — L'action magnétique du globe étant comparable à celle d'un aimant, son influence doit pouvoir développer l'aimantation dans le fer doux ou dans l'acier.

L'expérience montre que, si l'on place une barre de fer dans la direction de l'aiguille d'inclinaison, c'est-à-dire dans la direction même où l'action de la terre tendrait à placer la barre si elle était aimantée, elle s'aimante par influence. Dans notre hémisphère, l'extrémité inférieure de la barre manifeste les propriétés d'un pôle austral ; l'extrémité supérieure, celles d'un pôle boréal. — Mais, comme le fer n'a pas de force coercitive, l'aimantation se reproduit en sens inverse, si l'on retourne la barre bout pour bout ; l'aimantation disparaît, si on place la barre dans une direction perpendiculaire. — Toutefois une barre de fer ordinaire, qui possède toujours une certaine force coercitive, peut acquérir un certain degré d'aimantation permanente, quand, après l'avoir placée parallèlement à l'aiguille d'inclinaison, on la frappe avec un marteau à l'une de ses extrémités. — Des faisceaux de fils de fer, placés de la même manière, acquièrent, quand on les tord, une aimantation durable.

Enfin des barreaux d'acier, maintenus dans cette même direction et soumis à des frottements ou à des chocs, acquièrent une aimantation qui persiste indéfiniment, quand ils sont fortement trempés. — C'est ainsi qu'on peut s'expliquer comment les limes, et tous les outils d'acier qui sont, par leurs usages, soumis à de fréquentes vibrations, donnent presque toujours des signes d'aimantation.

CHAPITRE III

GALVANISME. — PILE DE VOLTA.

261. Première expérience de Galvani. — L'expérience célèbre de Galvani, qui le conduisit, en 1786, à la découverte de la branche de l'électricité qu'on désigne sous le nom de *galvanisme*, est ordinairement reproduite dans les cours sous la forme suivante :

Une grenouille ayant été récemment tuée, on coupe en deux la colonne vertébrale, vers la région lombaire, et l'on dépouille toute la partie du corps qui est au-dessous de cette section : on prend alors un arc métal-

lique COZ (fig. 173) formé d'un fil de cuivre C et d'un fil de zinc Z, qu'on réunit en O. On engage l'un de ces fils C sous le faisceau des nerfs lom-

baire, comme le montre la figure ; dès qu'on vient à toucher, avec l'autre fil Z, les muscles de l'une des cuisses, on les voit se contracter. Avec certaines grenouilles, le même phénomène peut être reproduit pendant plusieurs heures.

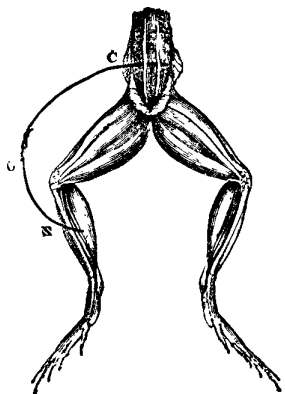


Fig. 175.

Galvani expliqua ces contractions en considérant les muscles comme de véritables condensateurs, assimilables à la bouteille de Leyde ; pour lui, ces condensateurs étaient chargés naturellement de l'un des fluides électriques à l'intérieur, c'est-à-dire dans les points où pénètrent les nerfs, et de l'autre fluide à l'extérieur : l'arc métallique jouait donc simplement le rôle d'un *excitateur*, qui produisait la décharge en mettant en communication les deux armatures. La

décharge une fois effectuée, chacun des fluides se reproduisait presque instantanément dans les muscles. — Cependant, une étude plus attentive du phénomène ayant paru indiquer quelques différences entre ces fluides et les fluides électriques ordinaires, on leur donna le nom de *fluides galvaniques*, et cette partie nouvelle de la science prit le nom de *galvanisme*.

262. Expériences de Volta. — En reproduisant l'expérience de Galvani et en variant les conditions, Volta fut amené à considérer comme *nécessaire* l'emploi de *deux métaux différents*, pour former l'arc métallique, et à proposer une théorie nouvelle, d'après laquelle l'électricité se produirait, en général, au contact de deux corps de natures différentes, par une *force électro-motrice* spéciale. Les fluides, séparés en O (fig. 173), se recombineraient ensuite à travers les muscles et les nerfs, et donneraient ainsi naissance aux contractions observées.

Pour démontrer la production des fluides électriques au contact de métaux de natures différentes, Volta fit les expériences suivantes. — Une lame de zinc Z ayant été soudée à une lame de cuivre C, il prit à la main l'extrémité zinc, et appliqua l'extrémité cuivre sur le plateau supérieur de l'électroscope condensateur (fig. 174). Le plateau inférieur ayant été mis en communication avec le sol, il observa que l'appareil se chargeait comme avec une source d'électricité négative : d'après sa théorie, le contact du zinc et du cuivre, au point de soudure, développe donc une force électro-motrice, qui charge le cuivre d'électricité négative. — Prenant

alors la lame par l'extrémité cuivre, et touchant l'électroscope avec l'extrémité zinc, il n'observa pas de charge sensible : c'est que, suivant la même théorie, la lame de zinc étant placée entre le cuivre qui lui est soudé et le cuivre du plateau, les deux forces électromotrices agissent en sens contraire et produisent un effet résultant nul. — Au contraire, si dans cette même expérience on place, entre le zinc et le plateau, une feuille de papier mouillée avec de l'eau acidulée, la lame agit sur l'électroscope comme une source d'électricité positive : selon Volta, la feuille de papier, empêchant alors le contact direct entre le cuivre du plateau et le zinc, et ne donnant d'ailleurs naissance elle-même qu'à une force électromotrice très-faible, permet à la force électromotrice qui se développe au point de soudure de se manifester : elle agit ensuite comme un conducteur, transmettant au plateau l'électricité positive du zinc.

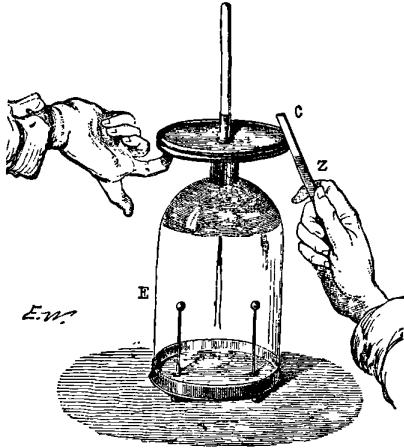


Fig 174.

263. **Développement d'électricité par les actions chimiques.** — Si les résultats des expériences précédentes sont incontestables, il n'en est pas de même des deux théories émises, l'une par Galvani, l'autre par Volta : l'une et l'autre ont donné lieu aux objections les plus sérieuses. La plupart des physiciens s'accordent aujourd'hui à attribuer le développement de l'électricité, dans les phénomènes qui viennent d'être indiqués, à des actions chimiques.

L'expérience montre que, si l'on plonge une lame métallique dans un acide qui puisse l'attaquer, par exemple une lame de zinc dans de l'acide sulfurique étendu, le métal se charge d'électricité négative ; il suffit, pour le vérifier, de mettre la lame de zinc en communication avec un électroscope. En même temps, le liquide se charge d'électricité positive, comme on le reconnaît en y plongeant en même temps un corps moins attaqué que le zinc, une lame de cuivre par exemple, et mettant cette lame en communication avec un électroscope. — Or, il est aisé de voir que, dans les expériences de Volta, on n'a observé de développe-

ment d'électricité que dans les cas où il a pu se produire une action chimique semblable. Dans la première expérience, l'humidité acide dont les mains sont toujours imprégnées suffit pour charger le zinc d'électricité négative, que le cuivre transmet à l'électroscope : Volta a d'ailleurs observé lui-même que la charge de l'instrument est beaucoup plus forte quand les doigts sont imprégnés d'eau acidulée ; quant au fluide positif développé dans le liquide, il s'écoule dans le sol par le corps de l'expérimentateur. Dans la seconde expérience, il n'y a pas d'électricité développée, et, tant qu'on n'interpose pas de papier acidulé entre le zinc et le plateau, il ne peut y avoir, en effet, aucune action chimique ; mais, dès que le papier imprégné d'eau acidulée est placé entre le plateau de l'électroscope et le zinc, le liquide se charge d'électricité positive, qu'il transmet au plateau, et le fluide négatif développé dans la lame de zinc s'écoule dans le sol par le cuivre et par le corps de l'expérimentateur.

De même, dans l'expérience de Galvani (261), le développement d'électricité qui produit les contractions de la grenouille doit être attribué principalement à l'action des liquides animaux, sur le métal le plus attaqué de l'arc par lequel on réunit les nerfs et les muscles (*).

264. **Pile de Volta.** — Quoi qu'il en soit de la valeur de la théorie de Volta, elle l'a conduit à imaginer une pile construite dès 1794, et qui

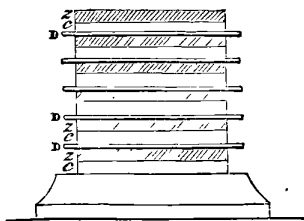


Fig. 175.

doit être considérée comme l'origine de toutes les autres. — Volta formait une colonne verticale en superposant successivement (fig. 175) un disque de cuivre *c*, un disque de zinc *z*, et une rondelle de drap *D* imprégnée d'eau acidulée : il répétait ensuite un certain nombre de fois la même succession, et terminait par un disque de zinc. Afin de mieux assurer le contact du cuivre et du zinc,

il soudait ensemble les disques de cuivre et de zinc contigus, dont l'ensemble constituait ce qu'il appelle un *couple*.

Or, si la pile ainsi construite est bien isolée, l'expérience montre que l'extrémité zinc se charge d'électricité positive, et l'extrémité cuivre d'électricité négative. — Quant à la tension des deux extrémités, elle croît à peu près proportionnellement au nombre des couples. Ces deux extrémités prennent le nom de *pôles de la pile*.

(*) On doit ajouter cependant que, d'après les travaux des physiiciens modernes, la grenouille ne se comporte pas absolument comme un simple électroscope : elle peut également produire une certaine quantité d'électricité, mais cette quantité est très-faible part dans la production des contractions observées par Galvani.

265. Actions chimiques produites dans la pile de Volta.

— En ayant égard aux actions chimiques qui se produisent dans cette pile, on se rend facilement compte du sens dans lequel les fluides sont séparés. L'électricité se produisant par l'action de l'eau acidulée sur le zinc, le zinc inférieur *z* (fig. 175) se charge de fluide négatif, et le liquide de la rondelle de drap D se charge de fluide positif, qu'il communique au disque de cuivre suivant : il en est de même à chacune des surfaces de contact du zinc avec l'eau acidulée, et il suffit d'admettre que les fluides séparés, dans toute l'étendue de la pile, par toutes ces actions simultanées, soient conduits, en sens contraire, jusqu'à ses extrémités, pour concevoir que l'extrémité inférieure, dans la figure 175, devienne un *pôle négatif*, et l'extrémité supérieure un *pôle positif*.

— Mais il est facile de voir également que le cuivre inférieur pourrait être supprimé sans qu'il y eût rien de changé à la charge de la pile, puisque ce cuivre joue simplement le rôle d'un conducteur qui recueille l'électricité du zinc : de même le zinc supérieur, qui n'est pas en contact avec l'eau acidulée, recueille simplement l'électricité que le cuivre a reçue du liquide de la rondelle humide, et il peut également être supprimé.

— Aussi, construit-on souvent la pile de Volta en supprimant ces deux disques extrêmes, et l'on emploie comme lames terminales deux disques simples (fig. 176), l'un de zinc Z, qui est le *pôle négatif*, l'autre de cuivre C, qui est

le *pôle positif*. — Il est d'ailleurs toujours facile de se souvenir que c'est du côté du dernier métal attaqué par l'acide que se trouve le pôle négatif.

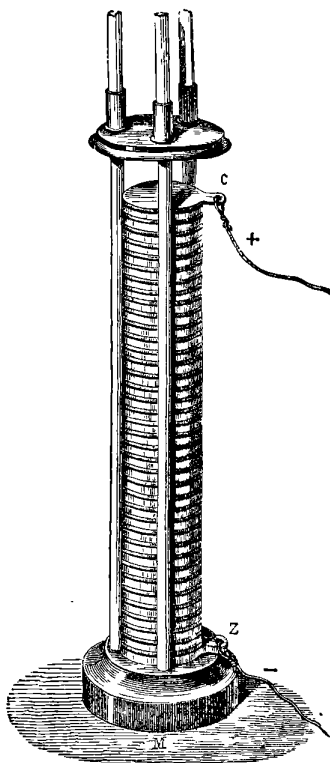


Fig. 176. — Pile de Volta.

266. Courant électrique. — Sens du courant. — Le caractère essentiel des piles, comme sources d'électricité, est la faculté qu'elles

ont de reproduire instantanément les charges électriques qui s'y produisent, dès qu'on vient à enlever ces charges d'une manière quelconque. Il en résulte que, si l'on adapte un fil métallique à chacun des pôles d'une pile, et si l'on réunit ces deux fils à l'autre, il se fait une recombinaison continuelle des fluides dégagés par l'action chimique, et une reproduction incessante de ces fluides. — On a donné le nom de *courant électrique* à ce mouvement continu, qui se produit dans le circuit formé par la pile et par les conducteurs qui réunissent ses deux pôles. — Dans la théorie des deux fluides, il faut admettre que, *dans le conducteur interpolaire*, le fluide positif se meut incessamment du pôle positif au pôle négatif de la pile, et que le fluide négatif se meut en sens contraire. — On est convenu d'appeler spécialement *sens du courant* le sens dans lequel circule le fluide *positif*; on regarde donc le *courant* comme allant *du pôle positif au pôle négatif, dans la partie du circuit qui est extérieure à la pile elle-même*.

L'électricité, considérée comme se mouvant ainsi dans un circuit fermé, a reçu le nom d'*électricité en mouvement*, ou d'*électricité dynamique*.

MODIFICATIONS DE LA PILE DE VOLTA

267. Pile à auge. — La pile de Volta a l'inconvénient de se dessécher assez promptement, à cause de la pression exercée sur les rondelles humides; aussi perd-elle rapidement de son intensité. La pile à auge (*fig. 177*), imaginée par Cruikshank, n'est qu'une pile de Volta placée

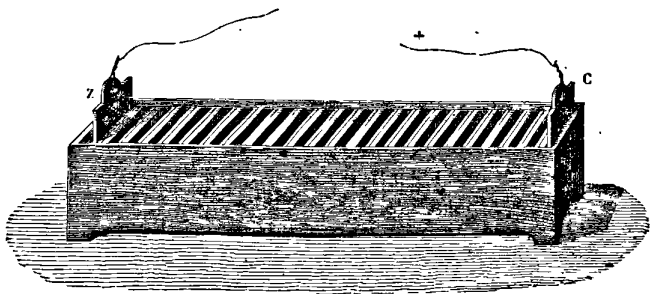


Fig. 177. — Pile à auge.

horizontalement : les couples métalliques, formés chacun d'une lame de zinc et d'une lame de cuivre soudées ensemble, sont placés verticalement dans une auge, et les rondelles de drap mouillé sont remplacées par les petites couches intermédiaires de l'eau acidulée qu'on verse dans l'auge elle-même : aux extrémités, sont une lame de cuivre et une lame de zinc, qui forment le pôle positif et le pôle négatif, comme il a été dit plus haut (265).

268. **Pile de Wollaston.** — Dans la pile de Wollaston, chaque lame de cuivre C est repliée (fig. 178) de manière à se trouver en présence des deux faces de la lame de zinc Z : les deux lames sont séparées par de petites cales de bois l, l' ; chaque élément de pile ainsi formé est placé dans un vase distinct, contenant de l'eau acidulée. La lame de cuivre recueille le fluide positif qui se produit dans le liquide, des deux côtés de la lame de zinc.

Avec un certain nombre d'éléments semblables (fig. 179), on forme une pile en réunissant, par une lame métallique, le zinc de chaque élément au cuivre de l'élément suivant : le pôle négatif est toujours au dernier zinc. Afin de pouvoir plus facilement mettre tous les éléments à la fois en

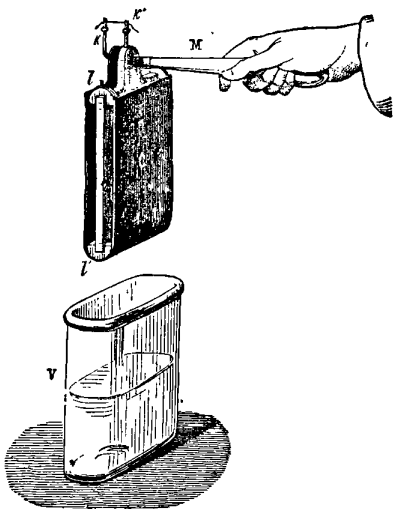


Fig 178.

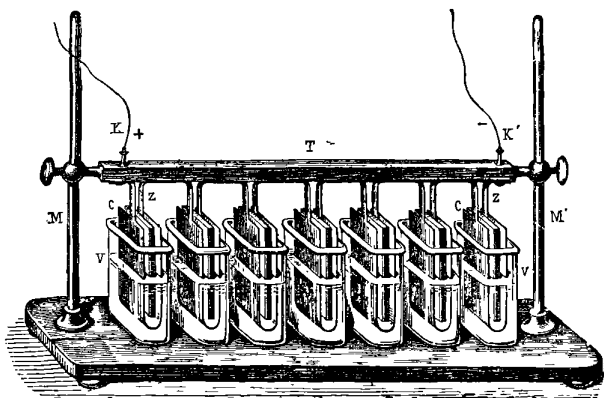


Fig. 179. — Pile de Wollaston.

IRIS - LIÉLIAD - Université Lille 1
 activité et arrêter ensuite l'action, on les fixe tous à une même traverse

de bois, que l'on peut faire monter ou descendre le long des tiges M, M'.

269. **Pile de Münch.** — La pile de Münch (fig. 180) n'est guère qu'une modification de la pile de Wollaston, dans laquelle les éléments, présentant d'ailleurs quelques particularités quant à leur emboîtement réciproque, sont assujettis entre des traverses de bois, de manière

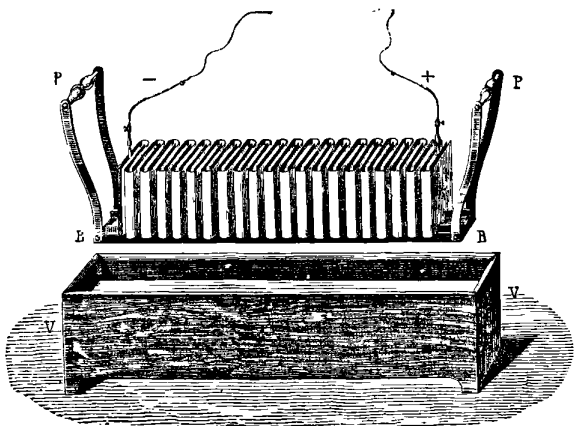


Fig. 180. — Pile de Münch.

qu'on puisse les plonger tous à la fois dans une même auge. Deux poignées P, P' permettent de retirer la pile du liquide et d'arrêter l'action de l'acide sur le zinc.

PILES A DEUX LIQUIDES

270. **Piles à deux liquides, à courant constant.** — Lorsqu'on fait fonctionner pendant quelque temps les piles précédentes, on observe toujours une diminution graduelle dans l'intensité des effets qu'elles produisent. — Cette diminution doit être attribuée, d'une part, à l'appauvrissement progressif du liquide en acide; d'autre part, à la présence des bulles de gaz hydrogène qui proviennent de la décomposition de l'eau. L'étude des piles à deux liquides va nous prouver que, dans ces piles, les modifications qui tendent à faire disparaître l'un ou l'autre de ces effets tendent en même temps à rendre le courant constant.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1
271. **Pile de Daniell.** — L'élément de pile de Daniell se compose, sous sa forme la plus simple, des parties suivantes. Le pôle négatif est

toujours formé par une lame de zinc Z (*fig. 181*), amalgamée à sa surface et plongeant dans l'acide sulfurique étendu que contient le vase V. Le pôle positif est formé par une lame de cuivre C; mais, au lieu de plonger directement dans l'acide sulfurique, cette lame est placée dans un vase de terre poreuse D, qui plonge lui-même dans l'acide sulfurique et qui contient une solution saturée de sulfate de cuivre.

Le zinc amalgamé a, sur le zinc ordinaire, entre autres avantages, celui de ne pas être attaqué tant que la communication entre les deux pôles n'est pas établie : le métal et l'acide ne sont donc pas inutilement consommés. — Voici maintenant les réactions principales qui se passent dans un semblable couple, lorsque le circuit est fermé.

L'eau est décomposée par le zinc, en présence de l'acide sulfurique : l'oxygène se porte sur le zinc, et l'oxyde produit se combine avec l'acide sulfurique pour former du sulfate de zinc. L'hydrogène, mis en liberté, se porte du côté de l'autre pôle, et, rencontrant la solution de sulfate de cuivre, il se substitue au métal de ce sel, en donnant naissance à un dépôt de cuivre qui va se former sur la lame de cuivre intérieure. La présence du sulfate de cuivre a donc pour premier effet d'empêcher le dégagement gazeux, autour du pôle positif. — En outre, pour un équivalent d'acide sulfurique employé à former du sulfate de zinc, il y a un équivalent d'hydrogène transporté sur le sulfate de cuivre; par suite, un équivalent d'acide sulfurique hydraté est reproduit : la liqueur ne s'appauvrit donc pas en acide, pourvu qu'on ait soin d'entretenir la solution de sulfate de cuivre à l'état de concentration, en y introduisant des cristaux de sulfate de cuivre.

272. Pile de Bunsen. — Dans l'élément de pile de Bunsen (*fig. 182*), le pôle négatif est encore une lame de zinc amalgamée Z, plongeant dans un vase V qui contient de l'acide sulfurique étendu; le pôle positif est un cylindre de *charbon de cornue* C (*), placé au centre d'un vase poreux D qui contient lui-même de l'acide azotique.

(*) Le *charbon de cornue* est un charbon qui se forme dans les cornues où

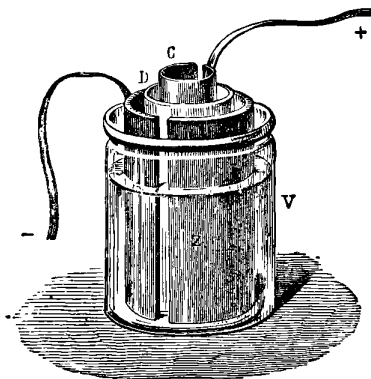


Fig. 181. — Élément de pile de Daniell.

Ici, comme dans l'élément de Daniell, le zinc amalgamé n'est pas attaqué tant que le circuit n'est pas fermé. Mais, dès que la communication

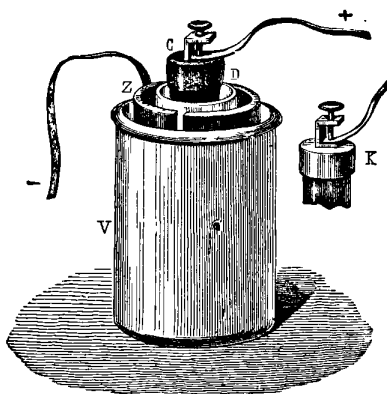


Fig. 182. — Élément de pile, de Bunsen.

entre les deux pôles est établie, le zinc, en présence de l'acide sulfurique, décompose l'eau : il se forme du sulfate de zinc. L'hydrogène, mis en liberté, se porte vers le pôle positif et agit sur l'acide azotique, auquel il enlève une partie de son oxygène pour former de l'eau. L'acide azotique est ainsi transformé en combinaisons moins riches en oxygène, et parmi lesquelles domine l'acide hypoazotique, qui se dissout dans le liquide. Les dégagements gazeux sont donc évités.

On ne prend, comme on le voit, aucune précaution contre la disparition graduelle de l'acide sulfurique libre ; aussi, les piles formées avec ces éléments ne conservent-elles pas leur intensité pendant un temps aussi long que les piles de Daniell.

EFFETS PRODUITS PAR LES COURANTS

273. Effets calorifiques des courants. — Lorsqu'on ferme le circuit d'une pile au moyen d'un fil métallique fin, il se produit dans ce fil une élévation de température, qui peut aller jusqu'à l'incandescence ; si l'on diminue progressivement la longueur du fil que le courant doit traverser, on peut même arriver à le fondre.

Pour produire des effets de ce genre, l'expérience montre que les conditions les plus favorables sont celles où l'on opère avec des éléments offrant une surface assez considérable, tels que ceux de Wollaston. A défaut d'éléments offrant une grande surface, on peut placer parallèlement plusieurs éléments de Bunsen, que l'on réunit *par les pôles de même nom* : on conçoit facilement que dix éléments, réunis de cette manière, se comportent comme le ferait un seul élément dont la surface serait dix fois plus grande.

On distille la houille pour obtenir le gaz d'éclairage : il est inattaquable par les acides, et conducteur de l'électricité.

274. **Effets lumineux. — Lumière électrique.** — Soient deux cônes de charbon de cornue P, N (fig. 185), assujettis dans des montures métalliques isolées, auxquelles on pourra adapter les fils qui communiquent avec les pôles d'une pile. Lorsqu'on approche lentement les deux charbons l'un de l'autre, on constate qu'il faut les amener presque au contact pour obtenir une étincelle; mais, dès que cette étincelle s'est produite, on peut les éloigner beaucoup plus, sans qu'il cesse de jaillir entre eux une lumière vive et continue. — Cette expérience, faite pour la première fois par Davy, est devenue l'origine de la *lumière électrique*, dont les usages acquièrent chaque jour une nouvelle importance.

Mais, quelque compactes que soient les charbons employés, ils brûlent, et leurs extrémités se désagrègent pendant l'expérience, en sorte que, si l'on n'avait pas soin de les rapprocher, le courant serait sans cesse interrompu. — On emploie aujourd'hui des appareils *régulateurs*, effectuant ce rapprochement à mesure qu'il devient nécessaire, sans que l'opérateur soit obligé d'intervenir. — Avec une pile de 25 à 30 éléments de Bunsen, on obtient déjà des effets lumineux assez satisfaisants : avec 50 ou 60 couples, il se produit une lumière assez intense pour éclairer à une distance considérable, et dont l'éclat, quand on la regarde directement, rappelle celui du soleil.



Fig. 185.

275. **Propriétés de l'arc voltaïque.** — En projetant sur un écran l'image des cônes incandescents, grossie au moyen d'une lentille, on constate que, pendant le passage du courant, la baguette positive se creuse à son extrémité (fig. 184) : des particules de charbon sont arrachées, dont les unes brûlent dans l'air, les autres se transportent sur l'extrémité incandescente de la baguette négative. — Quand on place, dans une cavité pratiquée à l'extrémité du charbon positif, un fragment de métal, on constate que des particules métalliques en fusion viennent se rendre sur le charbon négatif, et la lumière prend une couleur qui dépend de la nature du métal employé. — On est ainsi conduit à admettre que les charbons formant les deux pôles sont réunis par une sorte d'arc de par-

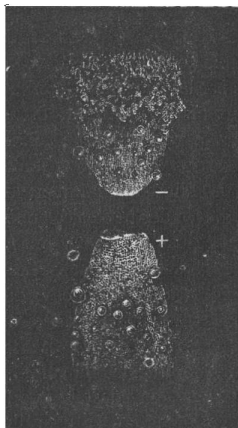


Fig. 184.

ticules matérielles, qui constitue un conducteur intermédiaire, et qui a reçu le nom d'*arc voltaïque*.

Cet arc est toujours à une température extrêmement élevée. Davy était déjà parvenu à y fondre du platine, du quartz, de la chaux, et à y brûler du diamant. — Despretz, en opérant dans le vide, a pu vaporiser dans l'arc voltaïque les diverses variétés de charbon, et le diamant lui-même : des baguettes de charbon ont été ramollies, au point de se courber et de se souder entre elles.

276. Effets physiologiques des courants. — Au moment où l'on met les deux pôles d'une pile en communication avec les organes d'un animal vivant, ou avec les organes d'un animal mort depuis peu, il se produit une contraction musculaire d'autant plus forte que le courant est plus intense. La contraction se renouvelle au moment où l'on interrompt le circuit. — De ces deux contractions, que l'on observe, la première à l'instant de l'établissement du circuit, la seconde au moment de la rupture, l'une ou l'autre peut manquer de se produire, quand on opère avec des courants très-faibles ; mais, avec un courant assez intense, elles se produisent toujours toutes deux.

Lorsqu'on opère sur un animal vivant ou sur l'homme, ces commotions sont ordinairement accompagnées d'une sensation plus ou moins pénible. — La commotion d'une pile de Bunsen de cent éléments est déjà redoutable pour l'homme ; celles de piles plus puissantes peuvent aller jusqu'à foudroyer un bœuf.

EFFETS CHIMIQUES

277. Décomposition de l'eau. — La décomposition de l'eau par la pile peut être considérée comme le type des actions chimiques produites par les courants. — Un vase V (*fig.* 185) reçoit, par sa partie inférieure, deux fils de platine A, B, isolés dans une couche de résine : on verse, dans ce vase, de l'eau acidulée avec de l'acide sulfurique, et l'on place, au-dessus des fils A et B, de petites éprouvettes pleines d'eau, C, D. Dès qu'on fait communiquer les pôles de la pile avec les fils de platine, au moyen des petites colonnes métalliques P, P', on voit se produire, à la surface des fils A, B, une multitude de petites bulles gazeuses, qui s'élèvent dans les éprouvettes : du côté du pôle négatif, il se dégage *uniquement de l'hydrogène* ; du côté du pôle positif, *uniquement de l'oxygène*. Si maintenant on mesure les volumes des deux gaz, en ayant soin de placer les petites cloches sur une cuve à eau où l'on puisse amener le niveau intérieur du liquide sur le même plan horizontal que le niveau extérieur, on constate que le volume de l'hydrogène est double de celui de l'oxygène. — La quantité de gaz produite, en un temps déterminé, peut servir de mesure à l'intensité du courant ; de là, le nom de *voltamètre*, qui a été donné à cet appareil.

278. **Décomposition des combinaisons chimiques en général.** — **Corps électropositifs et électronégatifs.** — La plupart des combinaisons chimiques subissent, quand on y fait passer un courant suffisamment intense, une décomposition semblable à celle de l'eau. Or, les attractions électriques s'exerçant entre les corps chargés d'électricités contraires, on a été conduit à admettre que, au moment de la décomposition, les éléments qui se portent vers le pôle négatif sont chargés d'électricité positive; ceux qui se portent vers le pôle positif, d'électricité négative: on dit donc que les premiers sont *électro-positifs*, les seconds *électronégatifs*.

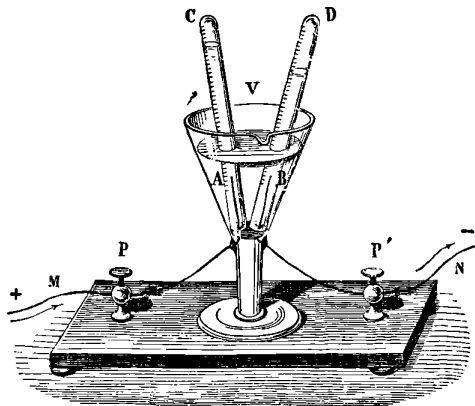


Fig. 185. — Voltamètre.

Mais il faut bien remarquer que l'une ou l'autre de ces dénominations ne peut pas être appliquée à tel ou tel corps d'une manière absolue: un même corps peut se comporter comme électropositif lorsqu'il est combiné préalablement avec tel corps en particulier, et comme électronégatif lorsqu'il est combiné avec tel autre. L'expérience apprend seulement, pour chaque combinaison, lequel des éléments est électropositif *par rapport à l'autre*.

On nomme *électrolyse* l'analyse d'un corps composé, effectuée au moyen d'un courant; *électrode positive*, la surface par laquelle le courant entre dans le corps composé; *électrode négative*, celle par laquelle il en sort. — L'expérience montre que, dans toutes les décompositions de ce genre, les produits de l'électrolyse apparaissent exclusivement *au contact des électrodes*, et jamais dans l'intervalle qui les sépare.

279. **Décomposition des oxydes et des composés binaires.** — C'est en décomposant les alcalis par le passage d'un courant, qu'on a pu démontrer la constitution binaire de ces corps. L'expérience peut s'effectuer de la manière suivante. — Dans un morceau de potasse caustique M (fig. 186), on pratique une cavité, de façon à y placer un globe de mercure N, dans lequel on plonge le fil qui vient du pôle négatif de la pile; le morceau de potasse, un peu hu-

mecté, est placé lui-même sur une lame de platine AB, qui communique avec le pôle positif. On voit se former un amalgame de potassium en N, et il se dégage de l'oxygène au contact de la lame de platine.

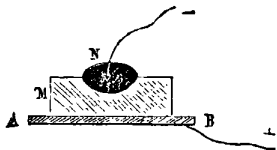


Fig. 186

Lorsqu'on décompose par un courant un oxyde métallique quelconque, ou plus généralement une combinaison binaire formée d'un métalloïde et d'un métal, c'est toujours le métal qui se rend à l'électrode négative. — Les métaux sont donc électropositifs par rapport aux métalloïdes.

280. Décomposition des sels oxygénés. — Lorsqu'on fait passer un courant au travers d'une solution concentrée de sulfate de cuivre dans l'eau, et qu'on prend comme électrodes des lames de platine, on voit le *métal*, c'est-à-dire le cuivre, se déposer sur l'électrode négative. En même temps, l'*acide sulfurique et l'oxygène de la base* se rendent au pôle positif : on voit, à ce pôle, l'oxygène se dégager en petites bulles.

Si l'on fait la même expérience avec du sulfate de potasse, les résultats semblent d'abord tout autres : en plaçant dans un tube en U le liquide, après l'avoir préalablement coloré avec de la teinture de violette, et interposant en N (fig. 187) une petite couche de sable, afin de rendre plus

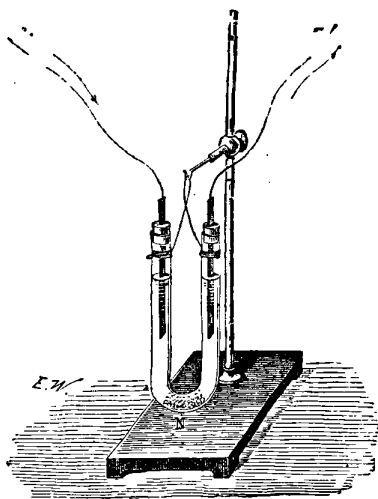


Fig. 187.

difficile le mélange des liquides, on constate, autour de l'électrode négative B, un dégagement d'hydrogène, et l'apparition de la potasse qui verdit le sirop de violette; autour de l'électrode positive A, on obtient, comme avec le sulfate de cuivre, un dégagement d'oxygène, et de l'acide sulfurique qui rougit la teinture. — Il est aisé de voir cependant que ces résultats peuvent être expliqués par une action toute semblable à celle qui se produisait sur le sulfate de cuivre. En effet, sous l'action du courant, le potassium doit se rendre au pôle négatif, comme s'y rendait le cuivre : mais ce métal, se trouvant en présence de l'eau, doit le décomposer en donnant nais-

sance à de la potasse et à de l'hydrogène : c'est donc là une action *secondaire*, postérieure à la décomposition du sel par le courant lui-même.

281. Emploi d'une électrode positive soluble. — Le résultat final de la décomposition d'un sel par un courant est encore modifié, quand on emploie, comme électrode positive, un métal pouvant entrer en combinaison avec les produits de la décomposition qui se portent à cette électrode. — Supposons, par exemple, que, pour décomposer une solution de sulfate de cuivre, on prenne comme électrode positive une lame de *cuivre*, l'autre électrode étant formée par un corps conducteur quelconque. La décomposition du sel s'effectuant comme il a été indiqué (280), il se dépose du cuivre sur l'électrode négative ; en même temps il se produit, sur la lame de cuivre qui forme l'électrode positive, des quantités d'oxygène et d'acide sulfurique correspondant au poids du métal mis en liberté, lesquelles *attaquent le cuivre* de cette électrode et reproduisent un poids de sulfate de cuivre précisément égal à celui qui a été décomposé. La liqueur reste donc à un même état de concentration, et l'effet définitif est le même que si le cuivre, pris à l'électrode positive, était simplement transporté sur l'électrode négative. — Ces remarques trouvent leur application immédiate dans la galvanoplastie.

GALVANOPLASTIE — DORURE, ARGENTURE ET CUIVRAGE GALVANIQUES

282. Galvanoplastie du cuivre. — Pour reproduire en cuivre l'une des faces d'une médaille, par galvanoplastie, on en prend d'abord l'empreinte au moyen d'une substance plastique, qui est ordinairement la

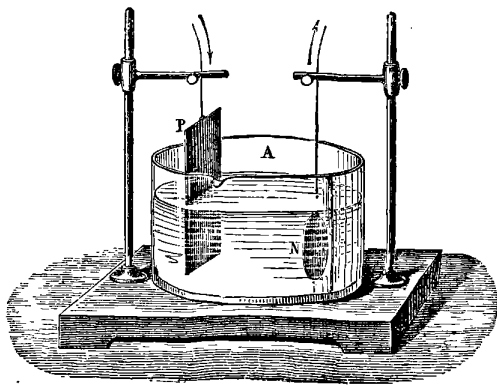


Fig. 188.

gutta-percha : cette empreinte donne en creux les reliefs de la médaille et réciproquement. On l'enduit d'abord d'une couche de plombagine, de

manière à rendre conducteurs tous les points de la surface qui doivent recevoir le dépôt, et on la place à l'extrémité d'un fil communiquant avec le pôle négatif d'un élément de Bunsen, dans une cuve A (*fig.* 188) contenant une solution saturée de sulfate de cuivre : l'électrode positive est formée par une lame de cuivre P : il se forme un dépôt de cuivre en N, comme il vient d'être dit, et en même temps il se dissout en P une égale quantité de même métal (281).

L'intensité du courant doit être réglée avec soin : un courant trop intense donnerait un dépôt cassant et même pulvérulent. — L'expérience a montré que la liqueur doit être légèrement acide.

Quand le dépôt se fait avec une lenteur convenable, il peut rendre jusqu'aux détails les plus délicats d'une planche gravée : de cette manière, on en peut obtenir des reproductions en cuivre, ou *clichés*, en nombre aussi grand qu'on le veut. Lorsque l'un de ces clichés a été usé par des tirages répétés, et qu'il ne donne plus que des épreuves insuffisantes, on peut le mettre de côté, pour en employer un autre qui vaudra ce que valait le premier, et ainsi de suite. — C'est ce que l'on fait aujourd'hui pour le tirage des gravures, dans les ouvrages qui doivent être reproduits à un grand nombre d'exemplaires.

283. Dorure et argenture galvaniques. — La dorure et l'argenture galvaniques s'effectuent dans des solutions de cyanures doubles, d'or et de potassium, ou d'argent et de potassium, que l'on décompose par le courant d'une pile.

Pour dorer ou argenter une pièce de cuivre, il est essentiel de débarrasser d'abord sa surface de toute matière étrangère. — Pour cela, on procède d'abord au *dérochage*. On chauffe la pièce, de manière à décomposer, par la chaleur, les matières grasses dont elle pouvait être souillée ; en même temps, le cuivre se couvre d'une légère couche d'oxyde. On le plonge, encore chaud, dans de l'eau aiguisée d'acide sulfurique, qui enlève l'oxyde noir et ne laisse qu'un peu d'oxyde rouge ; puis on lave à grande eau. — Vient alors le *décapage* : on plonge la pièce dérochée dans de l'acide nitrique faible ; puis, pendant une ou deux secondes, dans de l'acide nitrique concentré ; enfin, on la rince avec soin dans de l'eau pure.

La pièce ainsi préparée est portée au bain d'or ou d'argent : elle est placée au pôle négatif de la pile, au milieu de la solution de cyanures. Le pôle positif est formé par une lame d'or ou par une lame d'argent : à mesure que le métal se dépose sur la pièce, il est remplacé par une quantité égale de même métal, empruntée à l'électrode positive (281).

284. Appareil simple. — Cuifrage galvanique. — On emploie quelquefois, pour la galvanoplastie, une disposition qui fait de la cuve elle-même une sorte de pile de Daniell, dispensant de l'emploi d'une pile extérieure. Pour cela, au milieu de la solution concentrée de sulfate de cuivre, on place un ou plusieurs vases poreux, contenant chacun une

lame de zinc amalgamé et de l'eau aiguisée d'acide sulfurique : on fait communiquer toutes ces lames à une tige métallique, et l'on suspend à cette tige tous les moules sur lesquels doit s'effectuer le dépôt et qui plongent dans le sulfate de cuivre. D'après ce qui a été dit de la pile de Daniell, on voit que le dépôt de cuivre se formera sur ces moules comme il se forme sur le cuivre C de la figure 181. — On donne à cette disposition le nom d'*appareil simple*.

C'est par un procédé semblable que l'on produit aujourd'hui des dépôts de cuivre, destinés à préserver de l'oxydation certaines pièces de fonte, comme les statues, les candélabres, etc. — Avant de plonger les pièces dans le bain de sulfate de cuivre, qui est toujours acide, et qui, en attaquant la surface de la fonte, empêcherait l'adhérence que le cuivre doit offrir avec elle, on les couvre d'un enduit inattaquable aux acides : cet enduit est ensuite recouvert de plombagine ; les pièces ainsi préparées sont placées, entre des vases poreux, au milieu d'un bain de sulfate de cuivre, où elles font partie d'un appareil simple. On obtient ainsi un dépôt dont l'adhérence est suffisante pour les besoins de la pratique.

CHAPITRE IV

ACTIONS DES COURANTS SUR LES AIMANTS. GALVANOMÈTRE.

285. **Expérience d'Ørsted.** — En plaçant un fil métallique dans une direction parallèle à une aiguille aimantée, mobile sur un pivot (*fig. 189*), Ørsted vit l'aiguille abandonner sa position d'équilibre, dès qu'on faisait passer un courant dans le fil.

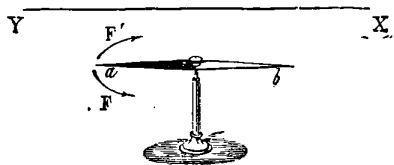


Fig. 189.

Il observa que la déviation dépendait à la fois de la direction du courant et de sa position par rapport à l'aiguille : ainsi, quand le fil XY était placé au-dessus de l'aiguille, selon que le courant allait du sud au nord ou du nord au sud, le pôle austral de l'aiguille était dévié vers l'ouest ou vers l'est. — Lorsqu'on plaçait le fil au-dessous de l'aiguille, les résultats étaient encore intervertis.

Ersted dut se contenter de signaler ces faits, sans indiquer de loi générale qui permit de les relier entre eux.

286. Loi d'Ampère. — Les résultats précédents, et tous ceux que l'on peut obtenir en donnant au courant des positions quelconques par rapport à l'aiguille, ont été réunis par Ampère dans l'énoncé suivant :

Un courant rectiligne, agissant sur un aimant, tend toujours à le placer dans une position perpendiculaire à la sienne, et de manière que le pôle austral soit à la gauche du courant. — Pour définir la gauche du courant, on supposera que l'observateur se place dans la direction même du conducteur, de façon que le courant entre par ses pieds et sorte par sa tête, son visage étant tourné du côté de l'aiguille : la droite et la gauche de l'observateur sont alors la droite et la gauche du courant.

287. Application de la loi d'Ampère à la détermination du sens d'un courant. — La loi d'Ampère étant admise, si l'on veut déterminer le sens du courant qui se propage dans un fil, il suffira de présenter ce fil à une aiguille aimantée mobile sur un pivot, en le plaçant parallèlement à l'aiguille, c'est-à-dire dans le méridien magnétique, et d'observer la déviation de l'aiguille : si l'observateur se suppose placé sur le fil, le visage tourné vers l'aiguille, et de façon que le pôle austral de l'aiguille se trouve à sa gauche, il saura que la direction du courant est celle qui va de ses pieds à sa tête.

Il faut remarquer toutefois que, l'action de la terre tendant à maintenir l'aiguille dans le méridien magnétique, il faut que les courants aient une certaine intensité, pour produire sur l'aiguille une déviation appréciable. — Pour rendre sensibles des courants d'une faible intensité, on a recours au *multiplicateur*.

288. Construction du multiplicateur. — Replions le fil conducteur en un rectangle ABCDF (fig. 190), orienté dans le méridien magnétique, et au milieu duquel nous placerons l'aiguille *ab*. Si le fil est

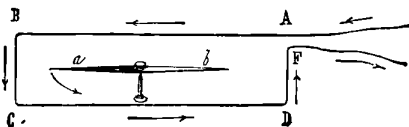


Fig. 190.

parcouru par un courant, dans le sens des flèches indiquées ci-contre, il est facile de voir, en considérant successivement chacune des quatre por-

tions rectilignes du courant, AB, BC, CD, DF, qu'elles ont leur gauche chacune en avant du plan de la figure : donc les actions de ces quatre portions *concordent* pour amener le pôle austral de l'aiguille en avant de ce plan. — Concevons maintenant que, au lieu de former avec le fil un simple rectangle, on l'enroule un grand nombre de fois sur un cadre rectangulaire, après avoir eu soin de le couvrir de soie, dans toute sa longueur, pour isoler les uns des autres les tours contigus. Tous les tours de

fil étant parcourus dans le même sens par le courant, ils exerceront des actions concordantes sur l'aiguille, et, si le fil fait plusieurs centaines de tours, l'appareil pourra permettre de constater l'existence de courants qui seraient inappréciables par l'expérience d'Ærsted.

289. Galvanomètre à deux aiguilles. — Employons enfin, au lieu d'une seule aiguille, deux aiguilles aimantées ab , $a'b'$ (fig. 191), placées parallèlement, mais de manière que leurs pôles contraires se correspondent, et assujetties invariablement l'une à l'autre par une petite tige de cuivre M . Sus-

spondons le système par un fil de soie sans torsion G . — Si ces deux aiguilles étaient parfaitement identiques, les actions exercées par la terre sur leurs pôles se neutraliseraient toujours, quelle que fût l'orientation, et le système resterait en équilibre dans une position quelconque : on dirait alors qu'il est complètement *astatique*. — Mais si l'une des aiguilles possède une aimantation un peu plus énergique que l'autre, ainsi que cela a toujours lieu,

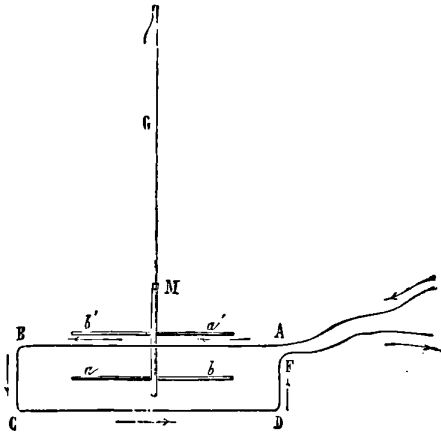


Fig. 191.

la terre conserve sur le système une action directrice très-faible, égale à la *différence* des actions exercées sur chacune des aiguilles,

Cela posé, soit un fil conducteur replié en un rectangle ABCDF, dont les côtés sont dans le méridien magnétique ; plaçons l'aiguille inférieure ab au milieu de ce rectangle, et l'aiguille supérieure $a'b'$ en dehors. à une petite distance du côté AB. — Si le courant se propage dans le sens des flèches ci-contre, nous avons montré (288) que les quatre côtés du rectangle agissent sur l'aiguille intérieure de manière à solliciter le pôle austral a en avant du plan de la figure. Considérons maintenant l'action du rectangle sur l'aiguille supérieure : en appliquant la loi d'Ampère, on voit que le côté le plus voisin AB 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* donc avec celles qui s'exercent sur l'aiguille inférieure. Quant aux actions exercées sur $a'b'$ par les trois autres côtés du

rectangle, 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 supérieure doit donc être considérée comme s'ajoutant à l'action exercée sur l'aiguille inférieure, 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 *diminuer* considérablement l'action directrice 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.

Le *galvanomètre*, dont nous venons d'indiquer successivement les principes essentiels, est dû à Nobili. Un fil de cuivre couvert de soie est en-

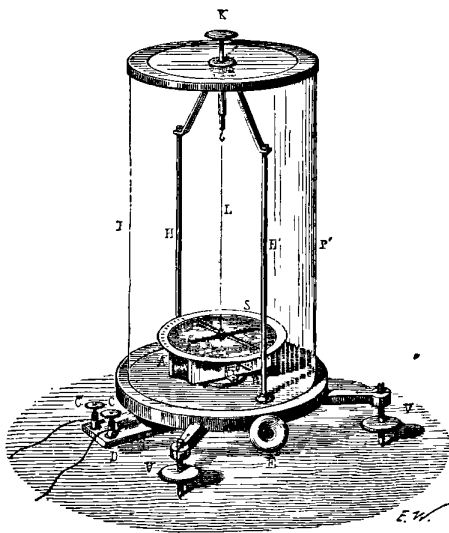


Fig. 192. — Galvanomètre.

roulé sur un cadre d'ivoire AB (fig. 192) : ses deux extrémités vont aboutir à deux petites bornes métalliques C, C', fixées sur une planchette d'ivoire D. Les deux aiguilles sont assujetties l'une à l'autre par un fil de cuivre rigide, et le système est suspendu à un fil de coton L, supporté lui-même par les colonnes H, H'. On a placé au-dessous de l'aiguille supérieure un cercle de cuivre S, portant une graduation : le diamètre qui passe par le zéro de cette graduation est dirigé parallèlement aux tours du fil métallique. — Une cloche de verre garantit l'instrument de l'influence de l'agitation de l'air.

290. Usage du galvanomètre. — Mesure des intensités des courants. — Pour 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 d'un 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 supérieure.

L'instrument étant ainsi réglé, on fixe des fils conducteurs dans les boutons C, C' : 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. — La même expérience, faite avec deux courants différents, indiquera, par la comparaison des angles d'écart observés, lequel des deux courants est le *plus intense*.

Quant à la *mesure* précise des rapports d'intensités des courants, nous ne pouvons entrer dans les détails à cet égard. Il nous suffira de savoir que, pour les courants qui produisent des déviations ne dépassant pas 20 à 30 degrés, *on peut considérer les angles d'écart comme mesurant les intensités relatives des courants eux-mêmes*. — Pour mesurer les intensités de courants produisant des déviations plus grandes, on construit, par l'expérience, pour chaque instrument, une table qui donne les intensités correspondantes aux divers angles d'écart.

291. Influence des résistances des divers conducteurs sur les intensités des courants. — L'expérience montre que l'intensité d'un courant ne dépend pas seulement de la source qui le produit, mais aussi des résistances offertes par les corps conducteurs dans lesquels il se propage.

Avec une même source, *l'intensité du courant diminue, lorsqu'on augmente la longueur, ou lorsqu'on diminue la section des conducteurs interposés dans le circuit*.

Enfin, les divers corps offrent des *résistances spécifiques* différentes, c'est-à-dire que, si l'on prend, par exemple, des fils ayant tous *une même section*, mais formés de *métaux différents*, il en faut prendre des *longueurs différentes* pour obtenir un même effet, lorsqu'on les interpose dans un circuit déterminé. — Pour construire les tables numériques qui indiquent les résistances spécifiques des divers corps, les physiciens ont pris comme terme de comparaison le mercure, à cause de la facilité avec laquelle on peut l'obtenir toujours dans des conditions identiques. Supposons, par exemple, que l'on ait introduit, dans un circuit, une colonne de mercure contenue dans un tube de verre de 1 mètre de longueur et de 1 millimètre carré de section, et qu'on ait évalué l'intensité du courant produit, dans ce circuit, par une source déterminée. Si l'on veut remplacer cette colonne de mercure par un fil de platine ayant toujours 1 millimètre carré de section, on trouve qu'il faut, pour

obtenir la même intensité, donner à ce fil une longueur de 4 mètres. On en conclut que la résistance spécifique du platine, par rapport au mercure, est $\frac{1}{4}$. — On trouve de même que la résistance spécifique du cuivre est $\frac{1}{80}$, etc. — Les métaux, en général, ont des résistances spécifiques moindres que l'unité, c'est-à-dire moindres que celle du mercure.

L'eau, les solutions salines ou les solutions acides, ont, au contraire, des résistances spécifiques extrêmement considérables. C'est ainsi qu'une solution de sulfate de cuivre, avec 14 équivalents d'eau, présente, par rapport au mercure, une résistance spécifique exprimée par 202 000 environ; un mélange d'acide sulfurique avec 14 équivalents d'eau, une résistance de 14 200, etc. — Nous en tirerons seulement cette remarque importante, que des colonnes formées de pareils liquides, alors même qu'elles auraient une assez grande section, présenteront, lorsqu'on les introduira dans un circuit, des résistances telles, qu'on pourra presque toujours négliger, vis-à-vis d'elles, les résistances offertes par les parties métalliques du circuit.

ACTIONS DES COURANTS SUR LES AIMANTS

292. **Action d'un aimant sur un courant mobile.** — L'expérience d'Ersted (285) nous a montré qu'un courant rectiligne exerce, sur un aimant mobile autour de son milieu, une action directrice qui tend à le mettre en croix avec le courant. — Réciproquement, si un aimant est placé dans une position fixe en présence d'un conducteur parcouru par un courant, et si la disposition est telle que ce conducteur puisse se mouvoir, il doit tendre à se placer en croix avec la ligne des pôles de l'aimant.

L'un des moyens les plus simples pour obtenir des conducteurs parcourus par des courants, et qui puissent cependant obéir aux actions qui tendent à les déplacer, consiste dans l'emploi des piles flottantes, qui sont dues à M. de la Rive. — Sur un vase contenant de l'eau aiguisée d'acide sulfurique, on fait flotter une lame de zinc Z et une lame de cuivre C (fig. 193), assujetties dans une rondelle de liège : un fil métallique L, unissant les deux lames entre elles,

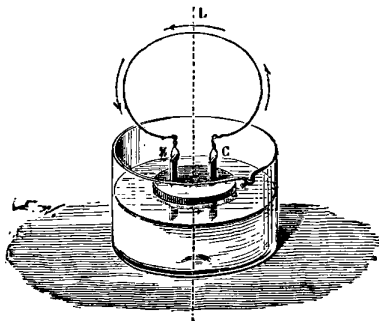


Fig. 195.

Or, si l'on place horizontalement un barreau aimanté, au-dessus de la partie supérieure L de ce fil, et dans le même plan vertical que lui, on voit tout l'équipage tourner sur lui-même, et se mettre en croix avec l'aimant : c'est, comme on voit, l'expérience inverse de celle d'Ersted. — Le sens de cette action est d'accord avec la loi d'Ampère (286), c'est-à-dire que, en supposant l'observateur placé sur le fil comme l'indique cette loi, on constate que le courant s'oriente de manière que le pôle austral soit à sa gauche.

Nous indiquerons plus loin (294) une autre disposition, imaginée par Ampère, pour obtenir des *courants mobiles*, obéissant, comme celui que nous venons d'employer, aux actions qui les sollicitent.

295. Rotation d'un aimant sous l'action d'un courant.

— Parmi les nombreuses expériences qui permettent de constater l'action des courants sur les aimants, nous indiquerons encore la suivante, qui est due à Faraday. — Un barreau aimanté *a* (fig. 194) est placé verticalement dans une éprouvette contenant du mercure, et lesté par un petit cylindre de platine *p*, fixé à sa partie inférieure. On fait communiquer le centre de la surface du mercure avec l'un des pôles d'une pile, au moyen d'une pointe métallique *T*, et le contour de la surface avec l'autre pôle, au moyen d'un anneau *K* fixé à l'intérieur de l'éprouvette. On voit l'aimant se rapprocher d'abord, en tournant autour de la tige, puis arriver en contact avec elle, et continuer à tourner tant que le courant passe. — Ici encore, on constate que

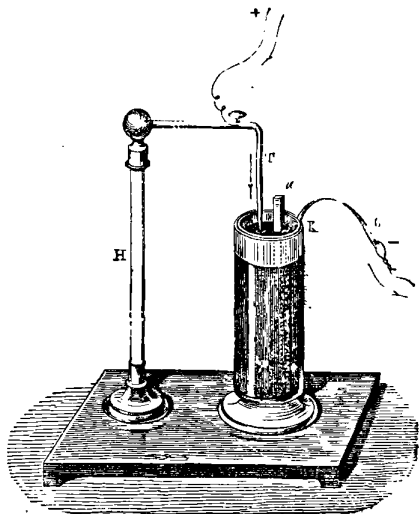


FIG. 194.

le sens de la rotation est d'accord avec la loi d'Ampère. — Le mouvement se continue indéfiniment sous l'action du courant, parce 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.

ACTIONS DES COURANTS SUR LES COURANTS

294. **Actions des courants parallèles.** — Pour observer les actions qu'exercent l'un sur l'autre deux conducteurs parcourus par des courants, nous emploierons la disposition suivante, qui a été réalisée pour la première fois par Ampère.

Un fil métallique *adefgb* (*fig. 195*), replié comme l'indique la figure, est terminé à ses extrémités *a* et *b* par deux pointes d'acier verticales, qu'on plonge dans des godets pleins de mercure. Ces godets communi-

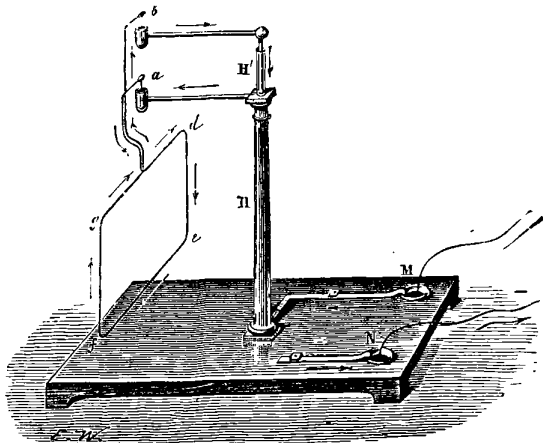


Fig. 195.

quent, l'un *a* avec une colonne métallique creuse II, dans laquelle on peut amener un courant au moyen d'un fil partant de l'un des pôles d'une pile et plongeant dans le godet M ; l'autre *b*, avec une tige métallique *H'*, située à l'intérieur de II, 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. On obtient aussi un conducteur de forme rectangulaire qui peut, 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, dont on puisse étudier l'action sur les diverses parties du premier, nous emploierons un cadre de bois rectangulaire MNPQ (*fig. 196*), sur lequel nous aurons enroulé un fil

métallique couvert de soie. On pourra faire passer dans ce fil, soit le courant d'une pile spéciale, soit le courant même qui passe dans l'appareil de la figure 195.

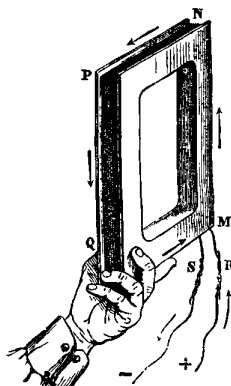


Fig. 196.



Fig. 197.

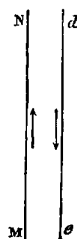


Fig. 198.

L'expérience étant ainsi disposée, on prend à la main le cadre MNPQ et on approche le côté vertical MN du côté *fg*; on observe une attraction. Or, les portions du fil qui couvrent le côté MN du cadre sont parallèles à *fg* (fig 197), et le courant s'y propage dans le même sens que dans *fg*. — Donc des

courants parallèles et de même sens s'attirent.

Au contraire, si l'on approche ce même côté MN du côté *de* de l'équipage mobile, on observe une répulsion. Or, les portions du fil qui sont appliquées sur MN sont encore parallèles à *de* (fig. 198), mais les courants y sont de sens contraires. — Donc *deux courants parallèles et de sens contraires se repoussent.*

295. Actions des courants croisés. — Reprenons le cadre MNPQ (fig. 196), et plaçons le côté PN au-dessous de *fe* (fig. 195), de manière qu'il fasse avec lui un certain angle. Les courants se propageant dans le sens indiqué par les flèches de la figure 199, 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 croisés s'attirent, quand ils s'approchent ou s'éloignent ensemble de leur point de croisement.*

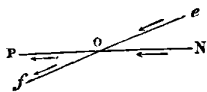


Fig. 199.

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. 200), on voit les deux moitiés *Oe* et *Of* s'éloigner respectivement de ON et OP, pour se porter vers OP et ON. Donc

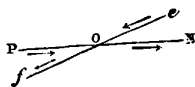


Fig. 200.

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 croisés se repoussent, quand l'un s'approche du point de croisement tandis que l'autre s'en éloigne.

296. **Deux portions consécutives d'un même courant rectiligne se repoussent.** — Deux rigoles parallèles M, N (fig. 201),

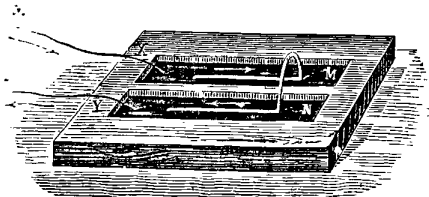


Fig. 201.

séparées par une cloison isolante, contiennent du mercure : à la surface du liquide sont placées les deux branches d'un fil métallique couvert de soie, dont les deux extrémités seules sont mises à nu et plongent dans le mercure. Le courant arrive en X , traverse le mercure et le fil conducteur, et sort en Y . — Dès que les communications sont établies, on voit le conducteur se mettre en mouvement de gauche à droite. On en conclut qu'il y a répulsion entre les portions de courant qui traversent successivement le mercure et le fil métallique.

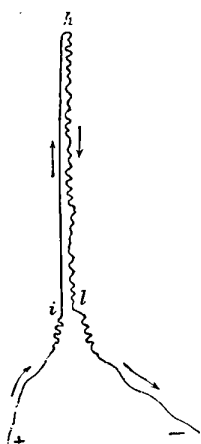


Fig. 202.

297. **Action d'un courant sinueux, comparée à celle d'un courant rectiligne ayant les mêmes extrémités.** —

Il est facile de constater qu'un courant sinueux 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 suffisamment grande par rapport à l'amplitude des sinuosités. — Pour cela, on prend un fil de cuivre replié ihl (fig. 202), dont l'une des branches ih est rectiligne, l'autre hl sinueuse, et dans lequel on fait passer un courant : si le principe précédent est exact, l'action du système de ces deux fils sur un courant 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 quel-

conque des côtés du courant mobile de la figure 195, qu'il ne se produit aucun mouvement.

ACTION DE LA TERRE SUR LES COURANTS

298. **Action de la terre sur un courant fermé, mobile autour d'un axe vertical.** — Lorsqu'on abandonne, *sous l'action de la terre seule*, un courant fermé mobile autour d'un axe vertical, comme le courant rectangulaire de la figure 195, on le voit tourner sur lui-même, et se placer *perpendiculairement au méridien magnétique*, de telle manière que, dans la partie horizontale inférieure, le courant soit dirigé *de l'est à l'ouest*.

Ce résultat s'explique immédiatement si l'on assimile, comme nous l'avons fait jusqu'ici (247), l'action de la terre à celle d'un aimant dont la ligne des pôles serait sensiblement dirigée du nord au sud, et qui serait situé à une grande distance de la surface du globe. — En effet, les deux portions rectilignes et horizontales, *ef, gd*, étant parcourues par des courants de sens contraires, et leurs distances aux pôles de l'aimant terrestre étant sensiblement les mêmes, les actions de la terre sur ces deux parties doivent être considérées comme se faisant équilibre. Si maintenant on a égard aux actions de l'aimant terrestre sur les courants verticaux *de, fg*, dont l'un est descendant et l'autre ascendant, il est facile de voir que, d'après la loi d'Ampère, le premier *de* doit tendre à se porter vers l'est, le second *gh* doit se porter vers l'ouest. C'est donc bien quand le courant *ef* est dirigé de l'est à l'ouest qu'il doit y avoir équilibre.

Remarque. — L'expérience donne un résultat semblable lorsqu'on emploie, au lieu du rectangle *defg*, le conducteur circulaire *deg* (fig. 205). L'équilibre est encore établi lorsque le courant est dirigé de l'est à l'ouest dans la partie inférieure *e* du cercle.

299. **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.** —

Considérons, par exemple, l'action que nous venons d'interpréter par l'hypothèse de l'aimant terrestre, c'est-à-dire l'action que la terre exerce sur un courant rectangulaire, mobile autour d'un axe vertical, comme celui de la figure 195. — Cherchons d'abord quelle serait l'action exercée, sur un pareil courant, par un courant horizontal indéfini *XY* (fig. 204), que nous supposerons placé au-dessous de lui de façon qu'il soit rencontré en *L* par l'axe de rotation.

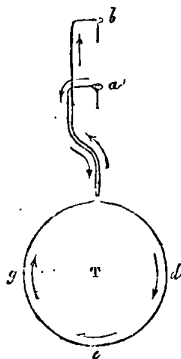


Fig. 205.

IPHS - ILLIAD - Université Lille 1

D'après le principe des courants croisés (295), et en supposant aux courants la direction qu'indiquent les flèches, il y a attraction entre le courant

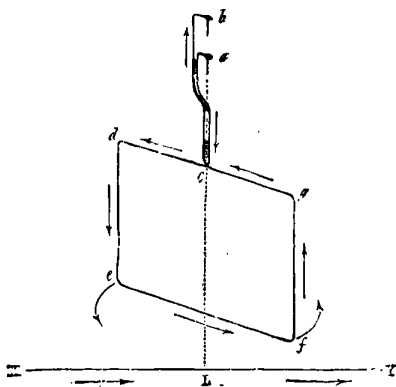


Fig. 204.

de et la partie de XY qui est à sa gauche : il y a répulsion entre *de* et la partie de XY qui est à sa droite : donc, puisque *de* peut se mouvoir parallèlement à lui-même en tournant autour de l'axe *aL*, il doit tendre à se placer dans le plan vertical *aLX*, et à gauche de *aL*. On verra, de la même manière, que *fg* doit tendre à se placer dans le même plan, et à droite de *aL*. — Nous négligerons ici les actions exercées par XY sur les deux portions horizontales *ef*,

dg : en effet, si XY est voisin du rectangle, la première de ces deux actions concorde avec les précédentes, et l'emporte sur la seconde, qui serait contraire ; mais, dans le cas où XY est très-éloigné (et c'est ce que nous supposerons en assimilant l'action de la terre à celle d'un courant), les actions exercées sur les deux portions horizontales sont sensiblement égales et contraires. — Quoi qu'il en soit, on voit, comme résultat définitif, que, sous l'action du courant XY, il y aura équilibre stable lorsque le courant qui parcourt la partie horizontale inférieure sera parallèle au courant indéfini et de même sens que lui.

Or, sous l'action de la terre, le courant *defg* de la figure 195 se place, comme nous l'avons dit (298), de façon que le courant aille, en *ef*, de l'est à l'ouest. Cet effet est donc bien celui auquel on est conduit, en assimilant l'action de la terre à celle d'un courant perpendiculaire au méridien magnétique et dirigé de l'est à l'ouest.

300. Conducteurs astatiques. — Lorsqu'on veut observer les actions produites sur des courants mobiles par des aimants faibles, ou par des courants peu intenses, il est nécessaire de les soustraire à l'action de la terre, qui pourrait masquer celles qu'on se propose d'étudier. Les conducteurs représentés par les figures 205 et 206 satisfont à cette condition, c'est-à-dire qu'ils sont *astatiques*. — En effet, dans le premier (fig. 205), les deux fils verticaux les plus éloignés de l'axe de rotation, étant parcourus par des courants de même sens, tendraient à se porter tous deux du 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 croi-

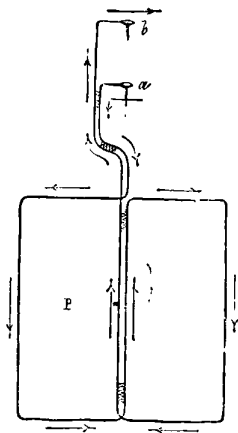


Fig. 205.

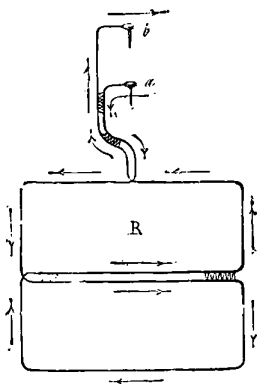


Fig. 206.

sés (295), 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. 206*) 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.

SOLENOÏDES

301. Construction d'un solénoïde. — Pour construire un solénoïde, on prend un fil de cuivre couvert de soie et on le contourne sur lui-même, comme l'indique la figure 207. Le solénoïde représenté par cette figure est disposé pour être suspendu aux petites crupes *a* et *b* de la figure 195, à la place de l'équipage rectangulaire. — Un courant pénétrant par *a* et sortant par *b* parcourt alors dans le même sens toutes les parties circulaires du fil : quant aux parties qui sont dirigées suivant l'arête supérieure du cylindre, elles forment, par leur ensemble, deux courants rectilignes de même longueur et de sens contraires, dont les

actions se neutralisent. — Donc, en définitive, un pareil système doit être considéré comme formé essentiellement de *courants circulaires, égaux,*

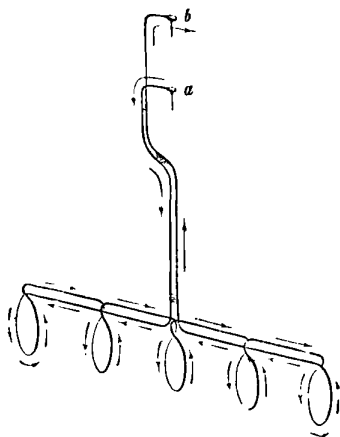


Fig. 207.

de même sens, et dont les plans sont perpendiculaires à la ligne qui passe par leurs centres.

302. Action de la terre sur un solénoïde. — Le solénoïde précédent étant suspendu à l'appareil de la figure 195, l'expérience montre que son axe se place dans le méridien magnétique, comme ferait une aiguille aimantée mobile dans un plan horizontal. — Ce résultat pouvait être prévu, d'après ce qui précède, car chacun des cercles qui composent le solénoïde tend à se placer, sous l'action de la terre, perpendiculairement au méridien magnétique (298, Remarque); donc, l'axe du solénoïde doit se placer dans le méridien magnétique lui-même.

Quand le solénoïde a pris sa position d'équilibre et qu'on l'en écarte, il y revient après quelques oscillations, et c'est toujours la même extrémité qui se tourne vers le nord. — Un solénoïde a donc un pôle *austral* et un pôle *boréal*, comme un aimant. Ces pôles peuvent être déterminés par l'expérience actuelle : on en peut également prévoir *a priori* la position, en remarquant que le solénoïde doit se placer de telle façon que, dans la partie inférieure des circonférences qui le forment, le courant aille de l'est à l'ouest.

303. 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, au moyen des actions des courants sur les courants, en remarquant que le plan de chacun des cercles 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 en même temps à l'action de la terre qui tend à ramener son axe dans le méridien magnétique, prend toujours une direction intermédiaire entre le méridien magnétique et la direction perpendiculaire au courant fixe.

304. Actions mutuelles de deux solénoïdes. — Soit un premier solénoïde, comme celui de la figure 207, suspendu à l'appareil de la figure 193, 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 au pôle boréal, 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 sensiblement 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, et les courants sont de même sens : il doit donc y avoir attraction.

305. 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 repousse le pôle boréal. — Enfin, le pôle austral de l'un attire le pôle boréal de l'autre, et réciproquement.

Ces résultats peuvent encore être facilement interprétés, en se reportant à la direction du courant dans les cercles qui forment le solénoïde (302), et en appliquant la loi d'Ampère (286).

306. Assimilation des aimants aux solénoïdes. — De toutes ces expériences, il résulte que les solénoïdes se comportent comme des aimants. Cette analogie de propriétés a 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.

Ces courants, qui existaient dans le fer doux ou dans l'acier avant l'aimantation, présenteraient alors des orientations variables d'une par-

ticule à l'autre, et ne pourraient révéler leur présence par aucun effet extérieur. — Le phénomène de l'*aimantation* consisterait dans une orientation commune de tous ces courants particuliers, les amenant tous à circuler dans des plans parallèles et dans le même sens : cette orientation, passagère dans le fer doux aimanté par influence, serait durable dans l'acier trempé, qui est doué de force coercitive. Dans un barreau aimanté, chacune des files de molécules qui sont situées de part et d'autre de l'axe représenterait un petit solénoïde.

Cette théorie, qui établit une liaison intime entre le magnétisme et l'électricité, permet d'expliquer très-simplement un grand nombre des expériences de l'électro-magnétisme. — Elle acquiert un intérêt nouveau par les phénomènes de l'aimantation par les courants, que nous allons maintenant étudier.

CHAPITRE V

AIMANTATION PAR LES COURANTS

307. Développement du magnétisme par les courants.

— Arago a constaté que, lorsqu'on place une aiguille de fer doux en croix avec un fil métallique traversé par un courant, cette aiguille s'aimante, son pôle austral se développant à la gauche du courant : l'aimantation cesse dès que le courant est interrompu. — Une aiguille d'acier trempé s'aimante plus lentement, mais l'aimantation persiste après qu'on a interrompu le courant.

Donc, soit qu'on regarde l'aimantation comme produite par la séparation des fluides répandus dans les éléments magnétiques (251), soit qu'on l'attribue à l'orientation des courants particuliers (306), on doit admettre qu'un courant, placé dans le voisinage d'un corps magnétique non aimanté, exerce sur les fluides ou sur les courants une action qui convertit ce corps en un aimant véritable. — L'acier trempé diffère du fer doux en ce que sa force coercitive rend permanente la séparation des fluides, ou l'orientation des courants particuliers.

308. Procédé d'aimantation de l'acier par les courants.

— Ampère est l'auteur de ce procédé. On développe par un courant dans une aiguille d'acier, en enroulant autour d'elle le conducteur. — Si

l'on place une aiguille d'acier dans un tube de verre (fig. 208), autour duquel on aura enroulé en hélice un fil métallique, et si l'on fait passer



Fig. 208.

dans ce fil, pendant quelques instants, un courant suffisamment intense, on constate que l'aiguille est fortement aimantée. — Le sens de l'aimantation dépend à la fois du sens dans lequel l'hélice est enroulée, et du sens dans lequel on y fait passer le courant ; dans tous les cas, la loi d'Ampère (286) suffit pour faire prévoir de quel côté doit se former le pôle austral *a*.

309. **Électro-aimants.** — On conçoit, d'après ce qui précède, qu'un barreau de *fer doux*, environné d'un fil conducteur enroulé en spirale, doit se comporter comme un aimant, au moment où le fil est parcouru par un courant, et qu'il doit retomber à l'état neutre dès que le courant est interrompu. Tel est le principe de la construction des *électro-aimants*, auxquels on peut donner une puissance bien supérieure à celle des aimants les plus énergiques.

Lorsqu'on se propose d'employer un électro-aimant à attirer et à fixer une pièce de

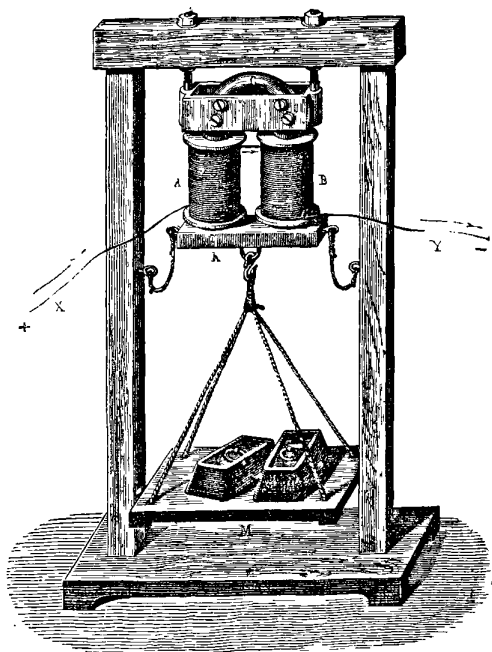


Fig. 309. — Électro-aimant.

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. 209*), sur lesquelles s'enroule un même fil de cuivre couvert de soie. Les actions des deux bobines devant concorder pour développer l'aimantation, le sens de l'enroulement doit être tel que, en supposant la barre redressée et les deux bobines superposées par leurs bases supérieures, l'hélice de l'une soit la continuation de l'hélice de l'autre. — Les deux pôles de l'électro-aimant agissant à la fois sur le contact K, pour l'aimanter par influence, on verra, comme pour les aimants en fer à cheval (256), que ce contact doit pouvoir soutenir un poids bien supérieur au double de celui que porterait un seul pôle. — L'attraction cesse dès que le courant est interrompu dans le fil.

Au lieu de courber une barre en fer à cheval, on préfère souvent réunir, par une traverse de fer doux T (*fig. 210*), 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 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.

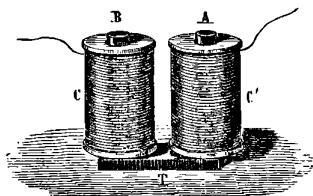


Fig. 210.

TÉLÉGRAPHIE ÉLECTRIQUE.

310. 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*, qui est placé au point de départ de la dépêche, et qui permet d'interrompre ou de rétablir à volonté le courant, suivant des règles conventionnelles.

4° D'un appareil *récepteur*, qui est placé au point d'arrivée ; il comprend un électro-aimant, qui entre en action dès que le courant lui est transmis, et 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, produiront tels ou tels effets, selon qu'il s'agit de tel ou tel système.

Nous n'avons pas à revenir sur la description des piles. On fait le

plus souvent usage de piles qui ne sont que des modifications de la pile de Daniell, et qui présentent une constance remarquable pendant plusieurs semaines. On emploie la pile de Bunsen, dans les cas exceptionnels où la longueur de la ligne exige une pile d'une grande puissance.

Nous dirons d'abord quelques mots de l'établissement de la ligne, et nous décrirons ensuite le manipulateur et le récepteur de deux des systèmes les plus employés, le *télégraphe de Morse* et le *télégraphe à cadran*.

311. Établissement de la ligne. — Suppression du fil de retour. — Les fils qui établissent la communication entre les postes télégraphiques doivent être isolés du sol. Lorsqu'ils sont à l'air libre, on les soutient au moyen de petits crochets, fixés à des supports de porcelaine qui sont appliqués eux-mêmes sur des poteaux de bois. Lorsqu'on les fait passer sous terre, on les noie dans une masse de bitume.

Du pôle positif de la pile, placée à l'une des stations, part toujours un fil qui se rend au récepteur de l'autre station, et qui constitue la ligne télégraphique elle-même; dans l'origine, on employait un second fil, ou une seconde ligne, dite *fil de retour*, pour ramener le courant au pôle négatif de la pile. — On supprime aujourd'hui ce second fil, et l'on fait communiquer avec la terre, d'une part, le pôle négatif de la pile; d'autre part, le récepteur. La terre joue, dans ce cas, le rôle d'un corps conducteur de surface infinie, dans lequel l'électricité s'écoule successivement, en sorte qu'il se produit un véritable courant, allant du pôle positif au récepteur, par l'affluence incessante d'une nouvelle quantité de fluide.

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 de retour : l'expérience a montré qu'on obtient, avec la même pile, un courant d'une intensité presque double.

312. Système de Morse. — MANIPULATEUR. — Le manipulateur du télégraphe de Morse se compose d'un levier métallique K (*fig. 211*), mobile autour de l'axe S; cet axe communique avec la ligne, comme l'indique la figure. On manœuvre le levier en appuyant avec la main sur la poignée de bois P : la pointe métallique *t* vient alors toucher la borne métallique *b*, qui communique avec le pôle positif de la pile, en sorte que, tant que dure la pression exercée sur la poignée, le courant de la pile passe sur la ligne. Dès

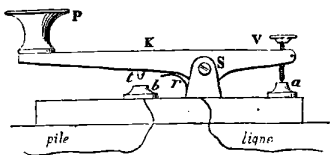


Fig. 211. — Manipulateur du télégraphe Morse.

que cette pression cesse, un ressort *r* relève le levier, et le courant est interrompu; la borne *a*, limite la

course du levier dans ce sens. — Il suffit de faire varier la durée des contacts de la pointe t avec la borne b , ainsi que la durée des interruptions, pour envoyer sur la ligne des courants discontinus, de durée variable, et séparés par des intervalles variables.

313. RÉCEPTEUR. — La pièce essentielle du récepteur de Morse est un levier DA (fig. 212), mobile autour d'un axe O, et dont les mouvements reproduisent ceux du levier du manipulateur. La branche OA porte un

cylindre de fer creux horizontal A, perpendiculaire au plan de la figure ci-contre, et placé au-dessus d'un électro-aimant E dont le fil communique, d'une part avec la ligne, d'autre part avec la terre. L'autre extrémité du levier porte une pointe V, qui y est implantée obliquement; au-dessus, passe une bande de papier XY, qui est entraînée entre les deux cylindres horizontaux b , a , mus par un mouve-

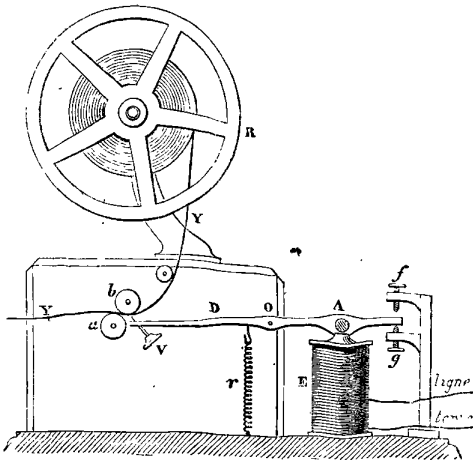


Fig. 212. — Récepteur du télégraphe de Morse.

ment d'horlogerie; cette bande de papier se déroule en abandonnant successivement le tambour R, placé au-dessus de l'appareil. Sur la surface du cylindre b , est pratiquée une rainure correspondante aux points que viendra toucher la pointe V, en se rapprochant de lui pendant sa rotation.

Dès que le courant passe dans le fil, le cylindre de fer doux A est entraîné vers l'électro-aimant E, le bras de levier OV est relevé, et la pointe V, refoulant le papier dans la rainure du cylindre b , produit un trait gaufré: il en est ainsi tant que dure le courant envoyé sur la ligne, de sorte que la longueur du trait qui se produit dépend de la durée du courant lui-même. Dès que le courant est interrompu, le ressort r entraîne en bas le bras de levier OV, et la pointe V reste éloignée du papier (*).

(*) Afin d'éviter que ces oscillations du levier aient une trop grande amplitude, on place, au-dessus et au-dessous de l'extrémité droite du levier, deux vis f et g . L'une, f , est réglée de manière que la pièce A s'éloigne peu de l'électro-aimant

Les signaux du système de Morse se composent de deux traces différentes : le point (-), qui correspond à un courant presque instantané, et le trait (—), auquel on donne une certaine longueur et qui correspond à un courant d'une durée déterminée, que l'habitude indique. En combinant de diverses façons ces deux traces, on arrive à représenter, par un petit nombre de chacune d'elles, chaque lettre de l'alphabet, chaque signe de ponctuation, chaque chiffre, etc. — Les lettres sont séparées les unes des autres par un intervalle un peu plus grand que celui qui sépare les traces appartenant à une même lettre; les mots sont séparés par un espace plus grand encore.

314. Modifications apportées à ce récepteur. par MM. Digney frères. — Le gaufrage pratiqué dans la bande de papier par la pointe V, dans le récepteur de Morse, a l'inconvénient d'exiger que l'électro-aimant ait une grande puissance, et par suite, que le courant ait une grande intensité. Dans la modification apportée par les frères Digney, le gaufrage est remplacé par des *traits à l'encre*. — La bande de papier, avant d'arriver entre les cylindres *b* et *a*, qui l'entraînent, passe au-dessous d'une petite roue dont la circonférence est couverte d'encre d'imprimerie; quand le levier est au repos, le papier glisse sans toucher la roue, et il frotte sur une sorte de petit marteau qui remplace la vis V. Au moment où le courant passe, le marteau se relève, applique le papier sur la roue couverte d'encre, et celle-ci y imprime une trace, dont la longueur dépend de la durée du courant.

315. Télégraphe à cadran. — MANIPULATEUR. — Le manipulateur du télégraphe à cadran, modifié par M. Breguet, se compose des pièces suivantes. Un disque de cuivre horizontal E (fig. 213), auquel on peut imprimer un mouvement de rotation autour de son centre à l'aide de la manivelle M, portée sur sa face inférieure une rainure sinueuse, qui est indiquée sur la figure ci-contre par des traits ponctués; cette rainure offre treize sinuosités saillantes et treize sinuosités rentrantes, en tout vingt-six alternatives. Dans la rainure s'engage, en *a*, une petite goupille métallique, fixée à l'extrémité du levier OG, qui est mobile autour du point O; l'autre extrémité de ce levier est terminée

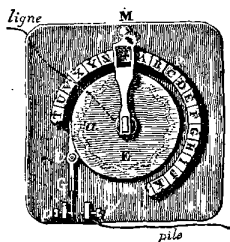


Fig. 213.
Manipulateur du télégraphe
à cadran.

pendant les interruptions du courant, et qu'elle obéisse ainsi plus vite à son attraction quand le courant est rétabli; l'autre, *g*, empêche A de venir toucher l'électro-aimant, ce qui aurait l'inconvénient de développer dans le fer doux une aimantation persistante, au moins pendant quelque temps, et de troubler ainsi la marche de l'appareil.

par une lame métallique flexible, située dans l'intervalle de deux vis métalliques p , p' . Lorsqu'on imprime au disque un mouvement de rotation, la goupille a suit les sinuosités de la rainure, qui l'éloignent et la rapprochent successivement du centre du disque; par suite, la lame flexible qui est à l'autre extrémité 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 la ligne ponctuée marquée 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 est placée au-dessus d'un cadran circulaire, portant vingt-six compartiments dans lesquels sont gravées les lettres de l'alphabet et une *croix* conventionnelle (*). Sur le bord du disque, on a pratiqué de petites encoches, qui correspondent aux milieux des compartiments, et dans lesquelles peut s'arrêter une petite goupille fixée au-dessous de la manivelle; une fenêtre, pratiquée dans la manivelle, permet d'apercevoir la lettre au-dessus de laquelle elle se trouve (dans la figure ci-contre, la manivelle est placée sur la *croix*).

Pour concevoir le mécanisme de l'*envoi* d'une dépêche, on devra supposer 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 alors la manivelle sur une lettre de rang quelconque, le nombre total des établissements et des interruptions du courant sera égal au rang même de cette lettre. L'opérateur s'arrête un moment sur la lettre qu'il veut indiquer, et passe ensuite aux lettres suivantes, en faisant mouvoir toujours 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.

316. RÉCEPTEUR. — La partie essentielle du récepteur est un système de deux roues dentées R , R' (*fig. 214*), montées sur un même axe: ce système doit reproduire tous les mouvements du disque E du manipulateur. Chacune de ces 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 d'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 butter alternativement contre une dent de

(*) Dans les appareils qui sont en usage dans les postes télégraphiques, ce cadran est une plaque métallique pleine, qui cache au-dessous d'elle 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 bien visible le levier G .

la roue antérieure et contre une dent de la roue postérieure, ne laisse avancer l'échappement que par intermittences : ces intermittences sont réglées comme il suit, 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,

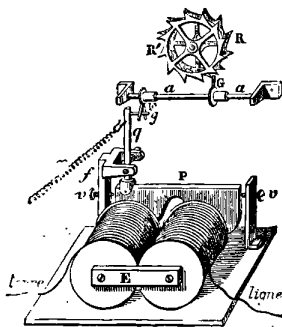


Fig. 214.

que la manivelle du manipulateur ait été d'abord placée sur la croix; le courant n'arrive pas à l'électro-aimant, et la palette, maintenue verticale par le ressort *r*, met en prise l'arrêt *G* avec une dent de la roue postérieure de l'échappement : une aiguille fixée à l'axe de l'échappement lui-même, et mobile sur un cadran situé à l'extérieur de la boîte du récepteur (*fig. 215*), est alors placée sur la croix de

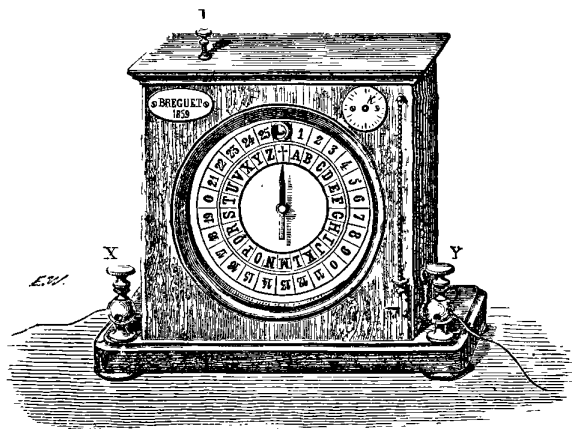


Fig. 215. — Récepteur du télégraphe à cadran.

ce cadran. Si la manivelle du manipulateur est portée sur la lettre *A* de son cadran, le courant arrive à l'électro-aimant du récepteur, la palette *P*

est attirée, la lige 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 : l'axe 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 le fil de l'électro-aimant, 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 suivante de la roue postérieure : l'échappement a donc fait encore un vingt-sixième de tour. — Il en est de même pour chacun des mouvements du manipulateur, en sorte que tous les mouvements effectués par la manivelle, au poste de départ, sont reproduits par l'aiguille au poste d'arrivée.

517. Télégraphie sous-marine. — Câbles sous-marins. — La télégraphie sous-marine a pris, depuis quelques années, un développement qui constituera l'une des principales conquêtes scientifiques de notre siècle. Les conditions particulières dans lesquelles la ligne doit être établie exigent des dispositions spéciales, dont nous indiquerons seulement les points essentiels.

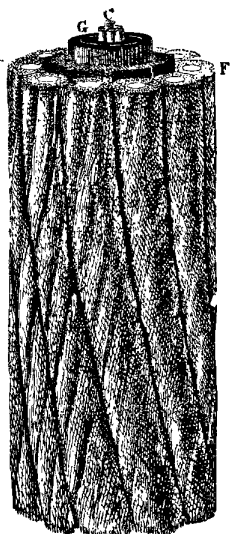


Fig. 216. — Câble transatlantique (grosseur naturelle).

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 sept fils de cuivre C juxtaposés (fig. 216). La multiplicité des fils présente cet avantage, que, s'il vient à se produire quelques ruptures, par les tiraillements auxquels le câble sera soumis, il y a des chances pour qu'elles ne portent pas au même endroit sur tous les fils, et alors le passage du courant dans la longueur du faisceau pourra encore s'effectuer. — Ce conducteur doit être isolé de l'eau de mer, qui est elle-même conductrice : on l'entoure de gutta-percha, ou de diverses substances encore plus isolantes. Le conducteur C et son enveloppe isolante G constituent ce qu'on appelle l'*âme* du câble.

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 juxtaposés en spirale autour de l'âme. L'armature est destinée à soutenir et à protéger l'âme pendant sa traversée des éléments contre les rochers,

et enfin à donner de la résistance au câble, s'il vient à être accroché par les ancrs de navires.

518. **Récepteur de M. Thomson.** — Les récepteurs des divers systèmes que nous avons décrits plus haut, placés à l'extrémité d'un câble sous-marin d'une grande longueur, n'obéiraient que très-lentement aux alternatives d'établissement et de rupture du courant, et exigeraient l'emploi de piles extrêmement énergiques. Il a donc fallu faire usage d'autres récepteurs.

Celui qui a été imaginé par M. William Thomson se compose d'un cadre sur lequel s'enroule un fil métallique couvert de soie PQ (fig. 217), dont les extrémités sont en A et B : au centre de ce cadre, est placé, comme le montre la figure, un petit miroir circulaire sur lequel est appliqué, en arrière, un petit barreau aimanté (ce petit barreau *ns* est indiqué sur la figure par des traits ponctués). Le barreau et le fil pèsent ensemble environ 5 centigrammes, c'est-à-dire la centième partie du poids d'une pièce d'un franc ; ils sont supportés par un fil de cocon qui a un millimètre de longueur (il est indiqué par un trait vertical, dans la figure).

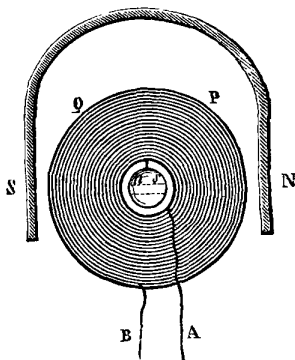


Fig. 217. — Récepteur de M. W. Thomson.

Avec une si petite masse, le barreau aimanté et le miroir qui le porte doivent se mettre en mouvement sous l'action des courants les plus faibles qui viennent à traverser le fil enroulé sur le cadre : l'aimant en fer à cheval NS ramène rapidement le barreau à sa position première. On fait tomber sur le miroir les rayons lumineux émis par une lampe fixe ; ces rayons sont renvoyés sur un écran placé à une certaine distance, et, pour peu que le miroir soit dévié, l'image réfléchie se déplace sur l'écran, d'une quantité sensible. — On peut produire à volonté la déviation d'un côté ou de l'autre : il suffit que, à la station de départ, la ligne soit mise en communication tantôt avec le pôle positif, tantôt avec le pôle négatif de la pile. Ces deux déviations, l'une à droite, l'autre à gauche, constituent deux signaux différents : en groupant ces signaux conventionnellement, de diverses manières, on forme les diverses lettres de l'alphabet, de même que, dans le télégraphe de Morse, on a formé les lettres avec deux signaux seulement, le trait et le point.

CHAPITRE VI

COURANTS D'INDUCTION

319. **Courants d'induction, produits sous l'influence d'autres courants.** — On donne le nom de *courants d'induction* à des courants qui prennent naissance sous l'influence d'autres courants ou sous l'influence des aimants.

Pour démontrer la production de courants induits sous l'influence de courants ordinaires, nous prendrons deux bobines A, B (fig. 218), formées chacune

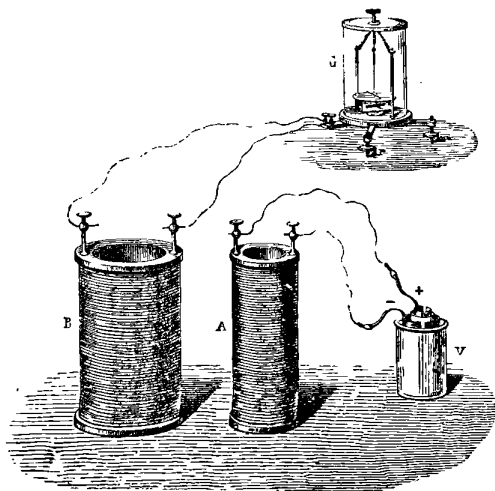


Fig. 218.

d'un fil de cuivre couvert de soie et enroulé sur un cylindre de bois creux : ces deux bobines auront des dimensions telles, que l'une d'elles A puisse être introduite dans la cavité de l'autre. — Les boutons métalliques qui reçoivent les extrémités du fil de la bobine B seront mis en com-

munication avec un galvanomètre G ; le fil de la bobine A sera mis en communication avec une pile V.

Supposons que la bobine A soit placée dans la bobine B, et que le courant de la pile V soit d'abord interrompu. — Si l'on établit brusquement la communication de la pile avec la bobine A, on constatera qu'il se développe, dans le circuit voisin BG, un courant accusé par une déviation de l'aiguille du galvanomètre. — On donne alors 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 l'aiguille revient immédiatement vers sa position primitive et s'y arrête, après quelques oscillations de part et d'autre, pour la conserver indéfiniment, tant que le courant VA reste établi. — Si, lorsque l'aiguille est revenue au zéro, on interrompt le courant de la pile, on observe une nouvelle déviation, en sens opposé de la première, c'est-à-dire indiquant un courant induit *de même sens que le courant inducteur*.

En général, au moment où un courant *commence*, il développe, dans tout circuit fermé voisin, un courant induit *inverse*, c'est-à-dire de sens contraire au courant inducteur. — Au moment où un courant *est interrompu*, il développe, dans tout circuit fermé voisin, un courant induit *direct*, c'est-à-dire de même sens que le courant inducteur.

On obtient des résultats semblables si on laisse le courant établi dans la bobine A, mais qu'on *approche* ou qu'on *éloigne* l'une des bobines de l'autre. — Dans le premier cas, il se développe un courant induit *inverse*. — Dans le second cas, il se produit un courant induit *direct*.

Enfin, si on laisse la bobine A immobile dans la bobine B, mais que, par un moyen quelconque, on *augmente* l'intensité du courant de la pile, on obtient encore un courant induit *inverse*; si l'on *diminue* l'intensité du courant de la pile, il se produit un courant induit *direct*.

Dans toutes ces expériences, il est essentiel de remarquer que, tant qu'on ne fait éprouver au courant de la pile aucune variation, ni de position, ni d'intensité, il ne se produit aucun courant induit.

520. Courants d'induction, produits sous l'influence des aimants. — Un aimant pouvant être considéré comme un système de courants (306), il est facile de prévoir que les aimants doivent également pouvoir donner naissance à des courants induits.

Plaçons un barreau de fer doux dans l'intérieur d'une bobine semblable à la bobine B de la figure précédente, et communiquant avec le fil d'un galvanomètre; puis, approchons vivement de l'extrémité supérieure de ce barreau l'un des pôles d'un aimant. Le barreau s'aimantant par influence, l'aiguille du galvanomètre reçoit une impulsion, accusant dans le fil de la bobine un courant inverse de celui des courants particuliers que l'aimantation a fait naître dans le fer doux. — Tant que le fer doux conserve son aimantation, il ne se produit aucun courant induit, et l'aiguille du galvanomètre, revenue au zéro, reste dans cette position. — Mais si l'on retire brusquement l'aimant, le magnétisme du barreau de fer doux disparaît, et il se produit dans la bobine un courant induit, de même sens que les courants particuliers du fer doux.

De là les deux conclusions suivantes, tout à fait semblables à celles qui précèdent : — Au moment où un corps magnétique *s'aimante*,

il se produit, dans tout circuit fermé voisin, un courant induit, *inverse* des courants particuliers. — Au moment où ce corps *perd son aimantation*, il se produit un courant induit *direct*, c'est-à-dire de même sens que les courants particuliers.

On constatera, par des expériences semblables, que, si l'on *rapproche* un aimant d'un circuit fermé, il y a production d'un courant induit *inverse*. — Si l'on *éloigne* l'aimant, il y a production d'un courant induit *direct*.

521. Courants d'induction, produits sous l'influence de la terre. — La terre agissant, dans les phénomènes électriques ou magnétiques, soit comme un aimant orienté du nord au sud, soit comme un courant dirigé de l'est à l'ouest (299), il est naturel de penser que l'action de la terre doit produire des courants induits, dans les circuits fermés que l'on fait passer brusquement d'une orientation à une autre.

Lorsqu'on fait communiquer avec un galvanomètre les deux extrémités d'une spirale métallique, et qu'on change rapidement la position de cette spirale par rapport à la direction de l'aimant terrestre, on donne naissance dans le circuit à un courant d'induction. — Le sens de ces courants pourra être facilement prévu, dans chaque cas particulier, avec les notions qui précèdent.

522. Machine de Clarke. — La machine de Clarke est un appareil d'induction *magnéto-électrique*, c'est-à-dire où les courants d'induction sont produits par les changements de position d'un circuit fermé, par rapport à un aimant (520).

Une double bobinè H (*fig.* 219), couverte d'un fil métallique dont les tours contigus sont isolés les uns des autres, est supportée par 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 deux pôles sont placés à la même hauteur que l'axe de rotation A, autour duquel tourne le système des bobines.

Lorsqu'on met la roue R en mouvement, à l'aide d'une poignée qui y est fixée, l'axe A tourne sur lui-même, et entraîne avec lui les bobines — Or, dans ce mouvement, si l'une des bobines se rapproche de l'un des pôles de l'aimant fixe, il y a à la fois aimantation de son noyau, et production d'un courant induit dans le fil de la bobine, courant dont le sens est inverse de celui des courants particuliers qui prennent naissance dans le noyau. En même temps, l'autre bobine s'approche de l'autre pôle; et, comme ce pôle est contraire au premier, le courant induit qui se produit dans cette seconde bobine parcourrait le fil en sens contraire du précédent, si le fil était enroulé sur elle dans le même sens que sur la première ~~ou l'enroule en sens contraire~~, de sorte que les deux cou-

rants induits produits au même instant par les deux pôles ont, dans le fil, la même direction, et leurs intensités s'ajoutent. On peut donc, pour

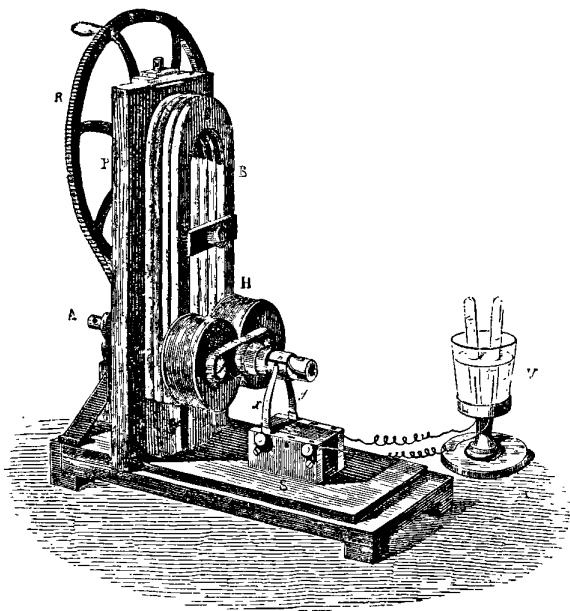


Fig. 219. — Machine de Clarke.

se rendre compte du sens des courants induits qui parcourent le fil, considérer seulement l'une des bobines.

Or, remarquons que, au moment où l'une des bobines arrive devant l'un des pôles de l'aimant, elle passe d'une série de positions qui la rapprochaient successivement de ce pôle, à une série de positions qui l'en éloignent : donc l'aimantation de son noyau, qui avait été en augmentant, commence alors à diminuer, et les courants induits qui prennent naissance dans le fil, par la continuation du mouvement, changent de sens. — Donc, si l'on réunit les extrémités du fil des bobines de manière à fermer le circuit, toutes les parties de ce circuit lui-même seront parcourues par des courants induits dont le sens changera à chaque demi-révolution des bobines.

Il est des circonstances où ce changement de sens des courants induits successifs n'a aucun inconvénient. — Par exemple, lorsqu'on veut em-

ployer la machine de Clarke à obtenir des commotions, en prenant dans les mains les poignées M, M' (fig. 220) qui communiquent avec les deux

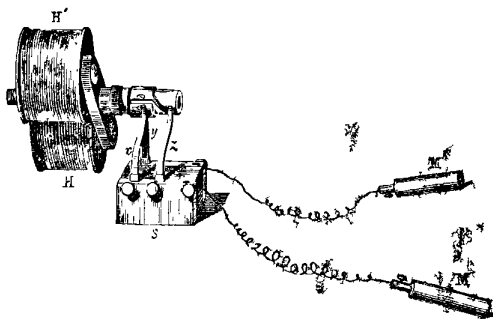


Fig. 220.

extrémités du fil; ou à déterminer des étincelles, en établissant dans le circuit des solutions de continuité; ou bien encore à faire rougir un fil fin placé dans le circuit: dans ces divers cas, il n'y a à prendre, pour ob-

tenir des effets satisfaisants, que quelques précautions secondaires, dans le détail desquelles nous ne pouvons entrer, et les changements de sens alternatifs des courants n'ont aucun inconvénient.

Mais si l'on se propose de décomposer de l'eau placée dans un voltamètre V (fig. 219), dont on aura réuni les deux fils aux extrémités du fil de l'appareil, on obtiendrait, si les courants induits qui traversent le voltamètre changeaient de sens à chaque demi-révolution, un mélange d'hydrogène et d'oxygène dans chacune des deux éprouvettes. Pour obtenir les gaz séparés, il est nécessaire d'adapter, sur l'axe de rotation, un commutateur formé de petites plaques métalliques qui sont isolées l'une de l'autre, et qui viennent toucher successivement les deux ressorts x , y , auxquels aboutissent les fils du voltamètre. Ces plaques sont disposées de façon que les communications soient interverties chaque fois que le sens des courants induits change, et que, par suite, ces courants traversent toujours le voltamètre dans le même sens.

323. Bobine d'induction de M. Ruhmkorff. — Dans l'appareil construit par M. Ruhmkorff, les courants induits sont produits par les alternatives de cessation et de rétablissement d'un courant inducteur.

Sur un cylindre de bois, on a enroulé d'abord un fil *inducteur*, dans lequel on fera 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. 221), terminée par deux disques de verre. — Dans l'intérieur de cette bobine, est placé un faisceau de fils de fer doux, qui s'aimante sous l'action du courant inducteur, chaque fois que ce courant est établi, et qui perd son aimantation chaque fois que ce courant est interrompu. Ce faisceau de fils de fer doux agit ainsi sur le

fil induit, aux mêmes instants que le courant inducteur lui-même et dans le même sens, d'où résulte que les courants induits, produits par ces

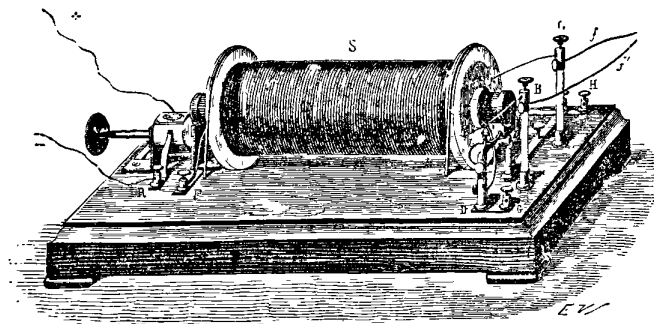


Fig. 221. — Bobine de M. Ruhmkorff.

deux actions concordantes, acquièrent des intensités plus grandes (320).

Dans la plupart de ces appareils, les alternatives de cessation et de rétablissement du courant inducteur sont produites par un *interrupteur*, qui est joint à la bobine elle-même. Il se compose d'un petit marteau dont la tête *o*, qui est en fer doux, est placée au-dessous de l'extrémité du faisceau de fils de fer, à une très-petite distance; le manche du marteau, qui est en cuivre, est articulé à la partie supérieure de la colonne métallique *D*; au-dessous de la tête du marteau, est une sorte de petite enclume *e*, formée par un cylindre de cuivre vertical. — On a représenté, sur la gauche de la figure, les deux conducteurs, marqués des signes + et —, qui mettent la pile en communication avec le fil *inducteur* de la bobine; mais les diverses pièces sont disposées de façon que le courant, avant d'arriver à ce fil inducteur, passe par l'enclume *e* et par le marteau qui est appliqué sur elle. Dès lors, dès que ce courant est établi, le faisceau de fils de fer s'aimante, attire la tête du marteau, lui fait abandonner l'enclume, et le circuit inducteur est interrompu: cette rupture détermine la cessation du magnétisme dans le faisceau de fils, 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*: si donc on réunit les extrémités du fil induit (représentées à droite de la figure en *B* et *C*), on obtiendra, dans ce circuit, une série de courants dirigés alternativement dans un sens et dans l'autre.

Si l'on adapte, en B et C, deux fils, f et f' , dont les extrémités soient séparées par un petit intervalle, on obtient une succession d'étincelles, qui peuvent jaillir dans l'air à une distance de plusieurs centimètres.

324. Tubes de Geissler. — Lorsqu'on fait communiquer les extrémités du fil induit d'une bobine de Ruhmkorff avec un espace contenant un gaz raréfié, on obtient, non plus des étincelles, mais 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*, et que M. Alvergniat construit avec une grande perfection. — On leur donne les formes les plus diverses : la figure 222 représente l'une des plus simples. — Aux deux extrémités A et B du tube, sont soudés des fils métalliques, munis de petits anneaux qui serviront à fixer les deux extrémités du fil induit de la bobine : après avoir poussé très-loin la raréfaction du gaz, on a fermé le tube à la lampe, et on peut le faire servir à un nombre indéfini d'expériences. — Le fil A, qui communique avec le conducteur 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 le contient. 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 du tube ne présente 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.

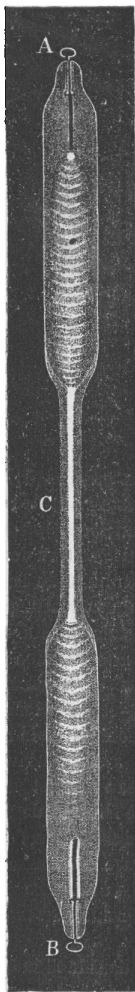


Fig. 222.

TÉLÉPHONES.

524 a. **Téléphone de Bell.** — L'une des applications les plus remarquables des courants électriques est celle qui a conduit à l'invention du

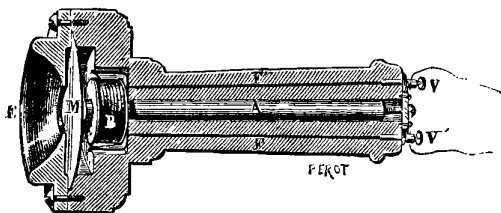


Fig. 222a. — Téléphone de Bell,

téléphone, pour la transmission du son ou de la parole à de grandes distances.

Le téléphone imaginé en Amérique par M. Bell se compose d'une petite plaque mince de fer M (fig. 222a), placée au fond d'une embouchure E, et derrière laquelle est fixée, à une petite distance, une tige d'acier aimantée A. Sur cette tige est assujettie une petite bobine B, sur laquelle est enroulé un fil métallique 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 fixe des fils conducteurs, qui mettent l'appareil en communication avec un autre appareil identique, placé au point où se trouve la personne avec laquelle on doit entrer en conversation. Nous supposons que toutes 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 E₁ 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 son 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 (520). 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.

du *récepteur*, augmentent ou diminuent alternativement le magnétisme de son aimant A_1 , ils ont donc pour effet de déterminer des rapprochements ou des éloignements alternatifs de la plaque de fer M_1 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_1 est ainsi mis en vibration, et communique le son à l'oreille de celui qui écoute.

En intervertissant les rôles des deux appareils, les interlocuteurs peuvent faire fonctionner chacun d'eux alternativement comme *transmetteur* ou comme *récepteur*.

324 b. **Combinaison du microphone et du téléphone.** — 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. 222b); entre elles est placé une sorte de crayon

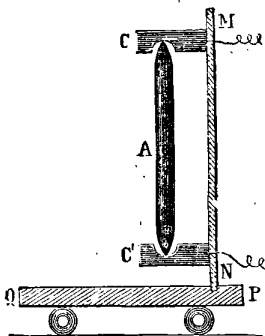


Fig. 222b. Microphone de M. Hughes.

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* : elle va jouer le rôle de *transmetteur*. Le téléphone fonctionnera ici exclusivement comme *récepteur*.

Dès qu'on produit un son quelconque dans le voisinage du microphone, les vibrations 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.

C'est une disposition de ce genre, avec diverses modifications, qui permet de mettre en relation directe les personnes placées aux points les plus éloignés d'une grande ville. — Chaque station téléphonique doit alors avoir son *microphone-transmetteur* et son *téléphone-récepteur*.

(*) Voir la note (1) du chapitre IV de l'Université Lille 1

LIVRE IV. — ACOUSTIQUE

CHAPITRE PREMIER

PRODUCTION ET PROPAGATION DU SON

325. **Production du son.** — Un son quelconque est toujours produit par un mouvement vibratoire, imprimé à un corps matériel.

Il est des circonstances où ces mouvements vibratoires sont perceptibles à l'œil; si, par exemple, on fixe dans un étau une lame d'acier AB (fig 225), en lui laissant d'abord une assez grande longueur au-dessus du point fixé C, et si, après l'avoir infléchie suivant Ca, on l'abandonne à elle-même, on la voit revenir vers sa position d'équilibre CA, dépasser cette position et arriver dans une position symétrique Ca', puis revenir en Ca, et ainsi de suite. La succession d'une allée et d'une venue de cette lame, partant, par exemple, de Ca pour revenir en Ca, constitue ce qu'on nomme une *vibration* complète. — Or, si la lame est assez longue et qu'elle ne soit pas trop rigide, on peut suivre à l'œil ses mouvements, mais on n'entend aucun son. En raccourcissant la partie vibrante, on obtient des vibrations de plus en plus rapides, et il arrive un moment où le son devient perceptible. A ce moment, on ne distingue plus les allées et venues, mais la lame semble éprouver une sorte de gonflement, qui est sensible surtout à son extrémité libre, et qui est dû à la persistance des impressions lumineuses.

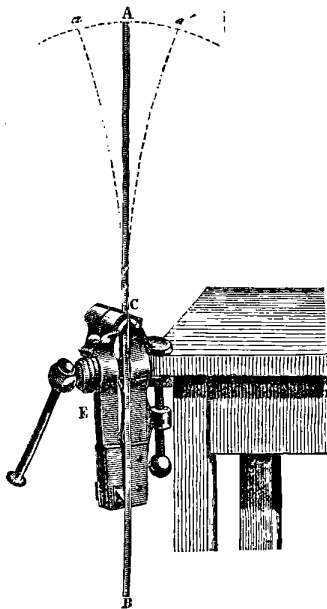


Fig. 225.

Les mêmes observations sont applicables à une corde tendue, que l'on met en vibration en l'écartant de sa position d'équilibre et l'abandonnant ensuite. On peut encore, en approchant l'ongle de la corde pendant qu'elle vibre, constater le mouvement vibratoire par la série de chocs qu'il produit. — De même, en plaçant une bille dans un timbre que l'on fait vibrer, on constate qu'elle est vivement projetée par les parois, tant que dure le mouvement vibratoire.

326. Le son ne se propage pas dans le vide. — Les mouve-

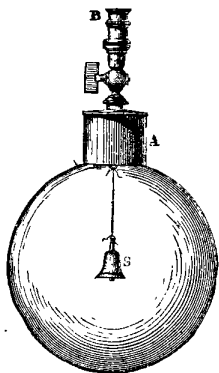


Fig. 224.

ments vibratoires qui constituent les sons ne peuvent parvenir à notre oreille qu'autant qu'ils lui sont transmis par un milieu matériel : ces mouvements ne se propagent pas dans le vide. — Pour le démontrer, il suffit de placer, au centre d'un ballon à robinet, une clochette S (fig. 224), suspendue par un fil de lin. Si le vide a été fait dans le ballon, et si on vient à l'agiter, on ne perçoit aucun son, bien qu'on voie le battant de la cloche en frapper les parois. Au contraire, si on laisse rentrer l'air par le robinet, le son reprend peu à peu son intensité primitive.

327. Propagation du son par les divers milieux. — C'est, en général, par l'intermédiaire de l'air que les sons nous parviennent : ils peuvent également se propager par les autres gaz ou par les vapeurs, comme

on le constate, dans l'expérience précédente, en faisant entrer dans le ballon un gaz quelconque, ou quelques gouttes d'un liquide qui se réduit facilement en vapeur.

Les sons se propagent encore par les liquides et par les corps solides, et l'on peut même dire que, dans ces milieux, l'intensité du son éprouve une diminution moindre, à une même distance, que dans les gaz. Chacun sait, par exemple, que, si deux expérimentateurs se placent chacun à l'une des extrémités d'une longue poutre, et si l'un d'eux vient à frapper légèrement sur le bois avec la pointe d'un canif, l'autre expérimentateur distingue le bruit de ces coups en appuyant l'oreille contre l'autre extrémité : il ne perçoit plus rien dès qu'il se place dans l'air, à la même distance. — C'est ainsi encore que, en appliquant l'oreille contre terre, on distingue le roulement d'une voiture à une grande distance, et alors qu'il n'en parvient aucun indice par l'air.

328. Vitesse de transmission du son dans l'air. — Les observations les plus ordinaires apprennent que la propagation du son dans l'air n'est pas instantanée. — Nous distinguons presque immédiatement

la lueur d'un coup de feu, tiré au loin dans une plaine : en effet, d'après les expériences précises qui seront indiquées plus loin, la vitesse de propagation de la lumière est si grande, qu'il est impossible de saisir, à quelques centaines de mètres de distance, l'intervalle qui s'écoule entre la production de la lumière et le moment où elle nous arrive. Au contraire, le bruit de l'explosion ne nous parvient que quelques instants après la lueur, et l'intervalle qui sépare les deux perceptions est d'autant plus grand que la distance est plus considérable.

Des expériences ont été instituées, à diverses reprises, pour mesurer la vitesse du son dans l'air, c'est-à-dire l'espace que le son parcourt dans l'air, pendant l'unité de temps. Nous citerons seulement celles qui furent exécutées, en 1822, par des membres du Bureau des longitudes. — Les observateurs s'étaient partagés en deux groupes, placés l'un à Villejuif, l'autre à Montlhéry. Une pièce de canon était disposée à chacune de ces deux stations ; il avait été convenu qu'un coup de canon serait tiré, à peu près toutes les cinq minutes, tantôt à l'une des stations, tantôt à l'autre, afin d'obtenir un résultat moyen indépendant de la direction du vent. Chaque fois qu'un coup de canon était tiré en l'un des points, les observateurs placés à l'autre notaient, au moyen de chronomètres, l'instant où ils apercevaient la lumière, et l'instant où ils entendaient le bruit : l'intervalle qui séparait ces deux instants faisait connaître le temps nécessaire à la propagation du son, en supposant la transmission de la lumière instantanée. Il ne restait qu'à diviser la distance des deux stations par cet intervalle de temps, pour obtenir la vitesse du son. — Par cette méthode, on trouva, pour la vitesse du son dans l'air, à la température de 16°, le nombre 340^m,9 par seconde.

Une formule due à Newton permet de déduire de ce résultat la vitesse de propagation du son dans l'air, à la température de zéro. Elle est de 331^m,5 par seconde.

Il est bon de remarquer enfin que, à une même température, la vitesse de propagation des sons les plus divers est toujours la même. Il suffit, pour s'en convaincre, de remarquer que les notes d'un morceau de musique, exécutées par les divers instruments d'un orchestre, arrivent à une grande distance sans que leur ordre de succession, ni les intervalles qui les séparent, soient en rien altérés.

329. Vitesse du son dans les gaz, dans les liquides et dans les solides. — La vitesse du son dans les gaz a été déterminée, par les physiciens, au moyen de méthodes particulières, fondées sur les lois des vibrations des tuyaux sonores. — On trouve ainsi que, dans l'acide carbonique, la vitesse du son est un peu moindre que dans l'air. Dans l'hydrogène, elle est environ quatre fois plus grande que dans l'air.

La vitesse du son dans l'eau a été déterminée, en 1827, par MM. Sturm

et Colladon, au moyen d'expériences directes, faites sur le lac de Genève. Une cloche suspendue à un bateau, et plongée dans l'eau, était frappée par un marteau : le mouvement même du manche de ce marteau mettait le feu à un tas de poudre. Sur le rivage opposé, un observateur, muni d'un cornet acoustique dont le pavillon plongeait dans l'eau, notait l'instant où il apercevait l'inflammation de la poudre, et l'instant où le son lui était transmis par l'eau. Il ne restait qu'à diviser la distance par le temps écoulé entre ces deux instants, pour avoir la vitesse du son. — On trouva ainsi, pour la vitesse du son dans l'eau, à la température de 8 degrés, le nombre 1435 mètres par seconde.

La vitesse du son dans les métaux est plus grande encore. Des expériences de M. Biot, faites sur des tuyaux de fonte destinés à la conduite des eaux, ont montré que la vitesse du son dans la fonte est environ dix fois et demie égale à la vitesse dans l'air.

330. Intensité. — Lorsque toutes les conditions extérieures restent les mêmes, l'intensité du son dépend de l'amplitude des vibrations du corps sonore. — C'est ce qu'il est facile de vérifier en faisant vibrer une corde tendue : selon qu'on l'écarte plus ou moins de sa position d'équilibre, elle rend un son plus ou moins intense. — Si on la laisse vibrer pendant un certain temps, l'oreille constate une diminution progressive d'intensité, en même temps que l'œil voit les vibrations diminuer d'amplitude.

331. Hauteur. — La hauteur d'un son, c'est-à-dire son degré d'aiguëté ou de gravité, dépend du nombre de vibrations qu'effectue le corps sonore dans un temps déterminé.

Plusieurs méthodes ont été employées pour déterminer les nombres de vibrations effectuées par les corps sonores : or, dans toutes les circonstances où l'on peut compter les nombres de vibrations de divers sons, on constate que deux sons de même hauteur ou à l'unisson correspondent toujours à des nombres égaux de vibrations dans le même temps. — On constate de même que, de deux sons de hauteurs différentes, c'est toujours le plus haut qui correspond au plus grand nombre des vibrations dans le même temps. Cette dernière proposition se démontre facilement, comme on va le voir, au moyen de la sirène.

332. Sirène. — La sirène, dont l'invention est due à Cagniard de La-tour, est représentée en coupe verticale par la figure 225. A sa partie inférieure, est une caisse cylindrique de laiton H, dans laquelle on insuffle de l'air par le tube F, à l'aide d'une soufflerie. La base supérieure de la caisse est un plateau circulaire tt, percé d'un certain nombre de trous O, O, également espacés sur une circonférence. Un plateau SS, mobile autour d'un axe d'acier vertical, est placé parallèlement au plateau fixe et à une petite distance : il est percé de trous, en nombre égal à ceux du premier, et leur correspondant exactement. — Ces trous ont leurs

axes obliques par rapport aux plans des plateaux, mais les trous du plateau fixe sont inclinés en sens contraire de ceux du plateau mobile; c'est ce que montre la figure 226, dont la partie inférieure représente une section verticale des deux plateaux, par un plan vertical mené suivant la ligne XY, et passant par les axes de deux ouvertures correspondantes, *u*, *u'*.

Supposons que, au commencement d'une expérience, les trous du plateau mobile correspondent exactement à ceux du plateau fixe; l'air, amené par la soufflerie dans la caisse H, peut s'écouler par chacun des canaux coudés *uu'* (fig. 226) : mais, en arrivant contre la paroi du canal *u*, il exerce sur elle une pression qui met en mouvement le plateau mobile. Les deux systèmes d'ouvertures cessent donc de coïncider; mais la coïncidence se rétablit lorsque le plateau mobile a tourné d'un angle égal à celui qui correspond à l'intervalle de deux trous consécutifs; l'air s'échappe alors de nouveau, communique au plateau mobile une nouvelle impulsion qui accélère son mouvement, continuant de faire arriver l'air de la soufflerie, on augmente progressivement la vitesse de rotation, on entend un son qui est d'abord très-grave, mais qui devient ensuite de plus en plus aigu. Ce son est dû à la sortie périodique de l'air, comme il est facile de s'en rendre compte.

Supposons qu'on opère avec une sirène portant 20 trous à chacun de ses plateaux. — Si le plateau mobile n'avait qu'un seul trou, ce trou unique viendrait, à

chaque tour, se mettre successivement en coïncidence avec les 20 trous du plateau fixe, de sorte que, à chaque tour, la sortie de l'air serait 20 fois établie et interrompue : le là, des impulsions périodiques, communiquées à l'air extérieur, lequel réagit ensuite, en vertu de son élasticité, dès que cette impulsion cesse; de là, en d'autres termes, un mouvement vibratoire, produisant un son. — Si le plateau mobile porte 19 autres trous, il est clair que, à chacun des instants où le trou précédent se trouvera au-dessus de l'une des ouvertures du plateau

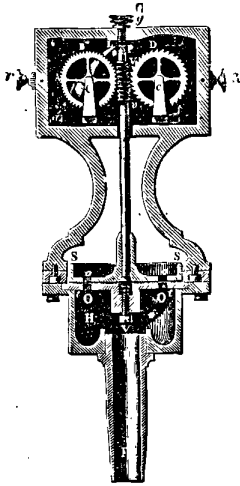


Fig. 225. — Sirène.

et ainsi de suite. — Si, en

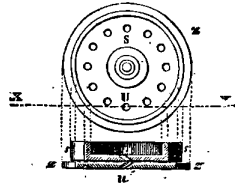


Fig. 226.

fixe, tous les autres correspondront à d'autres ouvertures : par suite, la sortie de l'air s'effectuera à la fois par 20 ouvertures, mais elle ne sera encore établie que 20 fois pendant un tour du plateau mobile; il n'y aura donc toujours que 20 vibrations produites, à chaque tour du plateau. Le son aura donc *une intensité plus grande*, mais il conservera *la même hauteur*, si la vitesse du plateau reste la même.

Pour pouvoir compter les nombres de vibrations qui correspondent aux divers sons, on a pratiqué, à la partie supérieure de l'axe de rotation du plateau mobile, un filet de vis *Vv* (fig. 225), qui engrène avec une roue dentée *B* dont la circonférence porte 100 dents : à chaque tour du plateau, cette roue avance d'une dent, et fait marcher d'une division une aiguille placée à l'extérieur, et mobile sur un cadran ; la circonférence du cadran est partagée en 100 divisions. Une seconde roue *D*, portant également sur son axe une aiguille qui se meut sur un cadran extérieur, est destinée à compter les centaines de tours : pour cela, on a fixé à l'axe de la roue *B* un appendice *Ll*, dont l'extrémité *L* arrive en contact avec une dent de *D* chaque fois que la roue *B* a fait un tour entier ; la roue *D* avance alors d'une dent, et l'aiguille qu'elle porte marche d'une division. — Enfin, il est utile de pouvoir, à volonté, faire engrener la roue *B* avec la vis *Vv*, ou interrompre l'engrenage : pour cela, la plaque métallique qui porte les roues *B* et *D* reçoit un petit mouvement de gauche à droite, ou de droite à gauche, selon qu'on presse le bouton *r* ou le bouton *R* : on rapproche ou l'on éloigne ainsi les dents de la roue *B* du filet de la vis *Vv*.

Lorsqu'on veut déterminer 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 en prise. On donne le vent, et on le règle de manière à amener le son de la sirène à l'unisson de celui qu'on se propose d'étudier ; on presse alors le bouton *r*, pour établir l'engrenage, et l'on note cet instant sur une montre à secondes. On maintient l'unisson aussi longtemps que possible ; et l'on termine l'expérience en poussant le bouton *R*, et notant encore cet instant. On connaît ainsi le nombre de tours effectués par le plateau en un temps déterminé : il est facile d'en déduire quel est le nombre de vibrations par seconde qui correspond au son produit. — En effet, supposons, par exemple, que, après une expérience qui a duré 2 minutes 10 secondes, ou 130 secondes, l'aiguille des tours marque 50 et que l'aiguille des centaines marque 27. Le plateau ayant fait 2750 tours, s'il a 20 trous, il s'est produit, en tout, 2750×20 ou 54600 vibrations ; par suite, en une seconde, $\frac{54600}{150}$ ou 420 vibrations.

533. Des causes générales des différences de timbres.

— On observe que les sons produits par divers corps, des

différences qui ne sont ni des différences de hauteur, ni des différences d'intensité, et qui sont cependant parfaitement appréciables pour l'oreille ; c'est ce que l'on désigne sous le nom de différences de *timbres*. C'est ainsi, par exemple, qu'une même note musicale, donnée avec la même intensité par une trompette, par un violon et par la voix humaine, nous offre un caractère parfaitement distinct dans ces trois circonstances.

Les causes de ces différences ont été longtemps mal définies : on doit aux travaux récents de M. Helmholtz quelques résultats précis à cet égard. — Il suffit d'une observation attentive pour constater qu'une note rendue par une corde de violon ou de piano n'est généralement pas un son simple : l'oreille entend, en même temps que la note principale, qui produit la sensation dominante, plusieurs notes concomitantes. Il en est de même dans presque tous les cas où les notes se présentent avec un caractère vraiment musical et agréable à l'oreille. — M. Helmholtz a montré qu'une même note, rendue par divers instruments, est accompagnée d'un *système* de notes accessoires, qui est déterminé pour chacun d'eux, mais *variable d'un instrument à un autre* : c'est à cette cause qu'il convient d'attribuer les différences que ces instruments présentent quant à leur timbre. — Il en est de même des différences qu'offre la voix humaine, chez les individus ayant différents *timbres de voix*.

Enfin, ces études ont encore montré que, lorsqu'une même personne donne une même note sur des voyelles différentes, le son complexe qu'elle émet est toujours formé par le même ensemble de notes, mais que, parmi les notes accessoires, telles ou telles notes prennent une intensité plus grande, selon la voyelle qui est émise. Les diverses voyelles constituent donc des sons qui ne présentent entre eux que des différences de timbres.

CHAPITRE II

GAMMES ET INTERVALLES MUSICAUX

354. Définitions. — Deux sons d'inégale hauteur différent entre eux, comme nous l'avons vu (357), par le nombre des vibrations effectuées dans le même temps. — On appelle *intervalle* de deux sons, *le rapport des nombres de vibrations qui leur correspondent, dans des temps égaux*. Ainsi, si deux sons correspondent, l'un à 400 vibrations par seconde,

l'autre à 300 vibrations par seconde, l'intervalle de ces deux sons est $\frac{4}{3}$.

Si deux sons correspondent à un même nombre de vibrations dans le même temps, ce qui constitue l'*unisson*, leur intervalle est égal à l'unité.

On dit qu'un son est à l'*octave aiguë* 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 ordinairement, l'intervalle de deux sons déterminés n'est pas représenté par un nombre entier ; mais si l'on calcule cet intervalle sous la forme d'une expression fractionnaire irréductible, on trouve, en général, que les termes de cette expression sont des nombres d'autant plus petits, que la consonnance formée par la production simultanée des deux sons est plus agréable pour l'oreille. — Aussi, les nombres de vibrations des sons que les musiciens font entendre *simultanément* sont-ils en général dans des rapports très-simples.

555. **Gamme.** — On donne le nom de *gamme* à une série de sons ou *notes*, au nombre de huit, dont les extrêmes sont formés par un son quelconque et par son octave. — Désignons les notes dont elle se compose par les noms : *ut, ré, mi, fa, sol, la, si, ut₂*. Ces noms suffisent, avec quelques conventions accessoires, pour toutes les exigences de la notation musicale.

Si l'on détermine, au moyen de la sirène, par exemple, les nombres de vibrations des différents sons de la gamme, et si on divise chacun d'eux par le nombre de vibrations de *ut*, on trouve les quotients qui suivent :

<i>ut</i>	<i>ré</i>	<i>mi</i>	<i>fa</i>	<i>sol</i>	<i>la</i>	<i>si</i>	<i>ut₂</i>
1	$\frac{9}{8}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{15}{8}$	2.

Ces notes conduisent donc, de la première d'entre elles à son *octave aiguë*, par une série d'intervalles qu'on calculera en divisant le nombre de vibrations de chaque son par le nombre de vibrations du son précédent. Ces intervalles, et les noms qu'ils ont reçus dans l'harmonie, sont indiqués dans le tableau ci-dessous :

	INTERVALLES NUMÉRIQUES.	NOMS DES INTERVALLES.
<i>Ut</i> à <i>ré</i>	$\frac{9}{8} : 1 = \frac{9}{8}$ ton majeur.
<i>Ré</i> à <i>mi</i>	$\frac{5}{4} : \frac{9}{8} = \frac{10}{9}$ ton mineur.
<i>Mi</i> à <i>fa</i>	$\frac{4}{3} : \frac{5}{4} = \frac{16}{15}$ demi-ton majeur.
<i>Fa</i> à <i>sol</i>	$\frac{3}{2} : \frac{4}{3} = \frac{9}{8}$ ton majeur.

INTERVALLES NUMÉRIQUES. NOMS DES INTERVALLES.

<i>Sol</i> à <i>la</i>	$\frac{5}{5} : \frac{3}{2} = \frac{10}{9}$... ton mineur.
<i>La</i> à <i>si</i>	$\frac{15}{8} : \frac{5}{5} = \frac{9}{8}$ ton majeur.
<i>Si</i> à <i>ut</i>	$2 : \frac{15}{8} = \frac{16}{15}$ demi-ton majeur.

On donne encore, en harmonie, des noms particuliers aux intervalles compris entre deux notes quelconques de la gamme. Ainsi, l'intervalle d'une note à celle qui la suit immédiatement (*ut* à *re*) prend le nom d'intervalle de *seconde*. — L'intervalle d'une note à une autre note séparée de la première par une note intermédiaire (*ut* à *mi*) est un intervalle de *tierce*. — De même l'intervalle de *ut* à *fa* est un intervalle de *quarte*. — L'intervalle de *ut* à *sol* est un intervalle de *quinte*. — L'intervalle de *ut* à *la* est un intervalle de *sixte*. — L'intervalle de *ut* à *si* est un intervalle de *septième*.

La première note de la gamme prend le nom de *tonique*. — On peut évidemment, après avoir formé une première gamme, prendre pour tonique l'octave aiguë de la tonique de la première, et obtenir une seconde gamme, dont toutes les notes seront les octaves aiguës des notes correspondantes de la première, et ainsi de suite. On formera ainsi une échelle musicale, où les notes deviendront de plus en plus aiguës, à mesure qu'on passera d'une gamme à la suivante.

356. Dièzes et bémols. — Lorsqu'on a formé une suite de gammes successives, dans lesquelles les intervalles sont ceux que nous avons indiqués, on peut se proposer de former, avec les notes mêmes de ces gammes, de nouvelles gammes dans lesquelles on prendrait pour *toniques* d'autres notes que les octaves de celle qui a été prise pour point de départ. — Alors, si l'on veut conserver entre les notes de ces nouvelles gammes les mêmes intervalles que dans la gamme fondamentale, on est amené à intercaler quelques nouveaux sons entre ceux qui ont été définis : on est ainsi conduit à la considération des *dièzes* et des *bémols*.

Ainsi, par exemple, si l'on voulait passer de la gamme d'*ut* à une gamme qui aurait pour tonique la quinte d'*ut*, c'est-à-dire *sol*, et former une gamme dont les notes fussent *sol*, *la*, *si*, *ut*, *ré*, *mi*, *fa*, *sol*₂, il est aisé de voir que le sixième intervalle (*mi* à *fa*), au lieu d'être d'un ton, comme dans la gamme d'*ut*, ne serait que d'un demi-ton. Si donc on veut, avec *sol* pour tonique, conserver les intervalles qui caractérisent la gamme, il est nécessaire de substituer, à la note précédente *fa*, une note plus élevée. On emploie alors une note dont le nombre de vibrations s'obtient en multi-

pliant celui de *fa* par $\frac{25}{24}$: cette nouvelle note prend le nom de *fa dièze*, et s'indique par *fa #*.

On verra de même que, en prenant pour tonique la quinte de cette gamme de *sol*, c'est-à-dire *ré*, et cherchant à former une gamme dont les notes soient *ré, mi, fa, sol, la, si, ut, ré*, on sera conduit à substituer, à la note *ut*, une note plus élevée, c'est-à-dire *ut #*, et ainsi de suite.

Des considérations analogues conduisent à l'introduction des *bémols*. — Proposons-nous, par exemple, de former une gamme en prenant pour tonique la quarte d'*ut*, c'est-à-dire *fa*; nous serons conduits à une gamme dont les notes seront *fa, sol, la, si, ut, ré, mi, fa*. Mais, dans cette gamme, le troisième intervalle (*la à si*), qui devrait être d'un demi-ton, est d'un ton; le quatrième intervalle, qui devrait être 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 b*.

On verra de même que, en prenant pour tonique la quarte de cette gamme de *fa*, c'est-à-dire *si b*, on sera conduit à substituer, à la note *mi*, une note plus basse, c'est-à-dire *mi b*, et ainsi de suite.

337. Accord parfait. — On donne le nom d'*accord parfait* à la consonnance formée par la réunion de trois notes, dont les intervalles sont ceux qui existent entre la *tonique* d'une gamme, sa *tierce* et sa *quinte* : ces intervalles sont donc $\frac{4}{5}$ et $\frac{3}{2}$. L'accord parfait produit sur l'oreille une sensation plus agréable que la consonnance formée par la réunion de trois autres sons quelconques, dont les intervalles seraient différents.

Les notes *ut, mi, sol* forment un accord parfait. — D'après ce qui a été dit plus haut, il en est de même des notes *ré, fa #, la*. — Il en est de même encore des notes *si b, ré, fa*; etc.

338. Nombres absolus de vibrations des notes employées en musique. — Nous n'avons considéré jusqu'ici que les *rappports* ou *intervalles* des sons de l'échelle musicale : dans la pratique, il est nécessaire, pour accorder entre eux les divers instruments, de fixer le nombre *absolu* des vibrations, au moins pour l'un de ces sons.

D'après les conventions adoptées en France, l'*ut* le plus grave du violoncelle correspond à 65,25 vibrations par seconde; on le désigne, en acoustique, par ut_1 . Les notes comprises entre ut_1 et son octave aiguë sont désignées de même par l'indice 1. Les notes de l'octave suivante sont désignées par l'indice 2; et ainsi de suite. — Les notes comprises dans les octaves inférieures à ut_1 sont désignées, d'octave en octave, par les indices $\frac{1}{2}, \frac{1}{4}, \frac{1}{8}$, etc.

Pour accorder les instruments, on se sert ordinairement d'un diapason formé de deux branches d'acier, dont la distance va en diminuant vers leur extrémité libre. On peut le mettre en vibration, soit à l'aide d'un petit cylindre de bois ou de métal, qu'on fait passer de force dans l'intervalle de ses branches (fig. 227), soit au moyen d'un archet. — Le diapason normal donne la note la_3 , dont la valeur a été fixée à 435 vibrations par seconde.

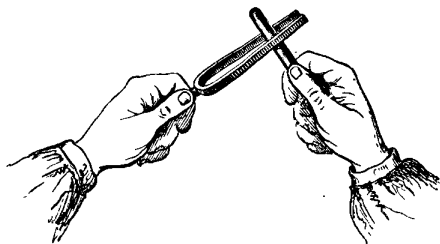


Fig. 227.

VIBRATIONS DES CORDES

359. Vibrations transversales des cordes. — Pour étudier les lois des vibrations transversales des cordes, on les tend sur un instrument qui porte le nom de *sonomètre*, et que nous allons d'abord décrire.

Une caisse en bois de sapin MN (fig. 218) porte, sur sa face supérieure, au voisinage de ses extrémités, des chevalets fixes B, B', séparés l'un de l'autre par une distance d'un mètre. Sur ces chevalets, s'appuie une pre-

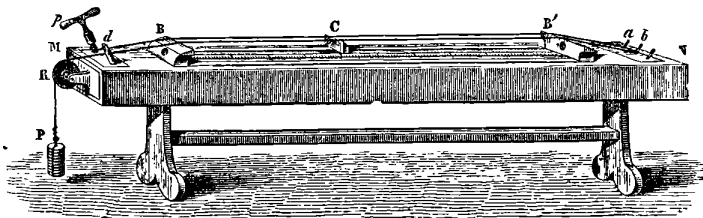


Fig. 228.

mière corde métallique, tendue entre les chevilles a et d : la clef p permet de régler à volonté la tension de cette corde, et, par suite, le son qu'elle rend. A la cheville b , est assujettie une autre corde métallique, qui, s'appuyant sur les chevalets B', B, vient passer sur la poulie R et soutient en P un poids. De petits chevalets mobiles, tels que C,

peuvent être placés sous les cordes, pour limiter à volonté la longueur des parties vibrantes : une règle divisée en millimètres permet de déterminer leurs positions. — Pour produire les vibrations transversales, on ébranle les cordes, soit en les pinçant, c'est-à-dire en les écartant de leur position d'équilibre et les abandonnant ensuite à elles-mêmes, soit en les frottant avec un archet perpendiculairement à leur direction.

Pour retrouver facilement les lois des vibrations transversales des cordes, il est commode de se souvenir que ces lois sont toutes comprises dans la formule

$$n = \frac{1}{2rl} \sqrt{\frac{gP}{\pi d}},$$

dans laquelle n désigne le nombre des vibrations effectuées en une seconde ; r le rayon de la corde et l sa longueur, en mètres ; d sa densité ; P le poids tenseur, exprimé en kilogrammes ; g l'accélération due à la pesanteur, dont la valeur à Paris est $9^m,8088$, et π le rapport de la circonférence au diamètre. — On voit que, pour les expériences faites en un même lieu, le nombre n de vibrations dépend de quatre quantités que l'on peut faire varier indépendamment les unes des autres, savoir : r , l , P , et d . De là, les quatre lois suivantes.

1° *Toutes choses égales d'ailleurs, les nombres de vibrations exécutées par deux cordes sont en raison inverse de leurs longueurs.*

Pour vérifier cette loi, la loi des longueurs, on fait vibrer d'abord, dans toute sa longueur, une corde fixée sur le sonomètre, et tendue par un poids arbitraire ; au moyen de la clef p , on accorde, par des tâtonnements, la corde fixe, de manière à la mettre à l'unisson avec la première. Si l'on place alors le chevalet C au milieu de la première corde, et qu'on fasse vibrer l'une des moitiés de cette corde, en comparant le son qu'elle rend au précédent, c'est-à-dire à celui que rend toujours la corde fixe, on constate que le second son est l'octave aigüe du premier : en d'autres termes, le nombre de vibrations est double (335). — On vérifiera de même que si l'on prend une longueur égale aux $\frac{2}{3}$ de la corde, on obtient la quinte du premier son : or, le nombre de vibrations de cette note est les $\frac{3}{2}$ du nombre de vibrations du premier, ce qui vérifie encore la loi, et ainsi de suite.

2° *Toutes choses égales d'ailleurs, les nombres de vibrations exécutées par deux cordes sont en raison inverse de leurs diamètres.*

Pour vérifier cette loi, la loi des diamètres, on prend deux cordes de même nature, la seconde ayant un diamètre égal à la moitié de celui de la première. La première étant fixée sur le sonomètre, et tendue au moyen d'un certain poids, on met la corde fixe à l'unisson avec elle ; puis, on lui substitue la seconde corde, en employant le même poids tenseur. En comparant le son rendu à celui de la corde fixe, on constate qu'il est à

l'*octave aiguë* du premier; c'est-à-dire qu'il correspond à un nombre de vibrations double de celui du premier. — On pourra de même vérifier la loi avec des cordes dont les diamètres présentent entre eux divers rapports déterminés.

3^e *Toutes choses égales d'ailleurs, les nombres de vibrations exécutées par une même corde sont proportionnels aux racines carrées des poids tenseurs.*

Pour vérifier cette loi, la *loi des tensions*, on tend une corde en *BR* sur le sonomètre, et on la charge en *P* d'un poids suffisant pour qu'elle rende un son facile à distinguer: on met la corde fixe *ad* à l'unisson avec elle. Cela fait, on met en *P* une charge quatre fois plus considérable: on obtient un son qui est l'*octave aiguë* du premier, c'est-à-dire dont le nombre de vibrations est deux fois plus grand. — Ainsi de suite, avec diverses charges.

4^e *Toutes choses égales d'ailleurs, les nombres de vibrations de deux cordes de natures différentes sont en raison inverse des racines carrées de leurs densités.*

Pour le vérifier, on fait usage de deux cordes de même diamètre, mais de nature différente, de cuivre et d'argent par exemple. On les charge de poids égaux, et l'on détermine le rang occupé, dans l'échelle musicale, par les sons qu'elles produisent; par suite, les nombres de vibrations qui leur correspondent. On constate que ces nombres sont en raison inverse des racines carrées des densités.

540. **Sons harmoniques. — Nœuds et ventres.** — Lorsqu'on attaque une corde *AB* (fig. 229), au moyen d'un archet, dans le voisinage de son milieu *M*, le gonflement apparent que cette corde éprouve pour

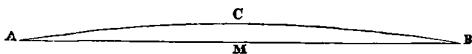


Fig. 229.

l'œil montre que tous ses points vibrent perpendiculairement à sa longueur: d'ailleurs, si l'on a placé en ses divers points de petits chevrons de papier, on voit qu'ils sont tous renversés dès qu'elle est ébranlée. — Le son que rend la corde dans ces conditions, est ce qu'on nomme le *son fondamental*.

Si maintenant on presse légèrement avec le doigt sur le milieu *M'* de la corde, et si l'on attaque avec l'archet l'une des deux moitiés, par exempl.

la moitié *A'M'* (fig. 230), on obtient un son que l'on reconnaît pour l'*octave ai-*



Fig. 230.

guë du son **FIS** **ELL** **AD** - Université Lille correspond à un nombre

double de vibrations dans le même temps (355). Or, dans ce cas, le milieu M' de la corde, maintenu par la pression du doigt, ne peut entrer en vibration; mais on constate que la seconde moitié $M'B'$ vibre en même temps que la première, car l'œil y constate le même gonflement apparent, et les petits chevrons de papier qu'on y aura placés sont renversés quand on attaque un point situé au voisinage du milieu I de $A'M'$. — La corde se partage donc en deux moitiés, qui vibrent séparément, comme deux cordes de longueur moitié moindre.

De même, si l'on presse avec le doigt sur le point D (fig. 231), qui partage la corde au *tiers*, et si l'on attaque avec l'archet un point de $A'D$, on obtient un son qui est la *quinte* de l'octave du son fondamental, et qui, par

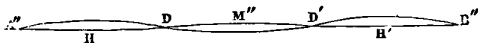


Fig. 231.

suite, correspond à un nombre de vibrations *triple* dans le même temps (355). On constate alors que le point D' , qui limite le second tiers de la corde, reste immobile comme le point D , et qu'un chevron placé en ce point y demeure sans être ébranlé: au contraire, les points compris dans l'intervalle de D à D' , et dans l'intervalle de D' à B'' , entrent en vibration. — La corde se partage donc en trois parties égales, vibrant séparément, comme trois cordes de longueur trois fois moindre.

On obtient des résultats analogues en partageant la corde en parties aliquotes quelconques de sa longueur.

Dans toutes ces expériences, des déterminations précises ont montré que les subdivisions contiguës de la corde, telles que $A'IM'$ et $M'I'B'$ (fig. 230), ou bien $A''HD$ et $DM''D'$ (fig. 231), vibrent, à chaque instant, en sens contraire; c'est-à-dire que, tandis que $A'M'$, par exemple, s'infléchit d'un côté de sa position d'équilibre, $M'B'$ s'infléchit de l'autre côté, et réciproquement.

Les points qui limitent les parties vibrantes, et qui restent immobiles, comme les extrémités A, B de la corde, ou les points D, D' (fig. 231), sont appelés *nœuds* de vibration. — Les milieux des parties vibrantes, où l'amplitude des vibrations est maximum, sont appelés *ventres* de vibration.

Les divers sons qu'on peut faire rendre à une même corde par le procédé que nous venons d'indiquer, sans modifier sa tension, prennent le nom de *sous harmoniques* de la corde. — Il résulte, de leur mode même de production, que leurs nombres de vibrations varient comme la suite des nombres naturels 1, 2, 3, 4, 5...

Remarque. — Lorsqu'on fait vibrer une corde un peu longue, sans exercer aucune pression dans l'intervalle de ses deux extrémités, une oreille un peu exercée perçoit toujours, en même temps que le son fon-

amental, un ou plusieurs des harmoniques de la corde. — Pour expliquer ce phénomène, il suffit d'admettre que la corde, en même temps qu'elle vibre en totalité, se subdivise en un certain nombre de parties, dont chacune vibre autour de ses extrémités propres comme si elles étaient fixes.

341. Vibrations longitudinales des cordes. — On peut faire vibrer les cordes dans le sens de leur longueur, en les frottant longitudinalement avec un morceau de drap saupoudré de colophane.

Les sons fondamentaux produits de cette manière sont toujours très-aigus, par rapport à ceux que donnent les vibrations transversales. — Les lois suivant lesquelles varient les nombres de vibrations des sons fondamentaux, avec la longueur, le diamètre et la densité de la corde, sont les mêmes que pour les vibrations transversales (339, 1^o, 2^o et 4^o) ; mais ils sont indépendants de la tension de la corde.

Les nombres de vibrations des harmoniques d'une même corde peuvent être représentés, comme pour les vibrations transversales (340), par la série des nombres naturels.

LIVRE V. — OPTIQUE

CHAPITRE PREMIER

PROPAGATION DE LA LUMIÈRE

342. Corps lumineux. — Corps transparents et corps opaques. — Certains corps, comme le soleil, les étoiles, les corps incandescents, émettent une lumière qui émane d'eux-mêmes, car ils sont visibles pour notre œil sans l'intervention d'aucune lumière étrangère : nous désignerons ces corps sous le nom de *sources lumineuses*. — Au contraire, la plupart des corps qui nous entourent sont invisibles dans l'obscurité ; ils ne deviennent visibles qu'à la condition d'être *éclairés*, c'est-à-dire de recevoir d'une source la lumière qu'ils renvoient à notre œil. — Dans les phénomènes que nous devons 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 pourrions donc comprendre tous les corps visibles à notre œil sous le nom de *corps lumineux*. IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

Nous appellerons *corps transparents* les corps, comme l'air, l'eau, le verre, au travers desquels la lumière peut se transmettre; *corps opaques*, les corps qui interceptent le passage de la lumière; tels sont le bois, les métaux, sous une épaisseur suffisante, etc.

343. Propagation rectiligne de la lumière dans un milieu homogène. — 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. — En effet, un point lumineux étant placé en un point A, et l'œil en un point B, si l'on dispose un petit écran opaque en un point quelconque de la droite AB, l'œil cesse d'apercevoir le point A. Pour toute autre position de l'écran, le point lumineux continue d'être visible comme si l'écran n'existait pas.

On appelle *rayon lumineux* la direction rectiligne suivant laquelle la lumière se propage. — Toute ligne droite menée d'un point quelconque d'un corps lumineux à un autre point de l'espace représente la direction d'un rayon lumineux.

344. Ombre. — Pénombre. — Un corps opaque arrête tous les rayons lumineux qui le rencontrent : il y a donc généralement, derrière un corps opaque, un espace où ne pénètre aucune lumière, et qu'on appelle *ombre portée*. — Les limites de l'ombre portée peuvent toujours être déterminées géométriquement, en s'appuyant sur le principe de la propagation rectiligne.

Soit une source lumineuse S (*fig. 252*), dont nous supposons les dimensions réduites à un point, et un corps opaque C, de forme quelconque. Menons par le point S une droite tangente au corps opaque, et supposons qu'elle se meuve, en passant toujours par S et restant tangente à C, de manière à occuper toutes les positions possibles : elle décrira une surface conique ayant pour sommet S et contenant C dans son intérieur.

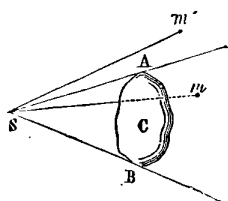


Fig. 252.

Si l'on prend un point quelconque *m* dans 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.

Supposons maintenant que la source de lumière ait des dimensions sensibles, et considérons, en particulier, le cas où le corps lumineux est une sphère et le corps opaque une sphère. — Soit S (*fig. 253*) la sphère lumineuse, O la sphère opaque. Construisons le cône ARB tangent exté-

rièvement 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 ; au contraire, un point situé en dehors de ce cône peut toujours recevoir certains rayons lumineux. Donc la surface du cône ARB limite la région de l'ombre portée; la circonférence abc , suivant laquelle il touche la sphère O , limite, sur cette sphère

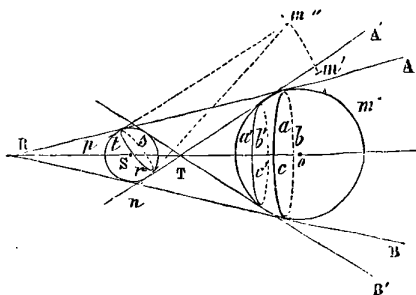


Fig. 235.

elle-même, la région qui est complètement dans l'ombre. — Si maintenant on considère les points situés en dehors du cône ARB , on peut se demander si tous ceux qui sont à égale distance de S sont également éclairés. Construisons 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, 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 zone sphérique située en avant de cette circonférence, et cette zone a toujours la même grandeur, quelle que soit la position du point m'' , pourvu qu'on le prenne à la même distance de S , et en dehors du cône $A'TB'$. Au contraire, la même construction, faite en prenant le point m' pour sommet, fournit sur la sphère S une zone qui est égale à la précédente, mais dont la lumière n'arrive qu'en partie au point m' , parce que la sphère opaque intercepte une portion des rayons lumineux, portion d'autant plus considérable que m' est plus voisin de la surface du cône ARB . On voit donc que l'espace compris entre les deux cônes ARB , $A'TB'$ est moins éclairé que l'espace extérieur, et la lumière reçue par des points également distants de S va en diminuant à mesure qu'on s'approche de la limite de l'ombre portée. — C'est cet espace qui reçoit le nom de *pénombre*. Le cercle de contact $a'b'c'$ limite, sur la sphère opaque elle-même, la région de la pénombre : la partie qui est en avant de ce cercle est seule en pleine lumière.

545. Vitesse de la lumière. — La vitesse de la lumière a été d'abord mesurée par Ole Rømer à l'aide des observations astronomiques : l'observation

des éclipses des satellites de Jupiter a conduit l'astronome danois Røemer à la considérer comme ayant une valeur d'environ 77 000 lieues par seconde, ou 308 000 kilomètres.

On doit à M. Fizeau un procédé qui permet de déterminer la vitesse de la lumière, en opérant sur des distances de quelques kilomètres. Un autre procédé, dû à Foucault, permet même d'effectuer cette détermination sur une distance de quelques mètres. La valeur la plus probable qui résulte de ces diverses expériences est environ 300 000 kilomètres par seconde.

MESURE DES INTENSITÉS RELATIVES DES LUMIÈRES

346. Intensités d'une même source à diverses distances.

— *Les quantités de lumière reçues normalement par une même surface, à différentes distances d'une même source, sont en raison inverse des carrés des distances.* — Ce principe, identique à celui qui a été énoncé précédemment pour la chaleur rayonnante, se démontre théoriquement de la même manière (147).

Il est facile de le vérifier par l'expérience, en constatant que, si une surface déterminée reçoit une certaine quantité de lumière, d'une source placée à une distance de 1 mètre, et si on vient à transporter cette même surface à une distance de 2 mètres, il faut, pour produire le même éclaircissement, quatre sources égales à la première.

347. Intensités relatives des sources lumineuses. — Deux sources lumineuses ont des *intensités égales*, lorsque, placées de la même manière par rapport à une même surface, elles l'éclairent également.

L'intensité d'une source lumineuse B est dite *double, triple* de celle d'une source A, quand la source B produit, sur une surface donnée, le même éclaircissement que deux, trois sources égales à A, agissant simultanément et dans des conditions identiques.

348. Méthode générale de comparaison des intensités propres des lumières, ou photométrie. — Nous considérerons l'*intensité propre* d'une source lumineuse comme mesurée par l'éclaircissement qu'elle produit sur la surface prise pour unité, sur un centimètre carré par exemple, lorsque sa distance à cette surface est égale à l'*unité de longueur*. — Les méthodes expérimentales que nous allons décrire, pour comparer les intensités propres de diverses sources, reposent sur la proposition suivante :

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 mesurée par la quantité de lumière que reçoit une surface d'un

centimètre carré, placée à l'unité de distance, la quantité de lumière reçue par cette même surface à la distance D sera $\frac{I}{D^2}$. De même, la quantité de lumière reçue de la seconde source par un centimètre carré, à la distance D' , sera $\frac{I'}{D'^2}$. Si ces deux éclaircissements sont égaux, on aura :

$$\frac{I}{D^2} = \frac{I'}{D'^2}, \quad \text{d'où l'on tire : } \frac{I}{I'} = \frac{D^2}{D'^2};$$

c'est-à-dire que les intensités propres des deux sources sont proportionnelles aux carrés des distances auxquelles il faut placer un petit écran, pour qu'il soit également éclairé par toutes deux.

349. Photomètre de Bouguer. — Les conditions qui viennent d'être indiquées sont réalisées dans le photomètre de Bouguer (*fig. 254*). Deux petites fenêtres f, f' , garnies de papier ou de verre dépoli, sont

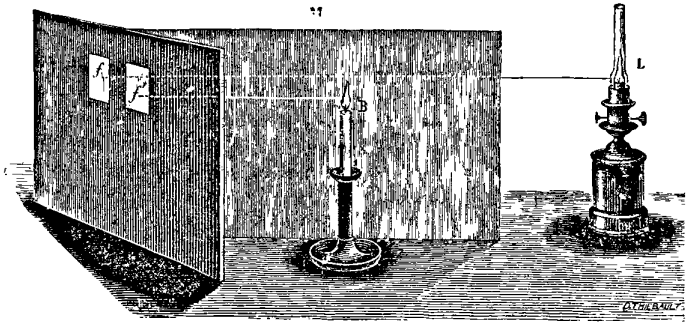


Fig. 254.

placées à côté l'une de l'autre; une cloison opaque M , perpendiculaire à celle dans laquelle sont pratiquées les fenêtres, permet de disposer de part et d'autre les deux sources lumineuses, de façon que chaque fenêtre ne soit éclairée que par l'une d'elles. On approche ou on éloigne l'une des deux sources, jusqu'à ce que l'éclaircissement paraisse le même en f et en f' , et on mesure alors les distances D et D' de chaque source à la fenêtre correspondante. Le rapport des intensités $\frac{I}{I'}$ est égal à $\frac{D^2}{D'^2}$ (548).

350. Photomètre de Rumford. — Le photomètre de Rumford (*fig. 255*) est fondé sur le même principe. On dispose les deux sources lumineuses de manière à obtenir, sur un écran blanc E , deux ombres d'une tige verticale A placée devant cet écran : de ces deux ombres, l'une f ,

portée par la source B, ne reçoit de lumière que de la source L; l'autre

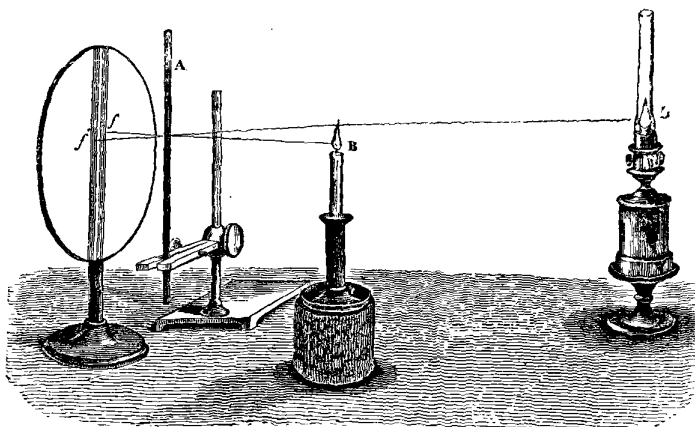


Fig. 255.

f' , portée par la source L, ne reçoit de lumière que de la source B. Donc, si l'on fait en sorte que les deux ombres paraissent identiques, et si l'on mesure la distance D, de L à f , et la distance D', de B à f' , on aura encore $\frac{I}{I'} = \frac{D^2}{D'^2}$ (348).

RÉFLEXION DE LA LUMIÈRE

RÉFLEXION PAR LES SURFACES PLANES

351. **Lois de la réflexion.** — Lorsqu'un rayon tombe sur une surface parfaitement polie, il n'y a de lumière renvoyée que dans une direction unique : c'est le phénomène de la *réflexion*.

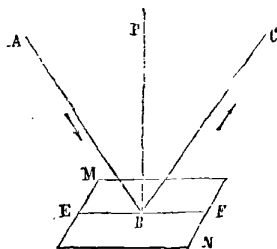


Fig. 256.

On appelle *plan d'incidence* d'un rayon lumineux AB tombant sur une surface réfléchissante MN (fig. 256), le plan déterminé par ce rayon et par la normale BP menée au point d'incidence; *angle d'incidence*, l'angle ABP formé par le rayon incident et la normale; *angle de réflexion*,

l'angle CBP 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.*

L'appareil de S. Silbermann (fig. 257) permet de vérifier ces lois. — Un miroir métallique A est fixé au centre d'un cercle vertical divisé MN le plan de ce miroir est perpendiculaire au diamètre vertical BB' du cercle. On dirige un faisceau de rayons solaires *ab*, au moyen du petit miroir auxiliaire *m*, de manière que la lumière passe dans l'ouverture du diaphragme *l*, et vienne rencontrer le miroir A vers le centre *c* du limbe. On constate alors que, pour recevoir la lumière réfléchie dans l'ouverture du diaphragme *i'*, il faut placer l'alidade R dans une position symétrique de S par rapport à BB'.

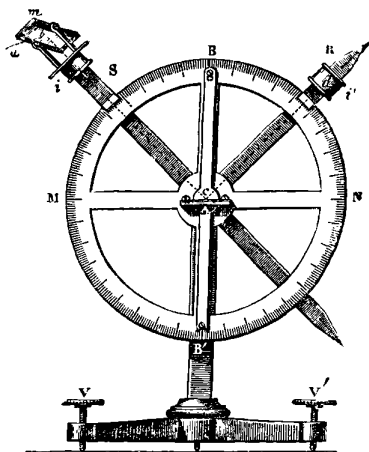


Fig. 257.

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.

352. **Images fournies par un miroir plan.** — Soit un point lumineux A (fig. 258) 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 plan du miroir une perpendiculaire AI, et prolongeons-la jusqu'à la rencontre en A' avec le prolongement du rayon réfléchi ; les triangles rectangles AIB et A'IB sont égaux comme ayant le côté BI commun, et les angles IBA et IBA' égaux comme compléments, l'un de l'angle d'incidence, l'autre de l'angle de réflexion :

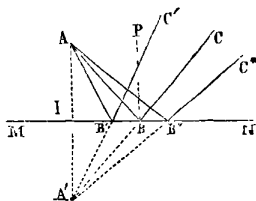


Fig. 258.

donc $AI = A'I$. — 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, 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.

En appliquant cette construction aux divers points d'une ligne lumineuse AD (fig. 259) placée devant un miroir plan, on obtient une image linéaire A'D', qui est symétrique de AD par rapport au miroir.

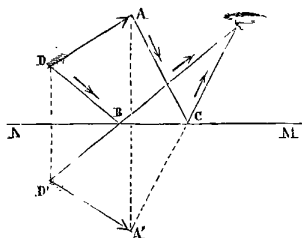


Fig. 259.

Si maintenant on construit l'image d'un *objet* de figure quelconque, on obtient une figure *symétrique* par rapport au miroir : il en résulte que, généralement, cette figure n'est point superposable à l'objet. — C'est ainsi, par exemple, que l'image d'une personne placée devant un miroir plan n'est pas 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.

355. Images multiples, fournies par des miroirs parallèles ou inclinés. — Lorsqu'un objet lumineux est placé de manière à émettre de la lumière sur deux miroirs plans parallèles, l'œil aperçoit une infinité d'images, derrière chacun des miroirs. — Si les deux miroirs font entre eux un certain angle, l'œil aperçoit un nombre limité d'images, et ce nombre dépend de l'angle des miroirs.

La construction de ces images est une question toute géométrique : on remarquera que tous les rayons lumineux émanés d'un point A (fig. 238) et réfléchis sur un miroir MN, se comportent, après réflexion, comme s'ils émanaient du point A' : si donc certains de ces rayons tombent sur un second miroir, ils donneront une seconde image, qui sera symétrique de A' par rapport à ce second miroir : si, parmi les rayons réfléchis, il en est qui tombent de nouveau sur le premier, ils donneront une troisième image, symétrique de la seconde par rapport au premier miroir, et ainsi de suite. — En effectuant la construction pour le cas où deux miroirs font entre eux un angle contenu un nombre pair $2n$ de fois dans quatre angles droits, on trouve qu'un objet lumi-

neux, placé entre eux, fournit $2n - 1$ images; l'œil, placé dans l'angle des miroirs, aperçoit donc, en tout, $2n$ fois cet objet.

La formation des images dans le *kaléidoscope* est fondée sur ces principes. — L'instrument se compose de deux petits miroirs, faisant entre eux un angle de 60 degrés, et fixés dans un tube cylindrique opaque, de façon que leur intersection soit dirigée suivant l'une des arêtes du cylindre. De petits fragments de verre coloré sont placés à l'une des extrémités du tube, entre deux parois de verre parallèles qui les laissent facilement glisser dans diverses positions. On place l'œil à l'autre extrémité du tube, et l'on aperçoit une sorte de rosace hexagonale, composée de six secteurs, qui offrent alternativement la figure formée par les fragments de verre et la figure symétrique.

MIROIRS SPHÉRIQUES

354. Miroirs sphériques. — Définitions. — On nomme *miroirs sphériques* ceux dont la surface réfléchissante peut être considérée comme faisant partie d'une sphère. — Ils sont dits *concaves* ou *convexes*, selon que leur surface réfléchissante est la face intérieure ou la face extérieure de la sphère.

Le plus ordinairement, le bord MANB du miroir est circulaire (fig. 240); c'est un petit cercle de la sphère dont le miroir fait partie : on le désigne sous le nom de *base* du miroir. — On appelle *axe principal* la perpendiculaire CO, menée du centre C de la sphère sur le plan de la base. — Le *sommet* du miroir est le point O, où cette perpendiculaire vient rencontrer la surface réfléchissante.

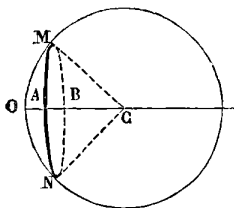


Fig. 240.

Les lois de la réflexion sur les surfaces planes (351) suffisent pour déterminer les propriétés de tous les miroirs courbes en général : tout rayon lumineux, qui tombe sur un point déterminé d'une surface courbe, se réfléchit comme il le ferait sur le plan tangent mené au point d'incidence.

355. Foyer principal d'un miroir sphérique concave. — Lorsqu'on place un miroir sphérique concave de manière que son axe principal soit dirigé vers le soleil, l'expérience montre que tous les rayons solaires incidents sont réfléchis de manière à aller passer sensiblement par un même point, situé sur l'axe principal lui-même, et qu'on nomme *foyer principal*; si l'on place en ce point un petit écran de papier, on obtient un éclaircissement très-intense dans une étendue très-petite de l'écran.

La théorie permet de se rendre compte de ce résultat. — A cause de l'éloignement du soleil, tous les rayons incidents peuvent être considérés comme sensiblement parallèles à l'axe principal. Or, soit MON (fig. 241)

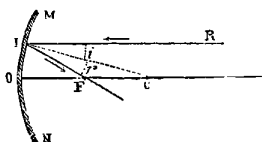


Fig. 241.

la section du miroir par un plan mené suivant l'axe principal, et RI un rayon parallèle à l'axe et situé dans ce plan. Ce rayon se réfléchit en I, comme il le ferait sur le plan tangent à la sphère en ce point, et, si l'on remarque que le rayon CI de la sphère est normal au plan tangent en I, on voit que le rayon réfléchi doit rester dans le plan de la figure, et faire avec CI un angle CIF égal à l'angle d'incidence CIR. Soit F le point où ce rayon vient rencontrer l'axe principal : le triangle IFC est isocèle, puisque l'angle ICF, égal à l'angle d'incidence comme alterne-interne, est égal par cela même à l'angle de réflexion CIF ; donc $FC = FI$. D'ailleurs, si l'on suppose, comme nous le ferons toujours, que le miroir soit une très-petite portion de la sphère, et que, par suite, la distance du rayon incident à l'axe soit toujours très-petite par rapport aux distances FO et CO, l'angle CFI sera très-peu différent de deux droits, et l'on aura sensiblement $IC = IF + FC$, ou, en remplaçant IC par OC, et IF par FC,

$$OC = FC \times 2.$$

Le point F, où le rayon réfléchi rencontre l'axe principal, est donc à égale distance du centre et du sommet du miroir. — Ce résultat étant indépendant de la position particulière du rayon incident RI, on voit que *tous les rayons parallèles à l'axe principal du miroir doivent concourir en un même point, situé sur l'axe principal, et à égale distance du centre et du sommet* : ce point est le *foyer principal*.

Il est clair que, réciproquement, si un point lumineux placé au foyer principal émet des rayons sur le miroir, tous ces rayons doivent être réfléchis parallèlement à l'axe. — C'est ce que l'expérience confirme, et c'est le fait que nous avons admis plus haut à propos de l'expérience des miroirs conjugués (150).

536. Foyer d'un point situé sur l'axe principal. — Lorsqu'on place une source lumineuse, de dimensions assez petites pour qu'on puisse la considérer comme se réduisant sensiblement à un point lumineux, sur l'axe principal d'un miroir sphérique concave, et au delà du centre, on constate que les rayons réfléchis par le miroir viennent converger sensiblement en un même point de l'axe, qui prend encore le nom de *foyer*.

Il est encore facile de se rendre compte de ce résultat. — Soit MON

(fig. 242) la section du miroir par un plan mené suivant l'axe principal, P un point lumineux situé sur l'axe, au delà du centre, et PI un rayon émis par P. La normale au point I étant le rayon CI de la sphère, il suffit, pour construire le rayon réfléchi, de mener la droite IP' faisant avec IC un angle $P'IC = CIP$: soit P' le point où cette droite rencontre l'axe principal (*). La ligne IC étant bissectrice de l'angle au sommet du triangle P'IP, on a

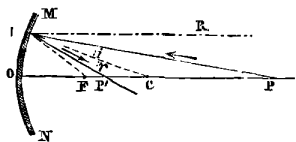


Fig. 242.

Si maintenant on suppose que le miroir soit une portion très-petite de la sphère, on pourra remplacer le rapport $\frac{P'I}{PI}$ par $\frac{P'O}{PO}$, ce qui donne $\frac{P'O}{PO} = \frac{P'C}{PC}$, ou bien

$$\frac{P'O}{P'C} = \frac{PO}{PC}.$$

On voit donc que le point P' partage le rayon OC du miroir en deux parties dont le rapport dépend uniquement de la position du point lumineux P ; en d'autres termes, tous les rayons émanés d'un même point P doivent, après réflexion, passer par un même point P'. — Quand le point lumineux est *au delà du centre C*, comme nous l'avons supposé, la distance P'C est toujours plus petite que la distance PC : car $\frac{P'O}{P'C}$ étant, dans le triangle P'IP, égal à $\frac{P'I}{PI}$, et le côté P'I étant plus petit que PI, il en résulte que P'C est aussi plus petit que PC. Donc, dans ce cas, le foyer P' est plus rapproché du centre que la source P.

Réciproquement, un point lumineux étant placé en P', les rayons lumineux émis par ce point et réfléchis par le miroir vont passer par le point P. — On voit donc que les points P et P' ont des positions *reciproques*. On leur donne le nom de *foyers conjugués*.

La figure 242 montre immédiatement que, si le point lumineux P s'ap-

(*) Si le point P est au delà du centre C, comme nous l'avons supposé, le point P' doit être placé entre le centre et le foyer principal F : en effet, si le miroir recevait en I un rayon BI parallèle à l'axe, ce rayon se réfléchirait suivant IF ; or, l'angle d'incidence actuel P'IC étant plus petit que l'angle d'incidence BIC, l'angle de réflexion CIP doit être plus petit que l'angle de réflexion CIB, et, par suite, le rayon lumineux P'I doit être compris entre les rayons CIB et CIB.

proche du miroir et tend vers le point C, son foyer conjugué s'éloigne du miroir et tend vers le même point C.

Si le point lumineux est placé *au centre* du miroir, son foyer conjugué est au même point, c'est-à-dire que les rayons réfléchis reprennent, en sens inverse, la direction des rayons incidents, résultat qu'on pouvait d'ailleurs prévoir.

Si le point lumineux, situé maintenant *entre le centre et le foyer principal*, s'approche du foyer, son foyer conjugué s'éloigne du centre en sens inverse.

Si le point lumineux est placé *au foyer principal* F, les rayons réfléchis sont renvoyés parallèlement à l'axe, et leur point de concours peut être considéré comme situé à l'infini.

Reste enfin le cas où le point lumineux est placé sur l'axe principal, *entre le foyer principal et le miroir*. — Si l'on considère alors un rayon incident quelconque PI (fig. 245), on voit que, si le miroir recevait en I

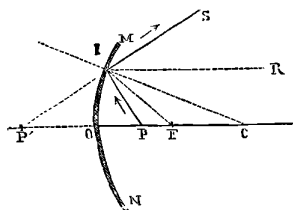


Fig. 245.

un rayon FI émané du foyer principal F, ce rayon serait réfléchi parallèlement à l'axe, suivant IR : donc le rayon réfléchi actuel IS, qui doit s'écarter davantage de la normale CI, ne peut rencontrer l'axe en avant du miroir ; mais le prolongement géométrique IP' de ce rayon doit venir couper l'axe en P', derrière la surface réfléchissante. — Une démonstration semblable à la précédente montre que la position du point P' est la même pour tous les rayons émanés d'un même point P. — Le point P' n'étant que la rencontre des *prolongements géométriques* des rayons lumineux, il est clair qu'on ne peut songer à constater ici aucune concentration de lumière sur un écran qui serait situé en ce point. Mais, si l'œil est placé dans le faisceau 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 P' prend alors le nom de *foyer virtuel* du point P.

557. **Image d'un objet placé devant un miroir sphérique concave.** — L'image d'un objet est l'ensemble des foyers conjugués de tous ses points. Il suffira de considérer l'image d'une droite perpendiculaire à l'axe principal : il est évident que la solution de ce cas particulier permettra de construire l'image d'un objet quelconque.

1° Soit un objet rectiligne AB (fig. 244), perpendiculaire à l'axe principal, et situé *au delà du centre*. — Joignons A au centre C du miroir : la direction AC est ce qu'on nomme *l'axe secondaire* du point A. Or il est clair que les rayons émanés de A se comportent, par rapport à cet axe

IRIS - ELLIAD - Université Lille 1

secondaire, comme les rayons émanés du point P (fig. 242) par rapport à l'axe principal, c'est-à-dire que tous les rayons émanés du point A et réfléchis sur le miroir doivent passer, après réflexion, par un point de cette droite.

— Dès lors, pour déterminer géométriquement ce foyer, il suffit de construire un seul rayon réfléchi ; considérons, par exemple, le

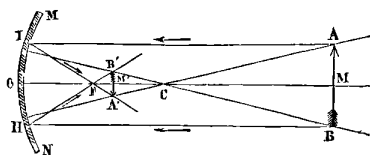


Fig. 244.

rayon incident AI qui émane du point A parallèlement à l'axe principal : ce rayon vient, après réflexion, passer par le foyer principal F ; donc le point A', où la direction IF vient rencontrer l'axe secondaire AC, est le foyer conjugué de A. — On construira de même le foyer conjugué des divers points de l'objet AB. Dans la figure ci-contre, la construction a été reproduite pour le point B. — Il est aisé de voir que les divers points de la droite AB ont leurs foyers sur la droite A'B', et que l'image est *renversée* par rapport à l'objet.

Dès lors, si l'on prend, par exemple, comme objet lumineux la flamme d'une bougie P (fig. 245), et si l'on place un petit écran au foyer conju-

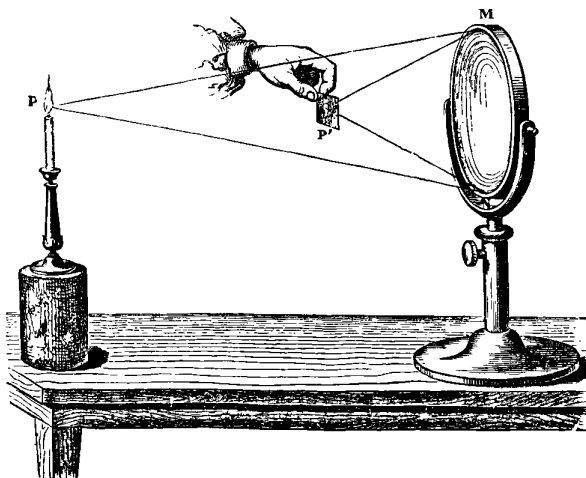


Fig. 245.

gué P', les points de l'axe principal se rencontrent les faisceaux

lumineux émanés des divers points de la flamme seront vivement éclairés. L'ensemble de ces points constitue l'image *réelle* de la flamme.

Si l'objet est situé, comme nous l'avons supposé, *au delà du centre* du miroir, l'image est *plus petite* que l'objet : cela résulte de ce que, dans les triangles semblables ACB, A'CB' (fig. 244), on a $\frac{A'B'}{AB} = \frac{CM'}{CM}$, et, comme le point M' est plus rapproché du centre que M, l'image A'B' est plus petite que AB. — Si l'on suppose que l'objet AB se rapproche du centre, la construction montre que l'image A'B' s'en rapproche également, et que sa grandeur augmente.

Si l'objet est placé dans le plan mené *par le centre* du miroir, perpendiculairement à l'axe principal, l'image, toujours réelle et renversée, devient *égale* à l'objet.

Si l'objet est placé *entre le centre et le foyer principal*, l'image passe *au delà du centre*; elle est encore réelle, et devient *plus grande* que l'objet.

Toutes ces conclusions de la théorie se vérifient immédiatement, en faisant varier les conditions de l'expérience qui est représentée par la figure 245.

Enfin, si l'objet lumineux est situé *entre le foyer principal et le miroir* (fig. 246), le rayon AI, mené du point A parallèlement à l'axe principal, ne rencontre plus

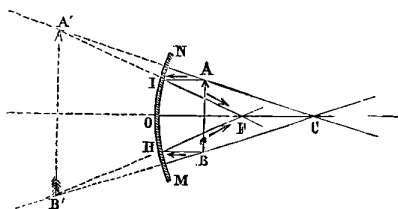


Fig. 246.

l'axe secondaire AC en avant du miroir : mais les prolongements géométriques de ces deux directions se rencontrent derrière le miroir en un point A', qui est le foyer *virtuel* de A. — On déterminera de même le foyer virtuel du point B.

et l'on obtiendra ainsi une image A'B' de AB, image qui sera *droite*, *plus grande que l'objet*, et *virtuelle*. — Une pareille image ne peut évidemment venir se peindre sur un écran, mais un observateur, placé devant le miroir et recevant dans l'œil les rayons réfléchis, perçoit ces rayons comme s'ils émanaient de l'image A'B'.

358. Foyers des points placés sur l'axe principal d'un miroir sphérique convexe. — Lorsqu'on oriente un miroir sphérique convexe de manière que son axe principal soit dirigé vers le soleil, l'expérience montre que les rayons solaires, tombant parallèlement à l'axe, forment, après réflexion, un cône *divergent*, dont le sommet serait derrière le miroir. Ce sommet est ce qu'on peut appeler le *foyer*

principal virtuel du miroir. — De même, en quelque point de l'axe principal qu'on place un point lumineux, on n'obtient pas de foyer réel en avant du miroir, mais les rayons réfléchis forment encore un cône divergent, dont le sommet, placé derrière le miroir, est le *foyer virtuel* du point lumineux.

Il est facile de se rendre compte de ces résultats. — Soit MN (fig. 247) la section d'un miroir sphérique convexe par un plan passant par l'axe principal. Considérons un rayon lumineux RI, parallèle à l'axe et situé dans ce plan : il se réfléchit suivant IS, dans le plan de la figure, et en faisant un angle de réflexion SIN' égal à l'angle d'incidence RIN'. Le rayon réfléchi ne peut rencontrer l'axe principal en avant du miroir, mais son prolongement géométrique rencontre le prolongement géométrique de l'axe, en un point F situé derrière le miroir. — Un raisonnement semblable à celui qui a été fait pour les miroirs concaves (355) montrera que le point F est à égale distance du centre et du sommet du miroir. Tous les rayons incidents parallèles à l'axe seront donc réfléchis de façon que leurs prolongements géométriques passent par le point F, qui est le *foyer principal virtuel* du miroir.

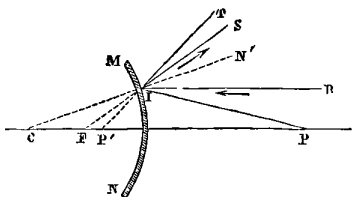


Fig. 247.

De même, en considérant un rayon PI, qui émane d'un point P situé sur l'axe principal, on verra que le rayon réfléchi IT doit s'écarter de l'axe principal encore plus que le rayon IS; et l'on démontrera que son prolongement géométrique rencontre le prolongement de l'axe principal en un point P', dont la position ne dépend que de celle de P. Donc tous les rayons émanés de P seront réfléchis comme s'ils émanaient du point P', *foyer virtuel* du point P. — Le point P' est évidemment toujours placé entre le foyer principal F et le sommet du miroir.

359. **Images formées par un miroir sphérique convexe.** — En continuant à appliquer aux miroirs convexes les raisonnements qui ont été faits pour les miroirs concaves, on voit que *tout point 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 de la sphère.* — Ce foyer conjugué peut donc être obtenu en construisant géométriquement un seul rayon réfléchi, et en déterminant le point où l'axe secondaire est coupé par ce rayon ou par son prolongement. Soit un point A d'un objet AB (fig. 248), et menons l'axe secondaire AC. Considérons le rayon incident AI parallèle à l'axe principal : il

se réfléchit de manière que son prolongement géométrique aille passer par le foyer principal virtuel F; il rencontre le prolongement de AC en un point A', qui est le foyer virtuel de A.

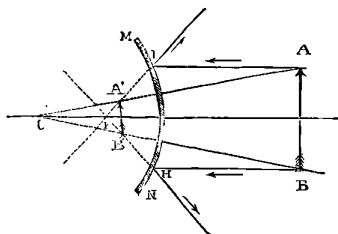


Fig. 248.

— On construira de même le foyer B' de B; tous les points de AB auront leurs foyers situés sur A'B'.

On voit donc que, dans un miroir sphérique convexe, l'image est toujours *droite*, *plus petite que l'objet*, et *virtuelle*.

— C'est ce qu'on vérifie par l'expérience, en plaçant un objet devant un miroir convexe, à une distance quelconque.

CHAPITRE II

RÉFRACTION DE LA LUMIÈRE

360. **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.

On nomme *plan d'incidence* le plan mené par le rayon incident SI

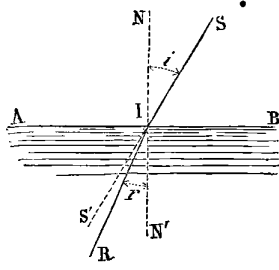


Fig. 249.

(fig. 249) et la normale IN, menée à la surface de séparation AB par le point d'incidence; *angle d'incidence*, l'angle SIN du rayon incident et de la normale; *angle de réfraction*, l'angle S'IN' du rayon réfracté et de 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.

On peut vérifier ces lois au moyen de l'appareil de Sibermann déjà décrit (351), en y adaptant, au lieu du miroir A, une auge cylindrique, limitée par deux plans de verre (fig. 250) : on verse de l'eau jusqu'à la hauteur du centre C du cercle, et, au moyen du miroir auxiliaire *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. Le faisceau lumineux, après avoir pénétré dans l'eau, se propage suivant un rayon du cercle, et se présente, pour sortir de l'eau, suivant un angle d'incidence nul : il ne doit donc pas subir de nouvelle déviation à l'émergence, en sorte que l'appareil permet d'étudier uniquement l'effet produit par le premier passage de l'air dans l'eau.

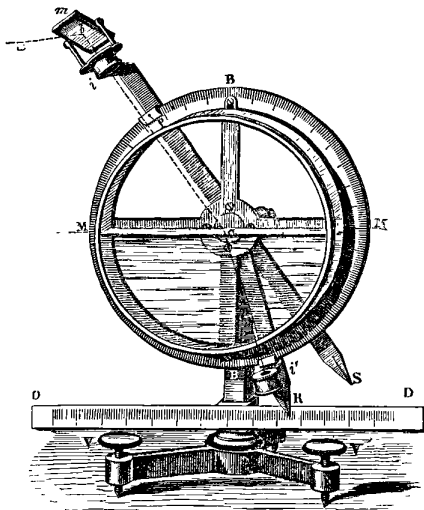


Fig. 250.

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 *a* diamètre vertical BB, mesure le sinus de l'angle d'incidence, dans le cercle de rayon CS; on amène ensuite la règle en contact avec l'extrémité R de l'autre alidade, ce qui permet de mesurer le sinus de l'angle de

réfraction, dans le même cercle. On trouve que le rapport de ces deux sinus est sensiblement $\frac{4}{3}$. — On répète l'expérience en donnant une autre valeur à l'angle d'incidence, et l'on constate que le rapport des deux sinus reste constant.

361. **Indices de réfraction.** — On appelle *indice de réfraction* d'une substance par rapport à une autre, le rapport constant du sinus d'incidence au sinus de réfraction, pour un rayon lumineux passant de la seconde substance dans la première. Si l'on désigne par n cet indice, par i l'angle d'incidence, et par r l'angle de réfraction, 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 $\frac{4}{3}$. — Pour le verre ordinaire, l'indice, par rapport à l'air, est environ $\frac{3}{2}$, etc.

Des méthodes de détermination plus précises que la précédente, ont donné, pour les substances les plus usuelles, les indices de réfraction suivants :

Eau	1,335
Éther.	1,358
Alcool	1,365
Verre sans plomb (crown-glass)	1,529
Verre plombé (cristal, flint-glass)	1,655
Sulfure de carbone	1,678
Diamant.	2,480

362. **Principe du retour inverse des rayons.** — Lorsqu'on

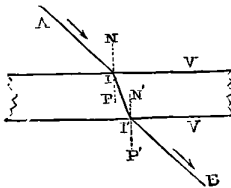


Fig. 251.

place sur le trajet d'un rayon lumineux AI une lame de verre à faces parallèles VV' (fig. 251), l'expérience montre que le rayon émergent l'B est parallèle à la direction du rayon incident AI. — Il est facile d'en conclure que, si n est l'indice de réfraction du verre par rapport à l'air, l'indice de réfraction de l'air par rapport au verre est $\frac{1}{n}$. En effet,

menons les normales aux deux surfaces, en I et I' : on a, en considérant le passage de l'air dans le verre :

$$\frac{\sin \text{AIN}}{\sin \text{I'P}}$$

En considérant maintenant le passage du verre dans l'air, on voit que l'angle d'incidence $II'N'$ est égal à PI' , puisque ces angles sont alternes-internes; et que l'angle de réfraction $BI'P'$ est égal à AIN , puisque ces angles ont leurs côtés parallèles deux à deux et dirigés en sens contraires. Donc on a

$$\frac{\sin II'N'}{\sin BI'P'} = \frac{1}{n}.$$

Il en résulte que si un rayon lumineux incident SI (fig. 249), passant de l'air dans un milieu plus réfringent, tel que l'eau, se réfracte suivant IR , réciproquement un rayon lumineux qui suivrait dans l'eau la route RI prendrait, en passant dans l'air, la direction IS du rayon incident primitif. — Ce résultat n'est qu'un cas particulier du principe général, applicable à tous les phénomènes optiques, qui est connu sous le nom de *retour inverse des rayons lumineux*. En général, si en traversant des milieux quelconques, un rayon lumineux suit une certaine route, un rayon qui se propagerait en sens inverse suit la même route que le premier.

563. Angle limite. — Réflexion totale. — Quel que soit l'angle d'incidence d'un rayon lumineux qui se présente pour passer de l'air dans un milieu plus réfringent, l'expérience montre qu'il pénètre toujours dans ce milieu, et la loi de Descartes permet de déterminer la direction du rayon réfracté. Par exemple, SI (fig. 252) étant un rayon qui se présente pour passer de l'air dans l'eau, si l'on désigne par i l'angle d'incidence, on pourra toujours mener, dans le plan d'incidence, une droite IR telle qu'on ait $\frac{\sin i}{\sin PIR} = \frac{4}{3}$; en effet, cette relation donne

$$\sin PIR = \frac{3}{4} \sin i,$$

et, la valeur de $\sin i$ étant déjà plus petite que l'unité, on voit que le second membre sera toujours moindre que 1: il existe donc toujours un angle PIR dont le sinus satisfait à cette condition. — Si maintenant on considère, en particulier, un rayon incident MI , qui rase la surface du liquide, il fournit, en pénétrant dans l'eau en I , un rayon réfracté IL

déterminé par la condition $\frac{\sin 90^\circ}{\sin PIL} = \frac{4}{3}$, ou

bien $\frac{1}{\sin PIL} = \frac{4}{3}$, ou enfin

$$\sin PIL = \frac{3}{4}.$$

Cet angle PIL , le plus grand que puissent faire avec la normale les rayons

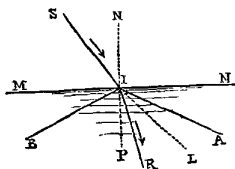


Fig. 252.

qui pénètrent de l'air dans l'eau, prend le nom d'*angle limite*. — Pour une substance quelconque, on voit qu'il est toujours tel, que *son sinus soit égal à l'inverse de l'indice de réfraction*.

Or, considérons maintenant des rayons lumineux qui se présentent pour passer *de l'eau dans l'air*. D'après le principe du *retour inverse* des rayons (362), un rayon qui se présenterait pour passer de l'eau dans l'air suivant la direction RI sortirait de l'eau suivant IS ; un rayon incident LI sortirait de l'eau en rasant la surface suivant IM. Mais si un rayon incident AI se présente en faisant avec la normale un angle AIP, *plus grand que l'angle limite*, la théorie précédente ne peut fournir aucune valeur pour l'angle d'émergence : l'expérience montre que, dans ce cas, le rayon *se réfléchit*, c'est-à-dire qu'il prend, dans l'eau, une direction IB, telle que l'angle de réflexion BIP soit égal à l'angle d'incidence AIP. — C'est le phénomène connu sous le nom de *réflexion totale*.

364. Applications des principes de la réfraction. — Déplacement apparent des objets vus dans l'eau. — Au fond d'un vase à parois opaques, on place une pièce de monnaie, et l'on dispose l'œil de façon qu'il aperçoive la pièce à moitié cachée par le bord : lorsqu'on verse de l'eau dans le vase, la pièce devient visible tout entière, et paraît relevée, ainsi que le fond du vase qui la supporte. —

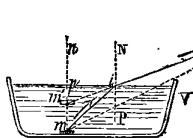


Fig. 253.

Dans cette expérience, en effet, ce ne sont pas des rayons tels que mO (fig. 253), venant en ligne droite de la pièce de monnaie, qui impressionnent l'œil : ce sont des rayons tels que mi , qui ont éprouvé en i une réfraction les écartant de la normale, et qui arrivent à l'œil suivant iO :

c'est donc en un point du prolongement de Oi que l'œil voit la pièce. Si les rayons émergents qui arrivent à l'œil ne sont pas trop inclinés sur la surface du liquide, ce point est celui où la ligne Oi rencontre la perpendiculaire menée du point m à la surface du liquide.

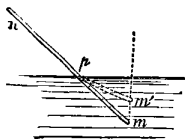


Fig. 254.

C'est pour la même raison qu'un bâton mn (fig. 254), plongé dans l'eau, paraît brisé, et que la partie immergée semble relevée vers la surface. — L'œil voit la partie extérieure np dans sa position véritable : il voit l'extrémité m en

m' ; et tous les points immergés, entre m' et p .

365. Réfractions atmosphériques. — Les rayons lumineux qui nous arrivent des astres, en traversant des couches de notre atmosphère dont la densité va en croissant progressivement, éprouvent une série de réfractions, qui tendent à les rapprocher de la normale à la surface de

chacune de ces couches, c'est-à-dire de la verticale. Notre œil voit alors l'astre dans la direction du dernier rayon lumineux qui lui parvient, c'est-à-dire plus près du zénith qu'il n'est réellement. De là résulte qu'il est nécessaire, pour obtenir la position vraie d'une étoile, de faire subir à l'observation une correction qui tienne compte de cette cause d'erreur.

366. Mirage. — On donne le nom de *mirage* à des apparences trompeuses, observées fréquemment dans les pays chauds lorsque le temps est calme, et qui font apparaître les objets lointains renversés, comme s'ils étaient réfléchis par une nappe d'eau. Voici l'explication qui en a été donnée par Monge, lors de l'expédition de la République française en Égypte.

Le sol, échauffé par le soleil, porte à une température très-élevée les couches d'air qui sont en contact avec lui : celles-ci échauffent lentement à leur tour les couches qui sont au-dessus d'elles, et si le temps est calme, il peut se former, jusqu'à une certaine hauteur, des couches superposées dont les densités vont *en croissant* à mesure qu'on s'élève. Supposons que l'œil d'un observateur soit en O (*fig. 255*), et soit P le sommet d'un objet élevé. Parmi les rayons que P envoie vers le sol, on

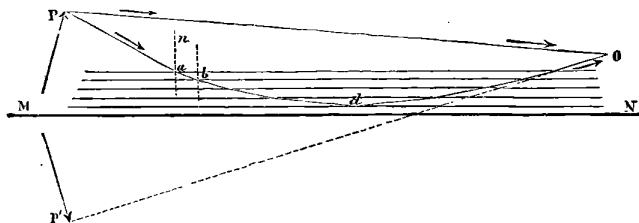


Fig. 255.

peut concevoir qu'un rayon Pa, passant successivement d'une couche dans une autre moins dense, se réfracte en s'éloignant toujours de la normale, et tombe enfin, en d, à la surface de séparation de deux couches de densités différentes, sous un angle plus grand que l'angle limite, de façon à subir la réflexion totale (563) : à partir de ce point, il se relève de plus en plus, et peut revenir vers l'œil de l'observateur. Celui-ci aperçoit alors une image du point P, sur le prolongement du rayon qui lui arrive, en P'.

EFFETS PRODUITS PAR LES LENTILLES

367. Diverses espèces de lentilles sphériques. — On appelle *lentilles sphériques* des masses transparentes terminées par deux surfaces sphériques, ou par une surface sphérique et une surface plane. On les distingue en deux groupes, savoir :

1° Les lentilles à *bords minces*, dont l'épaisseur est croissante depuis les bords jusqu'au milieu. Ces lentilles sont encore désignées sous le nom de lentilles *convergentes*, qui indique, comme on le verra plus loin, leur propriété essentielle.

2° Les lentilles à *bords épais*, dont l'épaisseur diminue depuis les bords jusqu'au milieu : on les désigne encore sous le nom de lentilles *divergentes*.

Les lentilles à *bords minces* comprennent trois variétés, savoir : 1° la lentille *biconvexe*, terminée par deux surfaces sphériques convexes, et dont A (fig. 256) représente la section, par un plan passant par la ligne

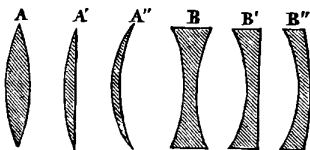


Fig. 256.

qui joindrait les centres des deux faces; 2° la lentille *plan-convexe* A', terminée par une surface convexe et par une surface plane; 3° le *ménisque convergent* A'', compris entre deux faces sphériques, l'une convexe, l'autre concave.

Les lentilles divergentes présentent trois variétés qui correspondent aux précédentes : 1° la lentille *biconcave* B, comprise entre deux surfaces sphériques concaves; 2° la lentille *plan-concave* B', comprise entre une surface sphérique concave et une surface plane; 3° le *ménisque divergent* B'', dont la face concave est celle qui a le plus petit rayon.

On appelle *axe principal* d'une lentille la droite qui joint les centres des deux faces, si ces faces sont toutes deux sphériques; c'est la perpendiculaire menée du centre de la face sphérique sur la face plane, dans le cas des lentilles plan-convexes et plan-concaves.

368. **Foyer principal d'une lentille convergente.** — Lorsqu'on prend une lentille à bords minces, telle que A, A' ou A'' (fig. 256), et qu'on l'orienté de façon que son axe principal soit dirigé vers le soleil, l'expérience montre que les rayons solaires, tombant alors sur la lentille dans des directions parallèles à son axe principal, sont réfractés

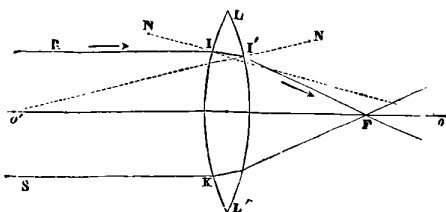


Fig. 257.

de manière à venir passer tous sensiblement par un même point. — Ce point est le *foyer principal* de la lentille.

Si l'on considère en particulier une lentille biconvexe,

il est facile de concevoir qu'elle doit, en effet, ramener les rayons vers

son axe principal. Un rayon incident RI (fig. 257) doit, en passant de l'air dans le verre, se réfracter en se rapprochant de la normale menée au point d'incidence, c'est-à-dire du rayon de courbure OI. En arrivant en I', le rayon lumineux subit une nouvelle réfraction, et s'écarte de la normale en I', c'est-à-dire du rayon de courbure O'I'. Ces deux réfractations successives ont pour effet, l'une et l'autre, de ramener le rayon lumineux vers l'axe principal de la lentille, et, comme le rayon incident était parallèle à l'axe, le rayon réfracté viendra nécessairement rencontrer ce même axe en un certain point F. — Pour compléter cette explication, il nous resterait à démontrer qu'un autre rayon incident quelconque SK, parallèle à l'axe principal, doit venir, après réfraction, passer par le même point K: nous nous contenterons d'avoir constaté le fait par expérience.

On en peut évidemment conclure que, *réci-proquement*, si un point lumineux est placé au foyer principal F d'une lentille convergente, les rayons émanés de ce point et tombant sur la lentille sont réfractés dans une direction parallèle à l'axe principal.

369. **Foyer d'un point situé sur l'axe principal** — Plaçons, sur l'axe principal d'une lentille convergente, une source de lumière assez petite pour qu'on puisse la considérer comme se réduisant sensiblement à un point lumineux; puis, avec un écran placé de l'autre côté de la lentille, cherchons le point vers lequel la lentille concentre la lumière. — Nous constaterons les faits suivants :

1° Si le point lumineux P est placé, sur l'axe principal, à une distance très-grande de la lentille, les rayons réfractés viennent se rencontrer en un point P' placé très-près du foyer principal. — Les positions de P et de P' (fig. 258) sont d'ailleurs réciproques l'une de l'autre, c'est-à-dire que, comme pour les miroirs, P' est, par rapport à P, un foyer conjugué.

2° Si l'on rapproche progressivement le point lumineux P (fig. 258), son foyer P' s'éloigne, et quand le point lumineux arrive en H', à une distance de la lentille double de la distance focale principale CF', son foyer arrive en H, à la même distance de la lentille.

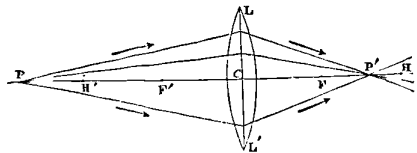


Fig. 258.

3° Si le point lumineux est entre H' et F', le foyer conjugué est au delà de H. — Quand le point lumineux arrive en F', les rayons réfractés sont, comme nous l'avons dit (368), parallèles à l'axe principal.

4° Enfin, si le point lumineux P est placé, sur l'axe principal, entre le foyer principal F et la lentille (fig. 259), les rayons réfractés ne peu-

vent plus rencontrer l'axe principal au delà de la lentille, et ils restent encore divergents les uns par rapport aux autres. Dans ce cas, leurs directions, prolongées du même côté de la lentille que le point lumineux, vont rencontrer la direction de l'axe principal en un point P' , situé au delà de P , mais d'autant plus voisin de la lentille que P est lui-même plus rapproché. — Le

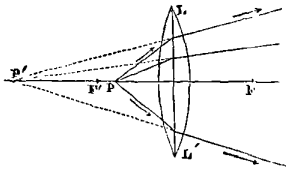


Fig. 259.

foyer du point P est donc, dans ce cas, un *foyer virtuel*.

370. **Image d'un objet. — Centre optique, axes secondaires.** — Si l'on place devant une lentille convergente, et à une distance plus grande que la distance focale principale, non plus un simple point lumineux, mais un *objet* comme la flamme d'une bougie (fig. 260),

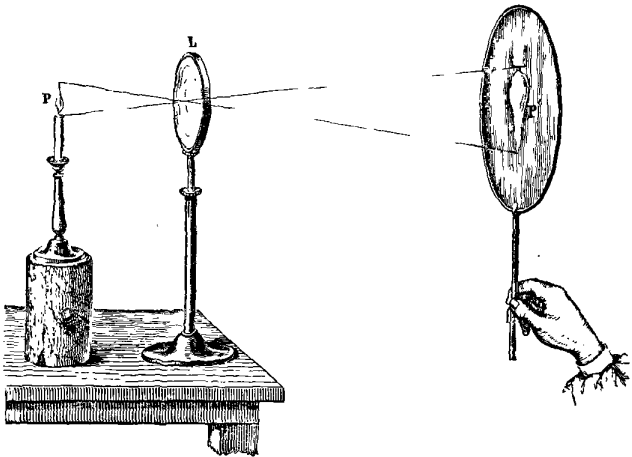


Fig. 260.

l'expérience montre qu'on peut recevoir, sur un écran placé de l'autre côté de la lentille et à une distance convenable, une image *réelle* et *renversée* de cet objet.

Cette expérience prouve que les points placés sur l'axe principal ne sont pas les seuls dont les rayons viennent, après réfraction, former un foyer au delà de la lentille, mais que à *chacun des points* de la flamme

situés hors de l'axe principal, correspond *un foyer*, situé également hors de l'axe principal.

Pour construire géométriquement ces images, dont nous venons de constater l'existence, il suffira de savoir que, dans toute lentille, il existe un point C (fig. 261) nommé *centre optique*, tel que *tout rayon qui, en se réfractant, vient passer par ce point, sort de la lentille parallèlement à sa direction primitive*. Le centre optique est situé sur l'axe principal; lorsque les courbures des deux surfaces sont les mêmes, il est à égale distance des deux faces de la lentille. — Dès lors, si l'épaisseur de la lentille est assez petite, comme c'est l'ordinaire, on peut considérer le rayon émergent KS comme se confondant avec le prolongement IR' du rayon incident, ce qui conduit à l'énoncé suivant :

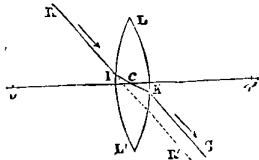


Fig. 261.

Tout rayon lumineux, dont la direction prolongée passe par le centre optique d'une lentille, traverse cette lentille en ligne droite.

1° Cela posé, considérons un objet lumineux AB (fig. 262), placé à une distance plus grande que le double de la distance focale principale CH' de la lentille, et proposons-nous de construire l'image de cet objet. —

Pour obtenir l'image du point A en particulier, joignons ce point au centre optique C; la direction de cette droite AC est ce qu'on nomme *l'axe secondaire* du point A. Un rayon lumineux émané de A, dans la

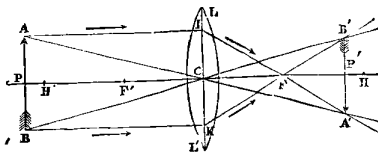


Fig. 262.

direction AC, continue sa route en ligne droite : par suite, pour obtenir le point de concours des rayons qui forment l'image de A, il suffit de trouver la marche d'un second rayon réfracté quelconque, et de déterminer le point où il rencontre l'axe secondaire. Choisissons, par exemple, le rayon AI parallèle à l'axe principal : il vient, après réfraction, passer par le foyer principal F, et détermine, par son intersection avec l'axe secondaire, le point A', qui est le foyer conjugué de A (*). — On détermine de même le point B', foyer conjugué de B; tous les points de AB ont leurs foyers conjugués situés sensiblement sur A'B'.

(*) Dans la figure ci-dessus, pour simplifier le tracé, on a supposé que chaque rayon lumineux, au lieu d'éprouver deux réfractions successives, l'une à la face d'entrée et l'autre à la face de sortie, n'en subisse qu'une seule, au point où il rencontre le plan mené par les bords de la lentille. C'est ce que nous ferons dans toutes les constructions suivantes.

Cette construction montre que l'image est *renversée* par rapport à l'objet, puisque les axes secondaires de A et de B se croisent en C. — Elle est *plus petite que l'objet*, puisque, dans les triangles semblables ACB, A'CB', les lignes AI et A'B' sont dans le même rapport que CP et CP', et que, d'après ce que nous avons vu (369, 1° et 2°), CP' est plus petit que CP.

2° Si l'objet est placé à une distance de la lentille *égale au double de la distance focale principale*, l'image, toujours réelle et renversée, se forme à la même distance au delà de la lentille, et elle est *égale à l'objet*.

3° Si l'objet est à une distance *inférieure au double de la distance focale principale*, mais *supérieure à la distance focale*, l'image, toujours réelle et renversée, se forme à une distance de la lentille *supérieure au double de la distance focale principale*, et elle est *plus grande que l'objet*.

— Si l'objet est au foyer principal, il ne se forme plus d'image.

4° Enfin, si l'objet AB est situé *entre le foyer principal F' et la lentille* (fig. 263), une construction semblable montre que le rayon AI, parallèle

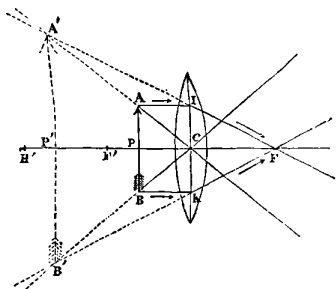


Fig. 263.

à l'axe, donne un rayon réfracté IF, qui ne peut aller rencontrer l'axe secondaire AC au delà de la lentille; mais les prolongements géométriques de ces deux droites se rencontrent en A'. Donc les rayons émanés de A forment, au sortir de la lentille, un faisceau divergent qui, en rencontrant l'œil, paraîtra 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'

de AB, qui sera *droite, plus grande que l'objet, et virtuelle*. — Une pareille image ne peut venir se peindre sur un écran, mais un observateur, placé derrière la lentille et recevant dans l'œil les rayons réfractés, perçoit ces rayons comme s'ils émanaient de l'image amplifiée.

371. Foyers dans les lentilles divergentes. — Prenons, comme exemple des lentilles divergentes, une lentille biconcave. Si l'on considère un rayon incident RI parallèle à l'axe (fig. 264), il éprouve, en entrant dans la lentille, une première réfraction qui le rapproche de la normale OIN, et suit la direction II'; en sortant de la lentille, il éprouve une seconde réfraction qui l'éloigne de la normale O'I', 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. — Donc, des rayons incidents RI, SK, parallèles à l'axe principal, sortent de la lentille en divergeant.

L'expérience constate et la théorie démontre que leurs prolongements géométriques vont rencontrer l'axe principal en un même point F , qui est le *foyer principal virtuel* de la lentille.

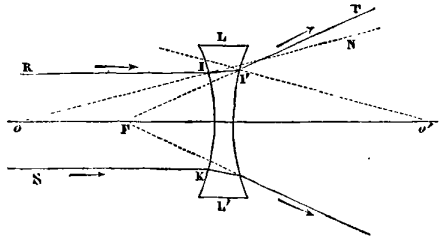


Fig. 264.

A plus forte raison, des rayons émanés d'un point situé sur l'axe principal fournissent-ils des rayons réfractés qui vont en divergeant davantage; leurs prolongements géométriques concourent en un point situé sur l'axe; ce point est le *foyer conjugué virtuel* du premier.

372. Images formées par les lentilles divergentes — L'expérience montre qu'une lentille divergente donne toujours une image virtuelle, droite et diminuée, d'un objet placé devant elle.

Il est facile de se rendre compte de ce résultat. — En effet, tout ce que nous avons dit des axes secondaires, à propos des lentilles convergentes, est applicable aux lentilles divergentes.

Donc, si l'on considère un objet AB (fig. 265) placé devant une semblable lentille, pour avoir l'image du point A , on mènera l'axe secondaire AC ; puis, le rayon AI parallèle à l'axe principal : le prolongement géométrique de ce rayon devra passer par le foyer principal F , et déterminera le point A' par sa rencontre avec AC . — On construira de même l'image B' du point B .

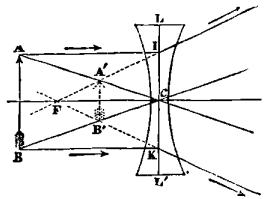


Fig. 265.

— L'examen de la figure montre que l'image $A'B'$ est toujours virtuelle, droite et plus petite que l'objet.

EFFETS PRODUITS PAR LES PRISMES. — DÉCOMPOSITION ET RECOMPOSITION DE LA LUMIÈRE

373. Définitions. — On désigne, en optique, sous le nom de *prisme*, un milieu transparent terminé 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'angle. Dans les prismes de verre qui servent aux

expériences (fig. 266). la base est limitée par un plan, qui est lui-même 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.

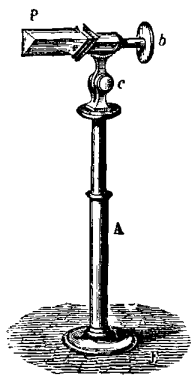


Fig. 266.

On appelle *section principale* d'un prisme, tout plan perpendiculaire à l'arête réfringente : c'est ce qu'on désigne, en géométrie, sous le nom de *section droite*. — Dans l'étude des propriétés des prismes, nous considérerons uniquement le cas où les rayons incidents sont contenus chacun dans une *section principale*.

374. Action d'un prisme sur un faisceau de lumière parallèle. — Lorsqu'on introduit, à travers une ouverture pratiquée dans le volet d'une chambre obscure, un faisceau de rayons solaires, et qu'on interpose, sur le trajet de ces rayons, un prisme orienté de manière que

l'axe du faisceau soit dans une section principale, on observe que les rayons émergents ne sont plus dans le prolongement des rayons incidents, mais qu'ils sont *déviés* vers la base du prisme, tout en restant dans la même section principale. En outre, si l'on reçoit le faisceau émergent sur un écran, on n'obtient plus une image blanche et sensiblement circulaire, mais une image *allongée* dans le sens perpendiculaire à l'arête du prisme, et *colorée* des couleurs de l'arc-en-ciel.

Nous allons rendre compte successivement de ces divers phénomènes : 1° *déviatiou* du faisceau lumineux ; 2° *épanouissement* et *coloration* du faisceau émergent.

375. Déviation. — Déviation minimum. — Soit BAC (fig. 267) une section d'un prisme, par un plan perpendiculaire à ses arêtes, c'est-à-dire une *section principale*. Soit RI un rayon incident, contenu dans ce plan : si l'on mène au point I la normale NP à la face d'incidence, elle sera contenue dans le plan de la figure ; par suite, le rayon pénétrera dans le prisme en restant dans ce même plan, et en se rapprochant de la normale, suivant II'. En arrivant en I', le rayon subira une nouvelle réfraction, sans sortir du plan de la section principale ; il s'écartera de la

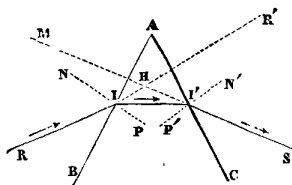


Fig. 267.

normale P'N', et sortira du prisme suivant une direction telle que I'S. Les deux réfracti...

dévier le rayon lumineux *vers la base du prisme*. — Dès lors, si l'œil d'un observateur reçoit le rayon émergent I'S, le point lumineux lui paraîtra situé sur le prolongement I'M de SI', c'est-à-dire reporté vers le sommet du prisme. — C'est ce que confirme l'expérience.

On nomme *angle de déviation* l'angle R'HS, que forme le rayon émergent I'S avec le prolongement du rayon incident. — Cet angle varie, non-seulement avec la valeur de l'angle que font entre elles les faces du prisme et avec la nature de la substance dont il est formé, mais aussi avec l'angle d'incidence. — La théorie et l'expérience s'accordent pour montrer que, pour un même prisme, on obtient une *déviation minimum*, lorsque l'incidence est telle, que la portion du rayon II' qui traverse le prisme fasse un même angle avec les deux faces (*).

376. **Épanouissement et coloration du faisceau émergent.**

— **Décomposition de la lumière blanche.** — Un faisceau de lumière solaire étant introduit horizontalement dans une chambre obscure, de manière à donner sur un écran vertical une image circulaire, plaçons, sur le trajet de ce faisceau, un prisme dont les arêtes seront horizontales et perpendiculaires au faisceau incident : le faisceau réfracté, dévié comme il a été dit, viendra former sur l'écran une image allongée dans le sens vertical, et colorée : cette image est ce qu'on nomme le *spectre solaire*.

La figure 268 représente la marche des rayons lumineux : BAC est la section principale du prisme ; RI, le faisceau incident, dont l'axe est supposé contenu dans le plan de cette section ; MN est l'intersection de l'écran avec le plan de la figure ; enfin, S et ru représentent l'image solaire directe et l'image spectrale déviée, sur l'écran supposé rabattu autour de MN. — Dans le spectre ru, les couleurs se suc-

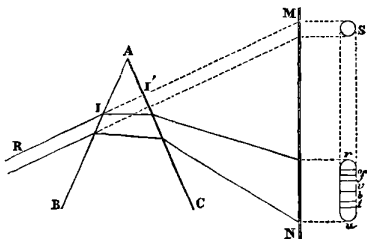


Fig. 268.

cèdent dans l'ordre suivant, en commençant par la partie la plus déviée :

Violet, indigo, bleu, vert, jaune, orangé, rouge.

(*) Un rayon lumineux tel que RI (fig. 267), qui rencontre un prisme formé d'une substance plus réfringente que le milieu dans lequel il s'était propagé, peut toujours pénétrer dans ce prisme (363) ; mais si, arrivé en I', il fait avec la normale à la face AC un angle plus grand que l'angle limite, il éprouve la réflexion totale (365), et revient vers l'intérieur. — On verra facilement qu'un prisme dont l'angle réfringent serait *plus grand que le double de l'angle limite* ne laisserait jamais émerger de sa seconde face aucun rayon lumineux.

377. Explication de la formation du spectre. — Pour expliquer la formation du spectre solaire, Newton a admis que la lumière blanche, telle qu'elle nous arrive du soleil, est formée d'une infinité de rayons, de nuances différentes, et pouvant se rapporter aux sept couleurs principales que nous venons d'énumérer. Les rayons de chaque nuance ont une *réfrangibilité propre*, en sorte qu'ils sont inégalement déviés par le prisme, d'où résulte leur séparation à l'émergence.

Cette explication s'adapte à toutes les particularités de la formation du spectre. — Pour la confirmer, Newton a eu recours à un grand nombre d'expériences. Ces expériences démontrent, 1° l'*inégalité réfrangibilité* des rayons lumineux qui forment la lumière blanche, et qui, séparés par le prisme, donnent naissance au spectre; 2° la possibilité d'effectuer une *recomposition de la lumière blanche*, en réunissant les rayons de diverses couleurs.

378. Inégale réfrangibilité des rayons qui forment la lumière blanche. — Si l'on pratique une petite ouverture m dans l'écran MN sur lequel on reçoit le spectre ru formé par un prisme BAC (fig. 269), on peut isoler ainsi un faisceau de rayons appartenant à une

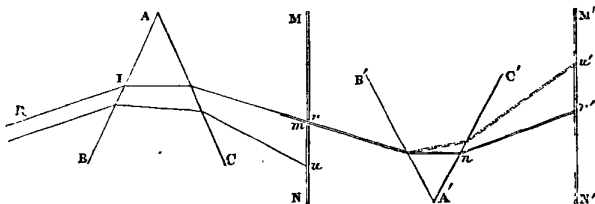


Fig. 269.

certaine nuance de rouge, par exemple. Si l'on reçoit ce faisceau rouge sur un second prisme $B'A'C'$, on constate d'abord qu'on n'obtient jamais, en r' , sur le second écran $M'N'$, aucune autre couleur que la couleur rouge primitive, d'où l'on conclut 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 BAC sur lui-même, de manière à faire passer par l'ouverture m des rayons d'une autre couleur, des rayons violets par exemple, on constate que ces rayons éprouvent, en traversant le second prisme, une déviation plus grande que les rayons rouges, et que l'image vient se former en u' . — Donc les divers rayons du spectre présentent, à travers une même substance, des réfrangibilités qui vont en croissant, depuis le rouge jusqu'au violet (*).

(*) On arrive aux mêmes conclusions par l'expérience dite *des prismes croisés*, qui est due également à Newton. — Un faisceau de rayons solaires, que nous

379. Recomposition de la lumière blanche. — En superposant les rayons de diverses couleurs que le prisme a séparés, on reconstitue la lumière blanche. C'est ce que montrent les expériences suivantes.

Un premier prisme BAC (*fig. 270*) étant placé sur le trajet d'un faisceau de lumière blanche RI, au lieu de recevoir le faisceau réfracté sur un écran, où il formerait un spectre, on le fait tomber sur un second prisme identique A'B'C', ayant ses faces parallèles à celles du premier, mais dirigées en sens contraire. En recevant les rayons émergents sur un écran, on obtient une image blanche. — On conçoit en effet que, à la sortie du second prisme, le faisceau de lumière rouge (représenté sur la figure

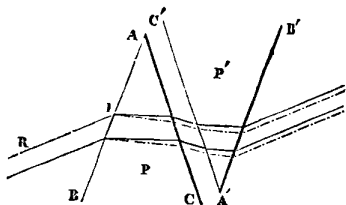


Fig. 270.

en traits pleins) est redevenu parallèle au faisceau de lumière violette (représenté en traits discontinus) : ces faisceaux se confondent dans la plus grande partie de leur largeur, et il en est de même des faisceaux formés des couleurs intermédiaires; c'est la superposition de tous ces faisceaux 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.

De même, lorsqu'on reçoit sur une lentille convergente les rayons réfractés par un prisme, ces rayons sont rendus convergents. En plaçant alors un écran au delà de la lentille, on trouve une position par laquelle l'image est sensiblement blanche, c'est-à-dire où il y a superposition de toutes les couleurs. — Si l'on déplace un peu l'écran en deçà ou au delà de cette position, on obtient une image dont le milieu seul est blanc, et dont les contours sont colorés. On conçoit, en effet, que les rayons de diverses couleurs forment des cônes différents, en raison de leurs diffé-

supposons *horizontal*, est reçu sur un premier prisme, dont les arêtes sont horizontales et perpendiculaires à la direction du faisceau; il se forme, sur un écran vertical placé au delà, un spectre vertical. On interpose, entre le prisme et l'écran, un second prisme dont les arêtes sont *verticales*, de manière à recevoir sur lui les rayons qui émergent du premier : on obtient alors, sur l'écran, un spectre qui est rejeté horizontalement, du côté de la base du second prisme, et qui, en outre, est *incliné à 45° sur l'horizon*, si les deux prismes sont formés de la même substance et ont le même angle réfringent. — De ce résultat, on conclut que les rayons de diverses couleurs, isolés par le premier prisme, ont subi, en traversant le second, une déviation dans le sens horizontal, mais que cette déviation a été inégale pour les rayons des diverses couleurs. Les rayons violets sont ceux qui ont été le plus déviés; les rayons rouges sont ceux qui l'ont été le moins.

rentes réfrangibilités : selon que l'écran est placé en avant ou en arrière de la région où se trouvent les intersections de ces cônes, on obtient une image dont le bord supérieur est coloré en rouge et le bord inférieur en violet, ou une image où les colorations des bords sont inverses.

Pour démontrer autrement encore que la sensation simultanée de toutes les couleurs du spectre produit sur notre œil l'impression de la lumière blanche, on peut faire usage du *disque de Newton*. — Un disque de carton porte un certain nombre de bandes de papier, en forme de secteurs circulaires, collées à côté les unes des autres, savoir : un secteur rouge *r* (fig. 271), un secteur orangé *o*, un secteur jaune *j*, etc., enfin un secteur violet *v*; puis, une seconde

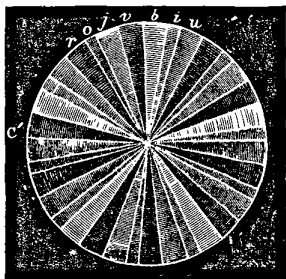


Fig. 271.

série semblable à la première, et ainsi de suite, de manière à couvrir le disque tout entier : les angles au centre des divers secteurs sont sensiblement proportionnels aux étendues des couleurs correspondantes dans le spectre. Si l'on fait tourner rapidement le disque autour de son centre, l'œil ne distingue qu'une teinte uniforme, sensiblement blanche. — Pour se rendre compte de ce résultat, il suffit de remarquer que, en général, les impressions lumineuses, produites à un moment déterminé sur notre œil, ont une durée d'un dixième de seconde environ. Il en résulte que, si un point lumineux décrit une courbe en un dixième de seconde, l'œil le voit à la fois dans toutes ses positions successives, et la courbe entière semble éclairée. Donc, si le disque ne portait qu'un seul secteur, un secteur jaune, par exemple, et si la rotation était assez rapide pour que ce secteur décrivît le cercle entier en un dixième de seconde, le cercle entier paraîtrait coloré en jaune; par suite, dans la disposition actuelle, même avec une vitesse moindre, le disque doit paraître coloré à la fois de toutes les couleurs. L'expérience montre que la simultanéité de ces impressions produit la sensation de la lumière blanche.

380. **Couleurs des corps éclairés par la lumière blanche.** — Les corps qui ne sont pas lumineux par eux-mêmes, et qui, éclairés par le soleil, nous paraissent de différentes couleurs, doivent cette propriété à une véritable décomposition de la lumière. — Si les pétales d'une fleur, éclairés par la lumière solaire, nous paraissent rouges, par exemple, c'est qu'ils absorbent tous les rayons de la lumière blanche, excepté les rayons rouges, et qu'ils diffusent ces derniers. Un corps jaune ne diffuse que ses rayons jaunes, et ainsi de suite. — Les corps blancs,

ne diffusent que ses rayons jaunes, et ainsi de suite. — Les corps blancs,

comme le papier, diffusent également les rayons des diverses couleurs. — Les corps noirs sont ceux qui absorbent toutes les couleurs, sans en diffuser aucune.

381. Rayons calorifiques et rayons chimiques. — Lorsqu'on produit un spectre en employant un prisme de sel gemme, substance qui laisse passer la chaleur aussi bien que la lumière (152), on peut, en plaçant successivement une pile thermo-électrique dans les diverses parties du spectre lumineux, constater une élévation sensible de température. On remarque cependant que les quantités de chaleur correspondantes aux diverses régions sont inégales : ainsi, la pile accuse peu de chaleur dans la partie violette, un peu plus dans le bleu, plus encore dans le jaune et dans le rouge. — Enfin, si l'on continue à explorer l'espace situé dans le prolongement du spectre lumineux, on reconnaît que le spectre calorifique s'étend au delà du rouge, jusqu'à une distance à peu près égale à la longueur du spectre lumineux lui-même. On en doit conclure que la lumière solaire contient, outre les rayons visibles, qui sont à la fois *calorifiques et lumineux*, des rayons *calorifiques obscurs*, doués d'une réfrangibilité moindre que les premiers.

Si maintenant on reçoit le spectre solaire sur quelques-unes de ces substances dans lesquelles la lumière peut effectuer des combinaisons ou des décompositions chimiques, et qui sont en usage, par exemple, dans la photographie, on constate que les actions chimiques produites sur ces substances sont très-inégales dans les diverses régions du spectre. A l'inverse des propriétés calorifiques, les propriétés chimiques se manifestent surtout dans les rayons les plus réfrangibles, c'est-à-dire voisins du violet; elles dépassent aussi, du côté du violet, les limites du spectre visible, en sorte que le soleil nous envoie, outre les rayons qui sont à la fois *chimiques et lumineux*, des rayons *chimiques obscurs*, doués d'une réfrangibilité plus grande que les premiers.

382. Spectres fournis par les lumières artificielles. — Une flamme formée par un corps gazeux, sans aucun corps solide en suspension, fournit une lumière qui, décomposée par le prisme, donne toujours naissance à un *spectre discontinu*. — Les spectres ainsi produits sont formés de bandes lumineuses, dont le nombre et la position dépendent de la nature des gaz qui constituent la flamme : ces bandes sont séparées par de larges intervalles obscurs.

Les corps solides ou liquides, à mesure qu'on les chauffe, émettent d'abord des rayons calorifiques obscurs, c'est-à-dire les rayons les moins réfrangibles (381). Puis, la température s'élevant davantage, aux rayons obscurs s'ajoutent des rayons lumineux : ce sont d'abord les rayons rouges, puis les rayons orangés, et ainsi de suite jusqu'aux rayons violets, qui apparaissent seulement quand le corps arrive à la température *blanche*, c'est-à-dire quand il émet des rayons de toutes les couleurs à la fois. En

même temps, apparaissent les rayons chimiques, dans une étendue d'autant plus grande que la température est plus élevée. — Ce qui caractérise essentiellement les spectres des corps solides, c'est que ce sont des *spectres continus*, ne présentant aucun de ces espaces obscurs qu'on observe dans les spectres des corps gazeux.

Les flammes produites par des corps gazeux tenant en suspension des particules solides fournissent également des spectres continus, parce que l'éclat des particules solides incandescentes l'emporte sur celui du gaz lui-même. Ainsi, les flammes de nos bougies, de nos lampes, qui doivent leurs propriétés éclairantes aux parcelles de charbon mises en liberté pendant la combustion, donnent des spectres continus, dans lesquels certaines parties ont seulement une intensité prédominante.

L'arc voltaïque, dont nous avons indiqué le mode de production (274), fournit une lumière dont le spectre est caractérisé par des bandes brillantes, variables avec la nature des corps qui forment les deux électrodes, 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, transportées d'un pôle à l'autre, et formant une sorte de conducteur intermédiaire (275).

383. Analyse spectrale. — Les différences qui existent entre les spectres discontinus produits par les divers corps, à l'état de gaz ou de vapeur, ont conduit à une méthode d'*analyse*, d'une extrême sensibilité, qui a pris, dans ces dernières années, un développement considérable. — Lorsqu'on alimente la flamme du gaz d'éclairage par un courant d'oxygène ou d'air, de manière à brûler complètement le charbon et à rendre la flamme à peine visible, on observe, en introduisant successivement dans cette flamme des sels de divers métaux, que la lumière prend des couleurs diverses, et qu'elle donne, par le passage au travers d'un prisme, des spectres qui peuvent servir à caractériser chacun des métaux employés. C'est ainsi que la présence du sodium dans la flamme est accusée par la présence, dans le spectre, d'une raie jaune très-brillante; celle du lithium, par des raies rouges 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. — Ce procédé d'investigation est d'ailleurs tellement sensible, qu'il permet, par exemple, de déceler dans la flamme la présence d'un trois-millionième de milligramme de sodium, de neuf millièmes de milligramme de lithium, etc.

Très-peu de temps après l'introduction de l'analyse spectrale dans la science, l'apparition de raies particulières, n'appartenant à aucun des métaux déjà connus, a conduit 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. — Un troisième métal, le thallium, fut découvert en 1861 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.

384. Raies du spectre solaire. — Lorsqu'on prend toutes les précautions nécessaires pour obtenir, avec la lumière solaire, un spectre bien pur, on y découvre une multitude de raies obscures transversales, parallèles à l'arête réfringente du prisme. Le phénomène a été signalé, à peu près en même temps, par Wollaston et par Fraunhofer : c'est Fraunhofer qui en fit, le premier, une étude attentive, et qui parvint à compter environ six cents de ces bandes ; elles sont ordinairement désignées sous le nom de *raies de Fraunhofer*. — Depuis cette époque, Brewster a pu en distinguer deux mille ; 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 uniformément distribuées dans l'étendue du spectre solaire, mais réunies en groupes (*fig. 272*) dont les sept princi-

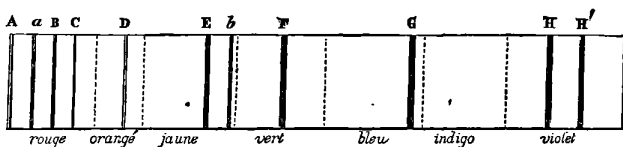


Fig. 272. — Raies du spectre solaire.

paux ont été désignés par les lettres B, C, D, E, F, G, H. La figure ci-dessus en indique quelques autres encore, telles que A, a, b, H', qu'on distingue très-facilement.

385. Théorie de la production de ces raies, d'après M. Kirchhoff. — La présence de raies obscures, dans le spectre de la lumière solaire, montre qu'il n'y a pas continuité parfaite entre les réfrangibilités des diverses radiations qui constituent cette lumière. En d'autres termes, la lumière solaire offre ce caractère remarquable, qu'il y manque un grand nombre de rayons simples, dont on peut assigner le degré de réfrangibilité d'après la place que chacun d'eux occuperait dans le spectre, si le spectre était continu. Quant à l'explication de cette discontinuité, celle qui a été donnée par M. Kirchhoff repose sur l'expérience suivante.

Si l'on reçoit sur un prisme la lumière d'une lampe à alcool salé, on observe que le spectre se réduit à une bande jaune, caractéristique du sodium (383). Si maintenant on prend un corps solide élevé à une très-haute température, comme un bâton de chaux rendu incandescent par la flamme d'un mélange d'oxygène et d'hydrogène (lumière de Drummond), et si l'on place ce corps sur un prisme de manière qu'un faisceau

émis par elle traverse la flamme d'alcool salé avant d'arriver au prisme, on voit apparaître, au lieu du spectre continu que la chaux aurait produit directement (382), un spectre dans lequel la place de la bande jaune est occupée par une bande *obscur*e. La flamme de l'alcool salé absorbe donc, dans la lumière qu'elle reçoit, précisément les rayons qui ont la même réfrangibilité que ceux qu'elle émet. — Ces résultats ont été généralisés par M. Kirchhoff : le pouvoir absorbant d'un corps quelconque, *pour des rayons d'une espèce déterminée*, est toujours proportionnel à son pouvoir émissif *pour ces mêmes rayons*. Ce n'est là d'ailleurs, comme on voit, qu'une extension du principe établi pour la chaleur (155).

Cela posé, pour expliquer la production des raies du spectre solaire, M. Kirchhoff admet que le noyau solide ou liquide de l'astre est enveloppé d'une atmosphère gazeuse ou *photosphère*, dont l'éclat propre est notablement inférieur au sien. Sans la présence de cette photosphère, le noyau nous enverrait une lumière qui produirait un spectre continu (382); mais cette lumière, en traversant la photosphère, perd, par absorption, la plus grande partie des rayons dont la réfrangibilité correspond à ceux que la photosphère émet elle-même. En d'autres termes, 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. — M. Kirchhoff a déterminé, avec le plus grand soin; la position des raies *obscur*es du spectre solaire, pour la comparer à celle des raies *brillantes* des corps connus à l'état de vapeur : en effet, si l'on constate une coïncidence exacte, entre certaines raies obscures du spectre solaire et les lignes brillantes fournies par une vapeur déterminée, on en pourra conclure la présence de cette vapeur dans la photosphère du soleil. De là, comme on voit, 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 certainement partie de l'atmosphère du soleil : pour le fer, en particulier, cette assertion est fondée sur la concordance entre soixante raies brillantes du spectre fourni par la vapeur des sels de ce métal, et soixante raies obscures du spectre solaire.

CHAPITRE III

—

INSTRUMENTS D'OPTIQUE

386 **Classification des instruments d'optique.** — Nous partagerons les instruments d'optique en deux groupes distincts, d'après les considérations suivantes,

Les uns fourniront des *images réelles*, qu'on recevra sur un écran : les points de l'écran où se formeront les foyers correspondants aux divers points de l'objet, diffuseront en tous sens la lumière, et l'image 'sera visible pour des observateurs placés d'une manière quelconque.

Dans les autres, les rayons émanés de l'objet, et dont la marche aura pu être modifiée par des réfractions ou des réflexions, seront reçus finalement sur une lentille, au delà de laquelle devra être placé l'œil de l'observateur, et qui prendra le nom d'*oculaire*. Au sortir de cette lentille, il n'y aura plus de foyer réel : à chacun des points de l'objet correspondra un faisceau divergent, que l'œil recevra comme s'il émanait d'un point situé en deçà de l'oculaire : en d'autres termes, l'œil ne pourra percevoir l'*image virtuelle* de l'objet, qu'à la condition d'être placé à une très-petite distance au delà de l'oculaire.

INSTRUMENTS DONNANT UNE IMAGE RÉELLE SUR UN ÉCRAN.

587. Chambre noire pour la photographie. — Nous choisirons, comme type de la *chambre noire*, celle dont la photographie fait aujourd'hui un si fréquent usage, pour la reproduction des images au moyen des substances impressionnables à la lumière.

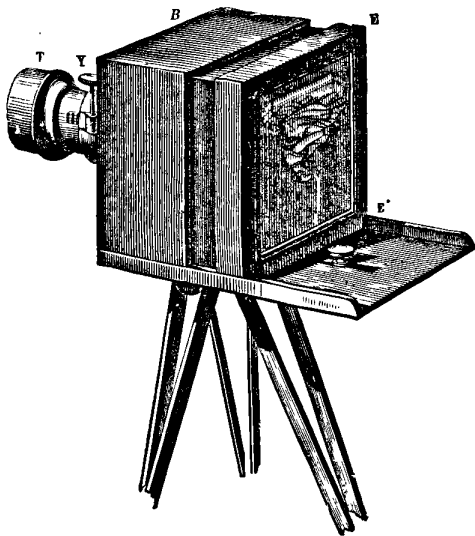


Fig. 273. — Chambre noire pour la photographie.

La chambre noire des photographes se compose d'une caisse rectangulaire, formée de deux pièces B, E (fig. 273), qui peuvent glisser l'une

dans l'autre; à la face antérieure, est fixé un tube T qui porte une lentille à laquelle on donne le nom d'*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 cette lentille (370, 1°). — La marche des rayons lumineux est indiquée dans la figure 274, qui représente la coupe d'une chambre noire : l'objet lumineux

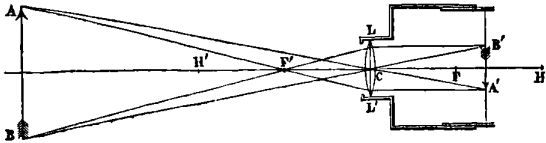


Fig. 274.

AB est supposé placé à une distance supérieure au double de la distance focale principale CH' de l'objectif LL' : l'image A'B' se fait alors entre le foyer F et le point H dont la distance à l'objectif est double de CF (*).

Pour mettre l'appareil *au point*, l'opérateur a soin d'entourer sa tête, et la partie postérieure de l'appareil, d'une étoffe noire qui arrête les rayons lumineux venant des parties environnantes de l'espace : sans cette précaution, ces rayons, se diffusant sur la face postérieure de la glace dépolie, empêcheraient d'apprécier la netteté de l'image. — Il commence par amener approximativement la glace au point convenable, par les mouvements de la pièce E dans la pièce B (fig. 273), puis il fixe E à l'aide de la vis de pression qui se trouve en arrière; enfin, il achève de régler l'appareil, en faisant avancer ou reculer un peu l'objectif, au moyen de la vis Y. — On ferme provisoirement l'objectif au moyen d'un obturateur, et l'on enlève la glace dépolie. On lui substitue alors une plaque de verre qui a été préparée dans l'obscurité, et qui est contenue dans un châssis parfaitement clos, s'adaptant à la place de la glace elle-même : la face qui est enduite des substances sensibles doit être tournée du côté de l'intérieur, et couverte par une trappe de bois.

Tous ces préliminaires terminés, on découvre d'abord la plaque, du côté intérieur, en enlevant la trappe qui la couvrait; on enlève également l'obturateur de l'objectif, et on laisse les rayons lumineux qui forment l'image agir sur les substances sensibles, pendant un temps variable, selon les circonstances. — Enfin, on replace l'obturateur, on re-

(*) Pour déterminer le foyer conjugué du point A, on a considéré le rayon AF' qui passe au foyer principal de gauche et qui 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. — On a déterminé de même l'image du point B.

place la trappe, et l'on emporte la plaque, contenue dans son châssis, jusque dans le laboratoire obscur où doivent s'effectuer les opérations chimiques que nous n'avons point à décrire, et qui achèveront de donner aux points impressionnés par la lumière un aspect différent de ceux qui n'ont pas éprouvé cette action.

388. Microscope solaire. — Le microscope solaire est destiné à donner des images réelles et considérablement amplifiées d'objets très-petits.

La partie essentielle de l'instrument est une lentille convergente LL' (fig. 275) ayant une très-petite distance focale principale; f et f' sont ses deux foyers. L'objet AB , éclairé comme nous le dirons plus loin, est fixé à

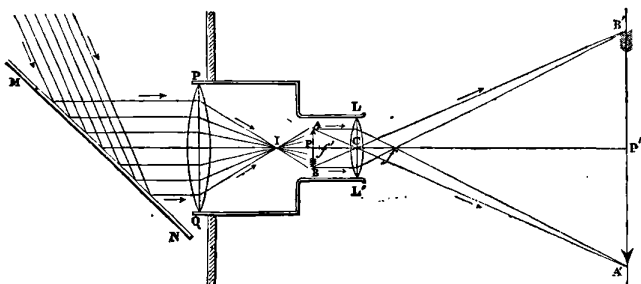


Fig. 275.

une distance PC de la lentille, un peu supérieure à la distance focale principale; l'écran qui doit recevoir l'image est disposé, dans la chambre obscure où sont placés les spectateurs, à une distance d'autant plus grande que l'on veut obtenir un grossissement plus considérable.

La figure 275 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 d'une manière semblable.

La lentille PQ et le miroir MN constituent un système éclairant. En 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 solaires, reçus sur un miroir plan MN qui est placé à l'extérieur de la pièce où se fait l'observation, sont réfléchis de manière à rencontrer la lentille PQ , qui les concentre dans une très-petite région I : on place l'objet AB très-peu au delà de cette ré-

gion; 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, une image de netteté maximum.

Il est facile de mesurer, par une expérience directe, le *grossissement linéaire* obtenu dans des conditions déterminées, c'est-à-dire le rapport de deux dimensions linéaires de l'image et de l'objet. — Pour cela, on emploie un *micromètre*, consistant en une lame de verre sur laquelle on a tracé, à l'aide d'une machine spéciale, des traits distants entre eux d'un centième de millimètre. Cette lame étant substituée à l'objet AB, on mesure la distance des images de deux de ces traits, et on la divise par leur distance réelle : le quotient est le grossissement linéaire. — 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 remarque que, l'image et l'objet étant des figures semblables, le rapport de leurs surfaces est égal au carré du rapport de leurs dimensions homologues : en d'autres termes, le grossissement superficiel est exprimé par le carré du grossissement linéaire. Si, par exemple, on a trouvé que le grossissement linéaire est représenté par 100, le grossissement superficiel sera représenté par 10 000.

389. **Lanterne magique.** — Le principe de la lanterne magique est tout à fait semblable à celui du microscope solaire. — La lentille objective est beaucoup moins convergente, et donne un grossissement beaucoup moindre. — Dès lors, il n'est pas nécessaire d'éclairer aussi fortement les objets; on se contente d'une lampe placée dans la lanterne, devant un miroir concave qui renvoie sur une lentille convergente toute la lumière qu'il reçoit : celle-ci concentre ainsi, sur l'objet, à la fois la lumière qui lui arrive directement de la lampe, et celle qui a été réfléchie par le miroir.

Les objets sont des dessins peints sur verre, ou des images photographiques : on les introduit successivement dans une rainure, disposée à une distance de l'objectif *supérieure à la distance focale principale*.

— Les sujets doivent être placés dans une position *renversée*, afin que l'image soit *droite* pour les spectateurs.

INSTRUMENTS A OCLAIRES, DONNANT DES IMAGES VIRTUELLES.

390. **Loupe.** — La loupe est une simple lentille convergente, qui fonctionne comme *oculaire*, c'est-à-dire qu'on place devant l'œil pour obtenir une image virtuelle et amplifiée des petits objets.

Soit AB (*fig. 276*) un objet placé *entre la lentille et son foyer prin-*

cial F' . Si l'on mène l'axe secondaire AC , et, du même point A , un rayon AI parallèle à l'axe principal, ce rayon, qui vient après réfraction passer par le foyer principal F , ne peut rencontrer AC au delà de la lentille; mais le prolongement géométrique IA' du rayon réfracté rencontre le prolongement de CA en un point A' ; ce point A' est un foyer virtuel, c'est-à-dire que tous les rayons émanés de A ont, en sortant de la lentille, les mêmes directions que s'ils émanaient de A' . On obtiendra de même le foyer conjugué B' de B , et par suite l'image virtuelle $A'B'$ de l'objet AB . — Or, il résulte de la construction même que, si l'on rapproche l'objet AB du foyer F' , l'image $A'B'$ grandit et s'éloigne de la lentille; si l'objet arrivait jusqu'au foyer,

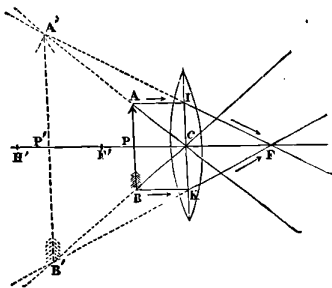


Fig. 276.

l'image s'éloignerait jusqu'à l'infini. Donc il est toujours possible de donner à l'objet AB , entre le foyer et la lentille, une position telle que l'image se forme à la distance minimum de la vision distincte, c'est-à-dire à la distance à laquelle nous rapprochons les objets de notre œil, pour en voir le mieux possible les détails à l'œil nu.

Si l'on suppose que cette position de l'objet soit réalisée, et si l'on considère le centre optique de l'œil comme se confondant sensiblement avec celui de la lentille, on voit que l'œil apercevra alors l'objet et son image sous le même angle $A'CB'$; mais cet angle est *plus grand* que celui sous lequel l'œil nu verrait l'objet, s'il était placé à la distance CP' , c'est-à-dire à la distance minimum de la vision distincte. C'est dans ce sens qu'on dit que la loupe *grossit* les objets. — Il est aisé de voir d'ailleurs que, pour un même œil, ce grossissement est d'autant plus grand que la lentille est plus convergente.

Pour les observations d'histoire naturelle, on fixe ordinairement la loupe à un pied métallique, au-dessus d'un *porte-objet* dont la distance à la loupe peut se régler à l'aide d'une vis. L'appareil ainsi construit reçoit quelquefois le nom de *microscope simple*.

391. 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 amplifiée.

La figure 277 indique la marche des rayons dans le microscope com-

posé : ll' est l'objectif, dont les foyers sont en f et en f' ; LL' est l'oculaire, dont les foyers sont en F et en F' . — L'objet AB , placé à une distance Pc de l'objectif *un peu supérieure à la distance focale* $f'c$, donne une image réelle A_1B_1 , renversée et amplifiée (370, 5°).

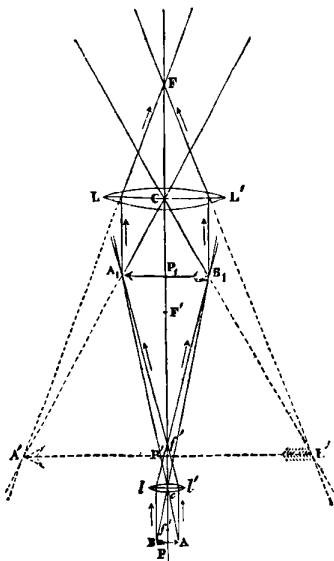


Fig. 277.

L'oculaire LL' est placé à une distance P_1C de l'image A_1B_1 *inférieure à sa distance focale principale* $F'C$; les rayons, qui se sont croisés aux différents points de 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 l'image virtuelle à se former, pour chaque observateur, à la distance minimum de la vision distincte.

L'oculaire et l'objectif sont ordinairement assujettis dans un tube métallique AB (fig. 278), supporté par un collier C . Les objets, placés entre deux lames

de verre minces et transparentes, sont déposés sur la plaque P ou *porte-objet*, au-dessus de l'ouverture circulaire pratiquée en son milieu. Lorsque les objets sont transparents, on les éclaire en dessous, au moyen du miroir concave M , sur lequel on reçoit la lumière des nuées ou celle d'une lampe, et qui renvoie cette lumière dans l'ouverture du porte-objet. Lorsque les objets sont opaques, on les éclaire par la partie supérieure, au moyen d'une lentille convergente L , que l'on abaisse de manière à concentrer la lumière sur les objets eux-mêmes. — Le collier C , qui soutient le tube du microscope, est fixé à la colonne creuse D ; une vis V , placée dans l'axe de cette colonne, permet de la faire monter ou

(*) Dans la figure 277, on a effectué d'abord, pour déterminer les extrémités de l'image réelle A_1B_1 , les constructions qui ont été indiquées à propos du microscope simple (188). (A suivre) pour déterminer les extrémités de l'image virtuelle $A'B'$, les constructions indiquées à propos de la loupe (362).

descendre, de manière à éloigner ou à rapprocher le microscope du porte-objet, pour *mettre au point*.

L'objectif B est, en général, formé de deux ou trois lentilles très-con-

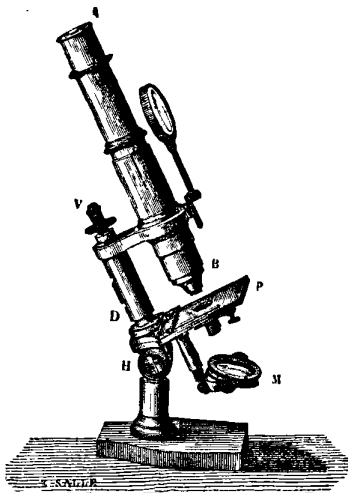


Fig. 278. — Microscope composé.

vergentes, montées dans de petites garnitures métalliques qui s'adaptent les unes aux autres. L'oculaire est formé de deux lentilles convergentes, montées dans un même tube qu'on introduit à la partie supérieure A. — On a, pour un même instrument, plusieurs systèmes d'objectifs et d'oculaires, que l'on peut à volonté substituer les uns aux autres, pour obtenir des grossissements variables.

592. Usages de la chambre claire : détermination du grossissement d'un microscope. — Le *grossissement linéaire* d'un microscope se mesure par le rapport de deux dimensions homologues de l'image et de l'objet. — La méthode la plus commode, pour effectuer cette mesure, consiste dans l'emploi d'une *chambre claire*.

Parmi les chambres claires de diverses formes que l'on peut employer, nous décrirons celle qui est adoptée par la plupart des constructeurs, et en particulier par M. Nacet. Un petit miroir métallique *mn* (fig. 279), percé en son centre d'une ouverture circulaire, se fixe au-dessus de l'oculaire L, de façon à être incliné à environ 45 degrés sur l'axe du

tube ; un prisme rectangulaire *abc* est disposé latéralement, de manière que sa face hypoténuse *ac* soit sensiblement parallèle à *mn*. — L'œil

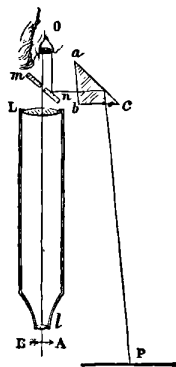


Fig. 279.

placé en O, tout près de l'ouverture du miroir, reçoit, au travers de cette ouverture, les rayons émis par l'objet AB et transmis par l'instrument, en sorte qu'il voit l'image virtuelle de cet objet. D'autre part, si l'on dispose latéralement, au-dessous du prisme, une feuille de papier P, les rayons envoyés par cette feuille, éprouvant la réflexion totale sur la face hypoténuse *ac* et venant se réfléchir de nouveau 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 linéaire de l'instrument, on place sur le porte-objet un micromètre tracé sur verre, comme celui qui nous a servi à mesurer le grossissement

du microscope solaire (388), et l'on dispose sur la feuille de papier une règle divisée en millimètres, de manière que l'image des divisions du micromètre apparaisse projetée sur la règle. Supposons, par exemple, que 3 divisions de la règle soient couvertes par 1 division de l'image grossie du micromètre : les divisions du micromètre étant égales chacune à un centième de millimètre, le grossissement linéaire sera exprimé

$$\text{par } \frac{3}{0,01} = 300.$$

393. **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. — Mais, l'instrument étant destiné à l'observation d'objets très-éloignés, 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. D'autre part, 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. Enfin, les images réelles d'objets très-éloignés se formant à peu près dans le plan principal de l'objectif, et l'oculaire devant être placé au delà de ces images, la longueur de l'instrument est encore plus grande que la distance focale de l'objectif. 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 280 indique le marche des rayons lumineux. Soit L l'objectif et L' l'oculaire ; l'objet lumineux est supposé à gauche de L et très-élo-

gné. 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 ,

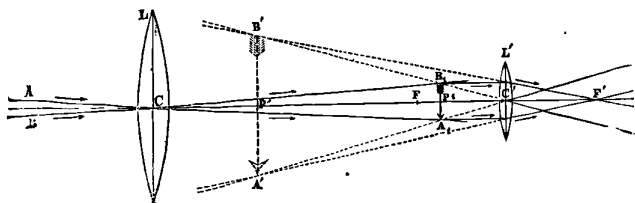


Fig. 280.

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 composé, oblige à employer ici une disposition qui permette de faire mouvoir l'oculaire, afin d'adapter l'instrument aux différentes vues. L'oculaire est porté dans un petit tube, qui glisse à frottement dans le grand tube qui porte l'objectif : c'est en enfonçant ou en retirant l'oculaire, qu'on arrive à *mettre au point*, c'est-à-dire à voir l'image se former avec netteté.

Pour mesurer le grossissement linéaire d'une lunette, on peut employer une sorte de chambre claire, imaginée par Pouillet, et dont la disposition est analogue à celle qui nous a servi pour le microscope composé (392) ; on place, à une grande distance de l'instrument, une échelle divisée, dont les lignes de division soient assez grosses pour être vues de loin à l'œil nu. La chambre claire superpose les divisions de l'image grossie de l'échelle, vue dans la lunette, aux divisions de cette même échelle, vues comme elles le seraient à l'œil nu. On en déduit le grossissement, comme nous l'avons dit plus haut (392).

394. Réticule de la lunette astronomique. — Fixation de l'axe optique. — L'un des usages les plus fréquents des lunettes, en astronomie, consiste dans la détermination exacte de la direction dans laquelle se trouve un astre, par rapport à l'observateur, à un moment donné. Pour obtenir ce résultat, on fixe dans le tube, dans le plan même où se forme l'image réelle fournie par l'objectif, un *réticule* (fig. 281), c'est-à-dire un diaphragme présentant une ouverture circulaire dans laquelle sont tendus deux fils



Fig. 281.

très-fins, perpendiculaires entre eux : ce sont ordinairement des fils d'araignée. — Lorsqu'on vise un point lumineux, on dirige la lunette de façon que l'œil, regardant, au travers de l'oculaire, cette image et le réticule qui sont situés dans un même plan, voie l'image du point lumineux coïncider avec le point de croisement des fils. Il ne peut en être ainsi que si le point lumineux est situé sur la droite qui passe par le point de croisement des fils et par le centre optique de l'objectif (370). — 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, par suite, peut servir à définir la ligne de visée. C'est cette droite qu'on nomme l'*axe optique* de la lunette.

395. **Lunette terrestre.** — On désigne sous le nom de *lunettes terrestres*, ou de *longues-vues*, des lunettes qui diffèrent de la lunette astronomique par l'interposition, entre l'objectif et l'oculaire, d'un système de deux lentilles convergentes, dont le but principal est de substituer, à l'image réelle et renversée qui est fournie par l'objectif, une autre image *redressée*, par rapport à laquelle la lentille oculaire fonctionnera toujours comme une loupe. — Le système de ces deux lentilles intermédiaires a reçu le nom de *véhicule* : il est contenu dans le même tube à tirage que la lentille oculaire. On désigne ordinairement sous le nom d'*oculaire terrestre* l'ensemble formé par le véhicule et par l'oculaire proprement dit.

L'emploi de la lunette terrestre a l'inconvénient de diminuer notablement la clarté de l'image perçue par l'œil, à cause de l'affaiblissement que la lumière éprouve, dans son passage au travers des deux lentilles du véhicule, soit par absorption, soit par réflexion sur les surfaces des verres. En outre, il devient nécessaire de donner à l'instrument une longueur encore plus grande. Aussi n'emploie-t-on la lunette terrestre, au lieu de la lunette astronomique, que dans les circonstances où le renversement apporterait une trop grande gêne dans les observations.

396. **Lunette de Galilée.** — La lunette de Galilée a l'avantage de fournir une image droite, sans l'interposition de verres supplémentaires entre l'objectif et l'oculaire, en employant comme oculaire une lentille *divergente*. — Cette disposition a, en outre, l'avantage de donner à l'instrument, comme nous allons le voir, une longueur bien moindre qu'à la lunette astronomique elle-même.

Soit L (fig. 282) l'objectif, AC et BC les axes secondaires menés par les points extrêmes d'un objet trop éloigné pour qu'on puisse en indiquer la position sur la figure : les rayons, à leur sortie de l'objectif, convergent vers une image réelle et renversée A_1B_1 , située un peu au delà du foyer principal F de l'objectif. Plaçons, sur le trajet de ces rayons lumineux, un oculaire *divergent* L' à une distance de A_1B_1 un peu plus grande que sa distance focale principale $C'f'$. Considérons, parmi les rayons qui tombent

sur l'oculaire et qui, sans l'interposition de cette lentille, iraient passer par A_1 , celui qui est parallèle à l'axe principal : il est réfracté de manière

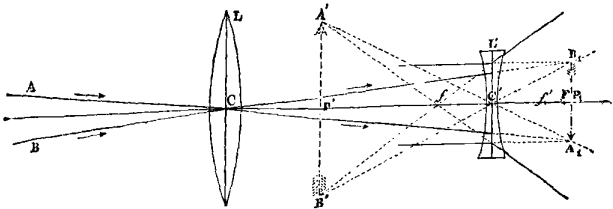


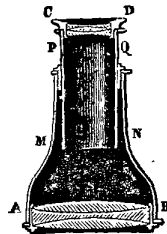
Fig. 282.

que son prolongement géométrique passe par le foyer principal virtuel qui est situé en f ; ce prolongement rencontre le prolongement de l'axe secondaire $C'A_1$ au point A' ; c'est donc au point A' que passent les prolongements de tous les rayons qui, sans l'interposition de l'oculaire, seraient venus se croiser en A_1 . — On déterminera le point B' par une construction semblable, et, par suite, l'image virtuelle $A'B'$, laquelle est droite par rapport à l'objet. — L'œil doit toujours être placé très-près de l'oculaire, afin de recueillir la plus grande partie possible de chacun des faisceaux divergents qui paraissent émaner des différents points de $A'B'$.

La distance de l'oculaire à l'objectif doit être réglée, par chaque observateur, de manière que l'instrument soit *au point*, pour sa vue. Aussi, l'oculaire CD (fig. 283) est-il placé dans un tube PQ , qui glisse à frottement dans le tube MN qui porte l'objectif AB . L'observateur, en plaçant la lunette devant son œil, fait avancer ou reculer le tube PQ jusqu'à ce qu'il arrive à une position qui donne à l'image la netteté maximum.

Dans la lunette représentée par la figure 285, l'objectif et l'oculaire sont formés chacun de trois lentilles superposées. Cette multiplicité des lentilles est destinée à atténuer autant que possible les phénomènes de coloration qu'une lentille unique produit toujours sur les bords des images : on dit alors que le système *achromatise* l'image, ou que les lentilles forment un système *achromatique*.

Les jumelles ou lorgnettes de spectacle sont formées de deux lunettes de Galilée, assujetties parallèlement, et dont les axes sont à une distance égale à la distance moyenne des pupilles des deux yeux. Les tubes qui portent les oculaires sont disposés de façon qu'ils se meuvent

Fig. 285.
Lunette de Galilée.

simultanément, de sorte que l'instrument peut être mis simultanément *au point* pour les deux yeux.

397. **Télescope de Newton.** — On donne généralement le nom de *télescopes* à des instruments où la lentille objective qui, dans les lunettes, reçoit la lumière des objets, est remplacée par un miroir. — Dans le télescope de Newton, c'est un miroir sphérique concave, qui donne, par réflexion, une image réelle des objets éloignés ($57, 1^{\circ}$).

Soit MN (fig. 284) ce miroir sphérique concave, placé au fond d'un tube d'un diamètre égal au sien, C le centre de la sphère dont ce miroir fait partie, O son centre de figure. Soient AC et BC les axes secondaires menés

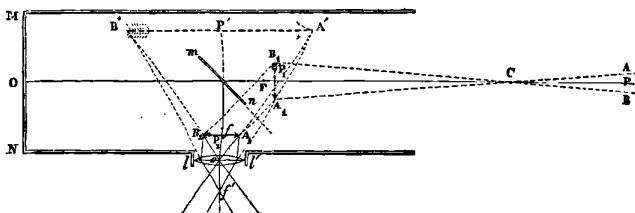


Fig. 284.

par les points extrêmes d'un objet très-éloigné, placé bien au delà des limites de la figure. Les rayons lumineux qui émanent des divers points de l'objet, et qui tombent sur le miroir, tendent à produire, un peu au delà du foyer principal F, une image A_1B_1 , laquelle est réelle et renversée par rapport à l'objet. Sur le trajet de ces rayons lumineux, et avant le point où ils iraient former cette image, est placé un petit miroir plan mn , incliné à 45 degrés sur l'axe du miroir sphérique : les rayons subissent une nouvelle réflexion sur ce petit miroir, et l'image se trouve reportée dans la position A_2B_2 , symétrique de A_1B_1 par rapport à mn . Au delà de cette image réelle, et dans la paroi du tube, est placé un oculaire ll' , formé par une lentille convergente faisant fonction de loupe : son foyer principal est placé en f , un peu en deçà de A_2B_2 . Les rayons qui émergent de cette lentille donnent, pour l'œil placé au delà, une image virtuelle $A'B'$. Pour *mettre au point*, l'observateur fait mouvoir l'oculaire de manière que l'image offre la netteté maximum.

Le grossissement donné par le télescope peut se mesurer directement, à l'aide d'une mire divisée, placée très-loin, et d'une chambre claire analogue à celles dont nous avons indiqué l'emploi pour le microscope et pour la lunette astronomique (393).

Le télescope de Newton a été perfectionné, dans sa construction, par Foucault. — Les miroirs métalliques, qu'on employait depuis Newton,

sont toujours très-pesants : ils sont difficiles à travailler, et offrent en outre l'inconvénient que, l'air humide oxydant rapidement leur surface, il faut recommencer de temps en temps un travail de polissage qui est extrêmement long et dispendieux. Au miroir de bronze, Foucault a substitué un miroir de verre, dont la surface concave est couverte d'une couche mince d'argent, déposée chimiquement. — Avant d'effectuer l'argenteure, on donne à la surface du verre la forme convenable, par des procédés que Foucault a indiqués et mis en pratique lui-même, et qui comprennent une série d'essais et de retouches permettant d'apprécier, pendant le travail, les progrès que fait l'opération. La surface du verre, ainsi travaillée, devient déjà un miroir qui présente, pour le but qu'on se propose, des qualités supérieures à celles des miroirs qu'on avait construits jusque-là. L'opération de l'argenteure chimique, en augmentant le pouvoir réflecteur, lui donne des qualités plus remarquables encore. — Lorsque, par un long usage, 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 brillant primitif.

TABLE DES MATIÈRES

PRÉLIMINAIRES

Mouvement, en général.	1	ctions qu'elles impriment à un	
Mouvement uniforme.	1	même mobile	6
Mouvement varié. — Vitesse		Masse	6
moyenne. — Vitesse à un		Mesure des forces constantes par	
instant déterminé.	2	les accélérations qu'elles pro-	
Mouvement uniformément varié.	2	duisent.	7
Principe de l'inertie	4	Représentation géométrique des	
Forces.	4	forces.	8
Mesure des forces	4	Composition des forces appliquées	
Dynamomètres.	5	en un même point	8
Une force constante, agissant seule		Composition des forces paral-	
sur un point matériel entière-		lèles.	9
ment libre, lui imprime un		Centre des forces parallèles . .	9
mouvement uniformément ac-		Travail d'une force dont le point	
célééré.	5	d'application se déplace dans	
Deux forces constantes sont entre		la direction de la force elle-	
elles comme les accéléra-		même. — Kilogrammètre. . .	10

LIVRE PREMIER

PESANTEUR ET HYDROSTATIQUE

CHAPITRE PREMIER

Notions générales sur la		justesse	16
 pesanteur. — Pesanteur.	12	Conditions de sensibilité	17
Direction des forces dues à l'ac-		Méthode de la double pesée. . .	17
tion de la pesanteur. — Ver-		Balance de précision	18
ticale	12	Chute des corps. — Chute	
Poids, centre de gravité.	15	des corps dans le vide.	19
Détermination expérimentale du		Détermination expérimentale des	
centre de gravité.	13	lois de la chute des corps . .	19
Détermination expérimentale du		Machine d'Atwood	20
poids. — Poids relatifs. . . .	14	Appareil du général Morin. . .	25
Usage de la balance. — Bal-		Pendule.	21
 ance	15	Isochronisme des petites oscil-	
Méthode ordinaire de pesée . .	15	lations.	24
Conditions de justesse. — Con-		Application du pendule à la dé-	
statation expérimentale de la		termination des variations d'in-	
		tensité de la pesanteur. . . .	25

CHAPITRE II

Hydrostatique. — Définition des liquides et des gaz	26
La force élastique d'un gaz augmente quand on diminue son volume	27
Fluides en général. — But de l'hydrostatique	27
Équilibre des liquides. — Principe fondamental. — Transmission des pressions	28
Application du principe précédent à la presse hydraulique	29
Équilibre d'un liquide soumis à la seule action de la pesanteur. — Horizontalité de la surface	31
Pression sur le fond horizontal d'un vase	31
Pressions sur les parois latérales	52
Mouvement de recul produit par l'écoulement d'un liquide	53
Pression supportée de bas en haut par une surface horizontale, prise dans un liquide pesant	54
Égalité de pression en tous sens, autour d'un point pris dans l'intérieur d'un liquide en équilibre	54
Égalité de pression dans tous les points d'un même plan horizontal, pris dans un liquide pesant	55
Conditions d'équilibre des liquides superposés	55
Conditions d'équilibre des liquides dans des vases communiquants	56
Niveau d'eau	57
Principe d'Archimède. — Corps flottants. — Principe d'Archimède	
Poids apparent d'un corps complètement plongé	59
Corps flottants	40
Ludion	40

CHAPITRE III

Densités des solides et des liquides. — Définitions	41
--	----

Remarque sur le choix des unités	41
La densité d'un corps peut aussi être définie, le rapport du poids de ce corps au poids d'un égal volume d'eau	42
Usages des densités	42
Détermination expérimentale des densités des corps solides et liquides. — Méthode générale	45
Méthode du flacon	45
Méthode de la balance hydrostatique	44
Méthode des aréomètres à volume constant	45
Corps solides solubles dans l'eau	46
Tables de poids spécifiques de corps solides et liquides	46
Aréomètres à poids constant. — Aréomètres à poids constant, en général	47
Aréomètres de Beaumé	47
Alcoomètre centésimal de Gay-Lussac	48

CHAPITRE IV

Pression atmosphérique. — L'air et les gaz sont pesants	49
Pression atmosphérique. — Expérience de Torricelli	49
Mesure de la pression exercée par l'atmosphère sur une surface déterminée	50
Évaluation de la pression atmosphérique ou de la force élastique de l'air, en hauteurs de mercure	51
Crève-vessie. — Hémisphères de Magdebourg	52
Effet de la pression atmosphérique sur nos organes	55
Baromètres. — Baromètres à cuvette	55
Baromètres à cuvette usuels	54
Baromètre de Fortin	54
Baromètres à siphon	55
Baromètre de Gay-Lussac	56
Baromètre à cadran	57
Baromètres métalliques	57
Variations barométriques	58

CHAPITRE V

Loi de Mariotte. — Manomètres. — Loi de Mariotte.	59	Influence des causes qui limitent l'effet de la machine.	71
La loi de Mariotte est une loi approchée	61	Manomètre de la machine pneumatique.	72
Problèmes généraux. — Evaluation du volume d'un gaz sous la pression normale.	63	Pompe à main, pour raréfier ou comprimer les gaz	72
Problèmes sur les mélanges de gaz.	64	Pompes. — Siphon. — Des diverses espèces de pompes à liquides.	75
Manomètres. — Manomètres en général.	65	Pompe aspirante.	75
Manomètre à air libre.	65	Pompe foulante.	75
Manomètre à air comprimé.	65	Pompe aspirante et foulante.	76
Manomètre métallique de M. Bourdon.	66	Siphon.	76
Machine pneumatique. — Description.	67	Principe d'Archimède appliqué aux gaz. — Aérostats. — Poussée éprouvée par les corps plongés dans l'air.	71
Jeu de la machine.	69	Nécessité des corrections à faire subir aux pesées effectuées dans l'air.	78
Clef de la machine.	70	Aérostats.	78
Calcul de la force élastique de l'air restant, après un nombre déterminé de coups de piston.	70	Force ascensionnelle.	79
		Variation de la force ascensionnelle pendant l'ascension.	79
		Calcul de la force ascensionnelle au départ.	80

LIVRE II

CHALEUR

CHAPITRE PREMIER

Dilatations. — Dilatation des corps par la chaleur.	81	Relation entre les densités d'un même corps à différentes températures.	92
Températures. — Thermomètres en général.	85	Le coefficient de dilatation cubique d'un corps est sensiblement triple de son coefficient de dilatation linéaire.	95
Construction du thermomètre à mercure.	84	Principe de la méthode de Lavoisier et Laplace pour déterminer les coefficients de dilatation linéaire.	94
Point fixes. — Graduation du thermomètre centigrade.	85	Table des coefficients de dilatation linéaire de quelques corps solides.	95
Déplacement du zéro.	86	Applications des dilatations des corps solides. — Pendules compensateurs.	95
Echelle de Réaumur.	87	Dilatation des liquides. — Dilatation apparente et dilatation absolue d'un liquide.	96
Echelle de Fahrenheit.	87	Principe de la méthode de Dulong et Petit, pour déterminer	
Thermomètre à alcool.	88		
Instruments thermométriques en général.	89		
Pyromètre de Wedgwood.	90		
Dilatation des corps solides. — Définition des coefficients de dilatation.	90		
Usages de ces coefficients.	90		

le coefficient de dilatation absolue de mercure.	
Principe de la détermination des coefficients de dilatation absolue des autres liquides. . .	97
Maximum de densité de l'eau. . .	98
Applications des dilations des liquides. — Corrections barométriques.	99
Thermomètre à poids.	99
Dilatations des gaz. — Définitions.	101
Usages du coefficient de dilatations des gaz.	101
Calcul du volume ou de la densité d'un gaz, dans les conditions normales de température et de pression.	102
Principe de la méthode de Gay-Lussac, pour déterminer le coefficient de dilatation des gaz.	102
Thermomètre à air.	104
Densités des gaz. — Définitions.	104
Principe de la méthode de M. Regnault pour déterminer les densités des gaz.	105
Table des densités de quelques gaz, par rapport à l'air. . .	107
Poids du litre d'air.	108
Calcul du poids spécifique d'un gaz par rapport à l'eau. . . .	108
Problème.	108

CHAPITRE II

Chaleur rayonnante. — Rayonnement de la chaleur. .	109
La chaleur traverse le vide. . .	109
La chaleur traverse certains corps sans les échauffer. . .	109
Propagation rectiligne de la chaleur.	109
Quantités de chaleur reçues normalement par une même surface, à différentes distances de la source	110
Appareil de Melloni.	110
Emission de la chaleur rayonnante. — Pouvoirs émissifs. .	112
Réflexion de la chaleur rayonnante. — Pouvoirs réflecteurs	114
Diffusion ou réflexion irrégulière. IRIS, LILLIAD. — Université	

Transmission de la chaleur rayonnante. — Pouvoir diathermanes.	114
Applications.	115
absorption de la chaleur rayonnante. — Pouvoirs absorbants.	115
Egalité des pouvoirs émissifs et des pouvoirs absorbants. . .	116
Equilibre mobile de température. Réflexion apparente du froid . .	117
Conductibilité. — Propagation de la chaleur par conductibilité.	117
Conductibilité des corps solides. — Appareil d'Ingenhousz. . .	117
Courants produits dans une masse fluide échauffée par la partie inférieure.	119
Faible conductibilité des liquides et des gaz.	119
Détermination des chaleurs spécifiques. — Définitions.	120
Détermination de la chaleur spécifique des corps solides et liquides, par la méthode des mélanges.	120
Termes de corrections.	120
Table des chaleurs spécifiques de quelques corps solides et liquides.	122

CHAPITRE III

Changements d'état. Passage de l'état solide à l'état liquide, et passage inverse. — Fusion.	122
Chaleur latente de fusion. . . .	125
Détermination de la chaleur latente de fusion de la glace, par la méthode des mélanges. . .	124
Solidification.	124
Phénomènes de surfusion. . . .	125
Changements de volume qui accompagnent la fusion ou la solidification.	125
Dissolution.	126
Mélanges réfrigérants.	126
Passage de l'état liquide à l'état de vapeur. — Formation des vapeurs dans le vide	127

Force élastique maximum des vapeurs saturantes.	128	Alambic	150
Mesure de la force élastique maximum de la vapeur d'eau, entre zéro et 100 degrés, par le procédé de Dalton.	129	Liquéfaction des gaz.	141
Force élastique maximum de la vapeur d'eau à des températures inférieures à zéro ou supérieures à 100 degrés.	150	CHAPITRE IV	
Table des valeurs de la force élastique maximum de la vapeur d'eau, à diverses températures.	151	A	
Mélange des gaz et des vapeurs. — La force élastique d'une vapeur, dans un espace occupé par un gaz, est égale à celle qu'elle aurait dans le vide, à la même température.	151	Notions générales sur les machines à vapeur —	
Ébullition et évaporation. — Condensation des vapeurs et des gaz. — Distinction entre l'ébullition et l'évaporation	153	Emploi de la vapeur pour produire le mouvement.	142
Lois de l'ébullition.	153	Emploi du condenseur.	143
Table des points d'ébullition de quelques liquides.	153	Emploi de la détente.	144
Chaleur latente de vaporisation.	153	Machines à basse pression, à moyenne pression et à haute pression.	145
Détermination de la chaleur latente de vaporisation de l'eau.	154	Distribution de la vapeur dans le cylindre. Tiroir.	145
Influence de la pression sur la température d'ébullition.	155	Description des pièces essentielles de la machine de Watt.	146
Ébullition de l'eau au-dessous de 100 degrés, sous des pressions inférieures à 760 millimètres.	155	Cheval-vapeur.	149
Marmite de Papin.	156	CHAPITRE V	
Influence de la présence de bulles gazeuses, au sein d'une masse liquide, pour déterminer l'ébullition.	157	Hygrométrie. Définitions.	149
Influence des substances dissoutes, sur la température d'ébullition.	158	Hygromètre à cheveu.	150
Évaporation.	158	Problème.	152
Froid produit par l'évaporation.	158	Rosée et météores aqueux —	
Condensation des vapeurs. — Distillation.	140	Formation de la rosée.	152
		Givre	153
		Brouillards et nuages	155
		Pluie, neige, grêle.	154
		CHAPITRE VI	
		Distribution de la température à la surface du globe. —	
		Températures moyennes.	155
		Lignes isothermes, isothermes et isochimènes	155
		Climats	155
		Influence de la latitude.	156
		Influence du voisinage des mers	157
		Influence de l'altitude.	157
		Des vents. — Des vents en général	157
		Vents réguliers.	158
		Vitesse des vents.	159

LIVRE III

ÉLECTRICITÉ ET MAGNÉTISME

CHAPITRE PREMIER

Développement et distribution de l'électricité. — Développement de l'électricité par le frottement. — Corps conducteurs et non conducteurs.	159
Distinction des deux électricités.	161
Deux corps frottés l'un contre l'autre acquièrent des électricités contraires.	161
Hypothèse des deux fluides. — Etat neutre.	162
Les actions électriques sont inversement proportionnelles aux carrés des distances.	162
L'électricité se porte à la surface des corps conducteurs.	163
Influence de la forme des corps conducteurs sur la distribution de l'électricité à leur surface.	163
L'électricité s'accumule vers les pointes	164
Développement d'électricité par influence. — Expérience fondamentale.	165
Attraction des corps légers par les corps électrisés.	166
Étincelle électrique. — Communication de l'électricité à distance.	166
Electroscope à feuilles d'or.	167
Machine électrique	168
Electrophore.	170
Carillon électrique. — Grêle électrique.	170
Électricité dissimulée ou condensée. — Condensateurs. — Principe de la condensation. — Condensateur à plateaux.	171
Électricité libre et électricité dissimulée.	172
Bouteille de Leyde.	173
Décharge successive d'un condensateur.	174

Décharge instantanée.	175
Dans un condensateur, les fluides développés résident sur les faces du corps isolant.	176
Batteries électriques.	176
Electromètre condensateur.	177
Effets des décharges électriques.	177
Électricité atmosphérique. — Etat électrique de l'atmosphère et des nuages.	180
Foudre. — Eclairs. — Tonnerre. Paratonnerre	182

CHAPITRE II

Magnétisme. — Attraction qui s'exerce entre l'aimant et le fer. — Substances magnétiques	184
Pôles des aimants.	184
Distinction des deux pôles, au moyen de l'action exercée par la terre sur un aimant	186
Actions réciproques des pôles de deux aimants	186
Hypothèse de l'aimant terrestre. Origine des dénominations de pôle austral et pôle boréal.	186
Hypothèse des deux fluides.	187
Aimantation par influence	187
Aimantation permanente de l'acier. — Force coercitive.	188
Expérience des aimants brisés.	188
Procédés d'aimantation. — Méthode de la simple touche.	189
Méthode de la touche séparée	189
Méthode de la double touche	190
Aimantation à saturation. — Influence de la trempe et de la température.	190
Armures et contacts des aimants.	191
Magnétisme terrestre. — Aiguille aimantée. — Définition de la déclinaison et de l'inclinaison	192

Boussoles	193
Variations de la déclinaison et de l'inclinaison, en un même lieu	194
Aimantation par l'action de la terre	195

CHAPITRE III

Galvanisme. — Pile de Volta. — Première expérience de Galvani	195
Expériences de Volta	196
Développement d'électricité par les actions chimiques	197
Pile de Volta	198
Actions chimiques produites dans la pile de Volta	199
Courant électrique. — Sens du courant	199
Modifications de la pile de Volta. — Pile à auge	200
Pile de Wollaston	201
Pile de Münch	202
Piles à deux liquides. — Piles à deux liquides, à courant constant	202
Pile de Daniell	202
Pile de Bunsen	203
Effets produits par les courants. — Effets calorifiques des courants	204
Effets lumineux. — Lumière électrique	205
Propriétés de l'arc voltaïque	205
Effets physiologiques des courants	206
Effets chimiques. — Décomposition de l'eau	206
Décomposition des combinaisons chimiques en général. — Corps électropositifs et électro-négatifs	207
Décomposition des oxydes et des composés binaires	207
Décomposition des sels oxygénés. Emploi d'une électrode positive soluble	209
Galvanoplastie. — Dorure, argenture et cuivrage galvaniques. — Galvanoplastie de cuivre	209
Dorure et argenture galvaniques. Appareil simple. — Réservoir galvanique	210

CHAPITRE IV

Actions des courants sur les aimants. — Galvanomètre. — Expérience d'Ersted	211
Loi d'Ampère	212
Application de la loi d'Ampère à la détermination du sens d'un courant	212
Construction du multiplicateur. Galvanomètre à deux aiguilles	213
Usage du galvanomètre. — Mesure des intensités des courants	215
Influence des résistances des divers conducteurs sur les intensités des courants	215
Actions des aimants sur les courants. — Action d'un aimant sur un courant mobile	216
Rotation d'un aimant sous l'action d'un courant	217
Actions des courants sur les courants. — Actions des courants parallèles	218
Actions des courants croisés	219
Deux portions consécutives d'un même courant rectiligne se repoussent	220
Action d'un courant sinueux, comparée à celle d'un courant rectiligne ayant les mêmes extrémités	220
Action de la terre sur les courants. — Action de la terre sur un courant fermé, mobile autour d'un axe vertical	221
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	221
Conducteurs astatiques	222
Solénoïdes. — Construction d'un solénoïde	223
Action de la terre sur un solénoïde	224
Action d'un courant rectiligne sur un solénoïde	224
Actions mutuelles de deux solénoïdes	225
Action d'un aimant sur un solé-	

noïde	225
Assimilation des aimants aux solénoïdes	225

CHAPITRE V

Aimantation par les courants. — Développement du magnétisme par les courants	226
Procédé d'aimantation de l'acier par les courants	226
Électro-aimants	227
Télégraphie électrique. — Parties essentielles d'un télégraphe électrique	228
Établissement de la ligne. — Suppression du fil de retour	229
Système de Morse	229
Modifications apportées au récepteur par MM. Digney frères.	231
Télégraphe à cadran	231

Télégraphie sous-marine. — Câbles sous-marins	234
Récepteur de M. Thomson	235

CHAPITRE VI

Courants d'induction. — Courants d'induction produits sous l'influence d'autres courants	236
Courants d'induction produits sous l'influence des aimants	237
Courants d'induction produits sous l'influence de la terre.	238
Machine de Clarke	238
Bobine d'induction de M. Ruhmkorff	240
Tubes de Geissler	242
Téléphones. — Téléphone de Bell	243
Combinaison du microphone et du téléphone.	244

LIVRE IV

ACOUSTIQUE

CHAPITRE PREMIER

Production et propagation du son. — Production du son	245
Le son ne se propage pas dans le vide	246
Propagation du son par les divers milieux.	246
Vitesse de transmission du son dans l'air	246
Vitesse du son dans les gaz, dans les liquides et dans les solides.	247
Intensité du son	248
Hauteur du son.	248
Sirène.	248
Des causes générales des différences de timbre.	250

CHAPITRE II

Gammes et intervalles musicaux. — Définition	251
Gamme	252
Dièses et bémols	253
Accord parfait	254
Nombres absolus de vibrations des notes employées en musique	254
Vibrations des cordes. — Vibrations transversales des cordes.	255
Sons harmoniques. — Nœuds et ventres	257
Vibrations longitudinales des cordes.	259

LIVRE V

OPTIQUE

CHAPITRE PREMIER

Propagation de la lumière. — Corps lumineux
--

— Corps transparents et corps opaques	259
Propagation rectiligne de la lumière dans un milieu homo-	

gène. 260
 Ombre. — Pénombre. 260
 Vitesse de la lumière. 261
Mesure des intensités relatives des lumières. —
 Intensités d'une même source à diverses distances 262
 Intensités relatives des sources lumineuses 262
 Méthode générale de comparaison des intensités propres des lumières, ou photométrie. . . 262
 Photomètre de Bouguer. 263
 Photomètre de Rumford 263
Réflexion par les surfaces planes. — Lois de la réflexion 264
 Images fournies par un miroir plan. 265
 Images multiples, fournies par des miroirs parallèles ou inclinés 266
Miroirs sphériques. — Définitions. 267
 Foyer principal d'un miroir sphérique concave 267
 Foyer d'un point situé sur l'axe principal 268
 Image d'un objet placé devant un miroir sphérique concave. 270
 Foyers des points placés sur l'axe principal d'un miroir sphérique convexe. 272
 Images formées par un miroir sphérique convexe 273

CHAPITRE II

Réfraction de la lumière.
 — Lois de la réfraction. 264
 Indices de réfraction. 276
 Principe du retour inverse des rayons 276
 Angle limite. — Réflexion totale. 277
 Applications des principes de la réfraction. — Déplacement apparent des objets vus dans l'eau. 278
 Réfractions atmosphériques. . . 278
 Mirage 279
Effets produits par les lentilles. — Réfraction des rayons de lentilles sphériques 279

Foyer principal d'une lentille convergente. 280
 Foyer d'un point situé sur l'axe principal 281
 Image d'un objet. — Centre optique, axes secondaires. . . 282
 Foyers dans les lentilles divergentes. 284
 Images formées par les lentilles divergentes 285
Effets produits par les prismes. — **Décomposition et recombinaison de la lumière.** — Définitions. 285
 Action d'un prisme sur un faisceau de lumière parallèle . . 286
 Déviation. — Déviation minimum. 286
 Épanouissement et coloration du faisceau émergent. — Décomposition de la lumière blanche 287
 Explication de la formation du spectre 288
 Inégale réfrangibilité des rayons qui forment la lumière blanche 288
 Recombinaison de la lumière blanche 289
 Couleurs des corps éclairés par la lumière blanche. 290
 Rayons calorifiques **et rayons** chimiques. 291
 Spectres fournis par les lumières artificielles 291
 Analyse spectrale 292
 Raies du spectre solaire 293
 Théorie de la production de ces raies, d'après M. Kirchhoff . . 293

CHAPITRE III

Instruments d'optique. — Classification des instruments d'optique 294
Instruments donnant une image réelle sur un écran. — Chambre noire pour la photographie 295
 Microscope solaire 297
 Lanterne magique 298
Instruments à oculaires, ou à double image virtuelle. — Loupe. 298

Microscope composé	299	que. — Fixation de l'axe op-	
Usage de la chambre claire		tique	305
détermination du grossisse-		Lunette terrestre.	304
ment d'un microscope	301	Lunette de Galilée	304
Lunette astronomique	302	Télescope de Newton	306
Réticule de la lunette astronomi-			