

TRAITÉ ÉLÉMENTAIRE

DE

PHYSIQUE

PROPRIÉTÉ DE



DU MÊME AUTEUR

Cours élémentaire de physique, rédigé conformément aux plus récents programmes du baccalauréat ès lettres. In-8° cavalier de 539 pages avec 622 figures. 2^e édition. Broché..... 6 fr.
Relié toile pleine 7 fr.

Solutions raisonnées des problèmes du Traité élémentaire de Physique. (*Sous presse.*)

ALLIANCE DES MAISONS D'ÉDUCATION CHRÉTIENNE

TRAITÉ ÉLÉMENTAIRE
DE
PHYSIQUE

RÉDIGÉ CONFORMÉMENT AUX PLUS RÉCENTS PROGRAMMES
DES BACCALAURÉATS ÈS SCIENCES (CLASSIQUE ET MODERNE)

PAR

ÉDOUARD BRANLY

AGRÉGÉ DE L'UNIVERSITÉ, DOCTEUR ÈS SCIENCES
ANCIEN DIRECTEUR-ADJOINT DU LABORATOIRE D'ENSEIGNEMENT DE PHYSIQUE A LA SORBONNE
PROFESSEUR DE PHYSIQUE A L'INSTITUT CATHOLIQUE DE PARIS

DEUXIÈME ÉDITION



PARIS
LIBRAIRIE CH. POUSSIELGUE

RUE CASSETTE, 15

1900

Droits de reproduction et de traduction réservés.

est la relation entre l'espace parcouru et le temps employé à le parcourir. C'est l'*équation du mouvement*.

L'espace parcouru est proportionnel au temps : la vitesse est le rapport constant de la longueur parcourue au temps employé à la parcourir. e étant exprimé en centimètres et t en secondes, v représente un certain nombre de centimètres par seconde. Les mouvements uniformes se distinguent les uns des autres par leurs vitesses.

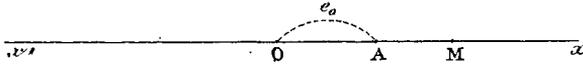


Fig. 2.

Lorsque, à l'origine du temps, le mobile a déjà parcouru un espace OA ou e_0 (fig. 2), si l'espace e_0 a été parcouru dans le sens du mouvement actuel, l'espace OM parcouru au temps t est donné par l'équation

$$e = e_0 + vt$$

la vitesse est $v = \frac{e - e_0}{t}$.

Les espaces sont comptés positivement dans le sens Ox, négativement dans le sens Ox'.

Si, à partir de l'origine du temps, l'espace est parcouru dans le sens Ox', tandis que e_0 a été parcouru dans le sens Ox, l'équation du mouvement sera

$$e = e_0 - vt.$$

2. Mouvement circulaire uniforme. — Dans ce mouvement, les arcs parcourus sont proportionnels aux temps employés à les parcourir. Sur une circonférence de centre O et de rayon R, la vitesse v est l'arc AB parcouru en une seconde (fig. 3). On nomme *vitesse angulaire* l'arc $\omega = ab$ intercepté par les deux rayons OA et OB sur la circonférence de centre O qui a l'unité pour rayon.

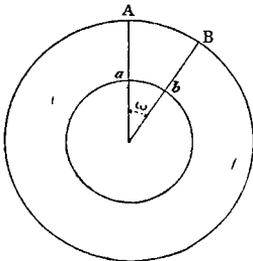


Fig. 3.

$$\frac{AB}{ab} = \frac{R}{1}$$

$$\text{d'où } AB = v = \omega R.$$

Si nous désignons par T la durée de la révolution du mobile, l'arc

parcouru sur la circonférence de rayon R pendant une révolution est $2\pi R$, l'arc AB parcouru en une seconde est $\frac{2\pi R}{T}$; $\omega = \frac{2\pi}{T}$.

MOUVEMENT VARIÉ

3. Tout mouvement dans lequel le mobile parcourt des espaces inégaux dans des temps égaux est dit *varié*.

Définition de la vitesse. — Soit M la position du mobile au temps t , M_1 au temps $t + \theta$, $MM_1 = \varepsilon$ (fig. 4).

$\frac{MM_1}{\theta} = \frac{\varepsilon}{\theta}$ se nomme la *vitesse moyenne* du mobile pendant le temps θ , c'est la vitesse d'un mobile qui se trouverait en même temps

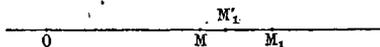


Fig. 4.

que le mobile vrai en M et en M_1 et qui parcourrait d'un mouvement uniforme l'intervalle MM_1 . *Ce mobile fictif s'écartera d'autant moins du mobile vrai* que le temps θ sera plus court.

Un espace $MM'_1 = \varepsilon'$, inférieur à ε sera parcouru dans un temps θ' , inférieur à θ ; $\frac{\varepsilon'}{\theta'}$ sera la vitesse moyenne pendant le temps θ' .

Lorsque les espaces ε , ε' considérés à partir de M vont en décroissant, il en est de même de θ et de θ' ; les quotients $\frac{\varepsilon}{\theta}$, $\frac{\varepsilon'}{\theta'}$ diffèrent de moins en moins à mesure que ε et θ diminuent. Lorsque ε et θ tendent vers zéro, $\frac{\varepsilon}{\theta}$ tend vers une limite déterminée : c'est cette limite qu'on appelle *vitesse du mobile à l'instant t* .

Lorsque l'espace est exprimé en fonction du temps par une relation $e = f(t)$, la vitesse est la limite vers laquelle tend le rapport de l'accroissement de l'espace e à l'accroissement de la variable t , lorsque l'accroissement de la variable tend vers zéro; cette limite se nomme la *dérivée* de e par rapport à t .

4. **Mouvement rectiligne uniformément varié.** — Si la vitesse ainsi définie varie de quantités égales dans des temps égaux, quels que soient ces temps, le mouvement est dit *uniformément*

varié : la variation γ de la vitesse par seconde est appelée **accélération**.

5. Mouvement uniformément accéléré. — Le mouvement est dit uniformément accéléré si la vitesse croît proportionnellement au temps. v_0 désignant la vitesse au temps zéro, la vitesse sera $v_0 + \gamma$ après une seconde, $v_0 + \gamma t$ après t secondes.

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

est la relation entre la vitesse et le temps.

De cette *loi des vitesses* nous pouvons déduire la *loi des espaces* ou l'espace parcouru par le mobile depuis le temps zéro jusqu'au temps t .

Loi des espaces déduite de la loi des vitesses. — Partageons le temps t en n intervalles égaux à $\frac{t}{n}$, l'accroissement de vitesse pendant un intervalle $\frac{t}{n}$ est $\gamma \frac{t}{n}$; les vitesses au début des intervalles successifs sont :

$$v_0, v_0 + \gamma \frac{t}{n}, v_0 + 2\gamma \frac{t}{n}, \dots, v_0 + (n-1)\gamma \frac{t}{n},$$

si nous supposons que pendant chacun de ces intervalles le mobile conserve la vitesse du début de l'intervalle, les espaces parcourus seront

$$v_0 \frac{t}{n}, \left(v_0 + \gamma \frac{t}{n}\right) \frac{t}{n}, \left(v_0 + 2\gamma \frac{t}{n}\right) \frac{t}{n} \dots \left(v_0 + (n-1)\gamma \frac{t}{n}\right) \frac{t}{n},$$

et l'espace total

$$\begin{aligned} v_0 t + \frac{\gamma t^2}{n^2} (1 + 2 + \dots + (n-1)) &= v_0 t + \frac{\gamma t^2}{n^2} \cdot \frac{(n-1)n}{2} \\ &= v_0 t + \frac{\gamma t^2}{2} - \frac{\gamma t^2}{2n} \end{aligned}$$

sera inférieur à l'espace réellement parcouru, puisque les vitesses attribuées au mobile sont inférieures aux vitesses réelles.

Les vitesses à la fin des intervalles sont

$$v_0 + \gamma \frac{t}{n}, v_0 + 2\gamma \frac{t}{n}, \dots, v_0 + n\gamma \frac{t}{n}.$$

Supposons que pendant chacun des intervalles le mobile possède la vitesse de la fin de l'intervalle, les espaces parcourus seront :

$$\left(v_0 + \gamma \frac{t}{n}\right) \frac{t}{n}, \left(v_0 + 2\gamma \frac{t}{n}\right) \frac{t}{n}, \dots, \left(v_0 + n\gamma \frac{t}{n}\right) \frac{t}{n};$$

l'espace total obtenu

$$v_0 t + \frac{\gamma t^2}{n^2} (1 + 2 + \dots + n) = v_0 t + \frac{\gamma t^2}{n^2} \cdot \frac{n(n+1)}{2} = v_0 t + \frac{\gamma t^2}{2} + \frac{\gamma t^2}{2n}$$

sera supérieur à l'espace réellement parcouru, puisque les vitesses supposées sont supérieures aux vitesses réelles.

Si le nombre n des intervalles croît indéfiniment, la durée de chacun d'eux décroît indéfiniment, les vitesses du début et de la fin d'un intervalle diffèrent de moins en moins de la vitesse réelle pendant cet intervalle; $\frac{\gamma t^2}{2n}$ décroît indéfiniment et les deux sommes, l'une inférieure, l'autre supérieure à l'espace parcouru, tendent vers la même limite qui est l'espace réellement parcouru.)

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

est la *loi des espaces* correspondant à la *loi des vitesses* $v = v_0 + \gamma t$.

Si l'espace parcouru à l'origine du temps est e_0 , e_0 ayant été parcouru dans le sens du mouvement, la relation devient

$$e = e_0 + v_0 t + \frac{\gamma t^2}{2}, \quad (2)$$

Lorsque $e_0 = 0$ et $v_0 = 0$, la vitesse et l'espace sont exprimés par $v = \gamma t$ $e = \frac{\gamma t^2}{2}$ (chute d'un corps qui part du repos sans vitesse initiale).

Pour obtenir la vitesse au moment où l'espace parcouru par le mobile est e , éliminons t entre les équations (1) et (2), on trouve

$$v^2 - v_0^2 = 2\gamma (e - e_0) \quad (1)$$

$$\text{et si } v_0 = 0 \text{ et } e_0 = 0$$

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

(1) Ce résultat s'obtient en substituant à t dans l'équation (2) sa valeur tirée de l'équation (1). On y arrive rapidement en écrivant :

$$\begin{aligned} v^2 &= (v_0 + \gamma t)^2 = v_0^2 + 2v_0\gamma t + \gamma^2 t^2 \\ &= v_0^2 + 2\gamma \left(v_0 t + \frac{1}{2} \gamma t^2 \right) = v_0^2 + 2\gamma (e - e_0). \end{aligned}$$

Loi des vitesses déduite de la loi des espaces. -- Nous avons pu déduire la loi des espaces de la loi des vitesses; inversement, de la loi des espaces on peut passer à la loi des vitesses, d'après la définition de la vitesse.

Aux temps t et $t + \theta$, les espaces parcourus sont :

$$e = e_0 + v_0 t + \frac{1}{2} \gamma t^2,$$

$$e' = e + \varepsilon = e_0 + v_0 (t + \theta) + \frac{1}{2} \gamma (t + \theta)^2;$$

en retranchant, $\varepsilon = v_0 \theta + \gamma t \theta + \frac{1}{2} \gamma \theta^2$

$$\frac{\varepsilon}{\theta} = v_0 + \gamma t + \frac{1}{2} \gamma \theta.$$

Lorsque θ décroît indéfiniment, ε et θ tendent tous deux vers zéro, mais le rapport $\frac{\varepsilon}{\theta}$ tend vers une limite qui est la vitesse à l'instant t .

$$v = \text{Lim.} \frac{\varepsilon}{\theta} = v_0 + \gamma t.$$

On voit par ce qui précède que la loi des espaces et la loi des vitesses ne sont pas deux lois distinctes, puisque l'une peut être déduite de l'autre. Une de ces deux lois suffit donc pour caractériser le mouvement.

6. Mouvement uniformément retardé. — Le mouvement est appelé *uniformément retardé* si la vitesse décroît proportionnellement au temps.

Désignons par v_0 la vitesse initiale, $v_0 - \gamma$ sera la vitesse après une seconde, $v_0 - 2\gamma$ après deux secondes, $v_0 - \gamma t$ après t secondes,

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

En partageant le temps t en n intervalles égaux et en procédant comme plus haut, on déduit de la loi des vitesses la loi des espaces

$$e = e_0 + v_0 t - \frac{\gamma t^2}{2}.$$

Inversement, de la loi des espaces, on passera à la loi des vitesses. La formule unique $v = v_0 + \gamma t$ est l'équation générale de la vitesse d'un mouvement uniformément varié, à la condition de regarder γ

comme positif quand les vitesses successives s'ajoutent à la vitesse initiale et comme négatif quand elles s'en retranchent.

7. Mouvement périodique. — Parmi les mouvements variés, le mouvement périodique est un de ceux que l'on rencontre le plus souvent en physique.

On appelle ainsi le mouvement d'un mobile M qui décrit une trajectoire fixe (fig. 5) et repasse par la même position à des intervalles de temps égaux. Le mouvement de la terre autour du soleil est un mouvement périodique. Lorsque la trajectoire se compose de deux portions de courbe repliées l'une sur l'autre, l'aller et le retour ayant lieu sur le même arc de courbe (fig. 6 et 7, segment de droite ou arc de cercle), de A en A' et de A' en A, le mouvement est dit **oscillatoire**.

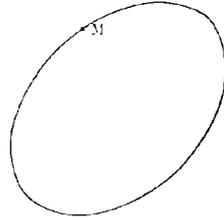


Fig. 5.

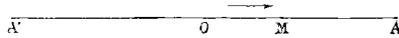


Fig. 6.

Le mouvement du pendule d'une horloge, le mouvement du piston dans le cylindre d'une machine à vapeur, sont des mouvements oscillatoires.



Fig. 7.

La durée de la période est le temps qui sépare deux passages consécutifs du mobile au même point M et dans le même sens.

L'amplitude du mouvement est la distance qui sépare sur la trajectoire deux positions extrêmes consécutives A et A' du mobile.

8. Représentation graphique d'un mouvement. — Les particularités du mouvement d'un mobile peuvent être représentées par une construction graphique. Sur une droite horizontale appelée ligne des **abscisses**, on porte une succession de longueurs égales figurant des temps égaux. A chacun des points de division, on élève une perpendiculaire ou **ordonnée** sur laquelle on prend une longueur proportionnelle à l'espace parcouru au temps correspondant. La courbe

obtenue en réunissant par un trait continu les extrémités des ordonnées caractérisé le mouvement considéré.

Un mouvement *uniforme*, c'est-à-dire un mouvement où les espaces

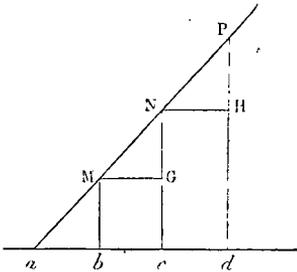


Fig. 8.

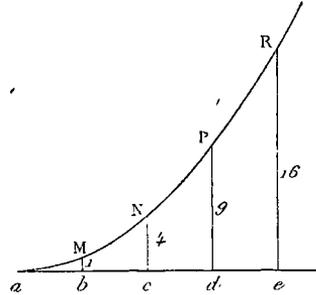


Fig. 9.

NG, PH... parcourus en des temps égaux bc , cd ... sont égaux est représenté par une ligne droite MP (fig. 8).

Pour un mouvement *uniformément accéléré* où l'espace est exprimé en fonction du temps par $e = \frac{1}{2}gt^2$, les ordonnées aux temps 1, 2, 3, 4, seront $e_1 = \frac{1}{2}g$, $4e_1$, $9e_1$, $16e_1$ (fig. 9). La courbe représentative est une parabole.

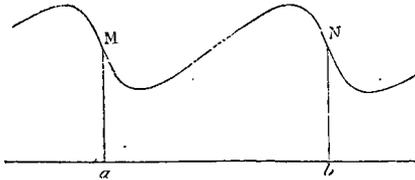


Fig. 10.

Dans le cas d'un mouvement *périodique* (7), la courbe se reproduit à des intervalles de temps égaux, le temps ab qui sépare deux ordonnées égales Ma Nb semblablement placées sur la courbe est égal à la *période* (fig. 10).

MOUVEMENT D'UN SYSTÈME MATÉRIEL

9. Nous avons étudié le mouvement d'un point matériel; le mouvement d'un système de points matériels résulte du mouvement des différents points.

Le système a un *mouvement d'ensemble* si ses différents points se maintiennent aux mêmes distances pendant leur mouvement.

Dans ce cas, lorsque tous les points du corps possèdent au même instant des vitesses égales et parallèles, le mouvement est appelé

mouvement de translation (mouvement d'un corps solide qui tombe); la vitesse commune à tous les points est la vitesse du mouvement de translation.

Si chaque point du corps reste dans son mouvement à la même distance d'un axe fixe, ou décrit une circonférence dont le plan est perpendiculaire à l'axe, le mouvement est appelé *mouvement de rotation* (mouvement d'un fléau de balance), la vitesse angulaire est la vitesse d'un point situé à l'unité de distance de l'axe de rotation.

FORCES

10. Forces. — Un point matériel ne peut modifier de lui-même son état de repos ou de mouvement (30). Toute cause qui engendre ou modifie le mouvement est appelée *force*.

La pesanteur est une force puisqu'elle fait tomber les corps à la surface de la terre; l'effort qu'un être animé exerce sur un corps pour le pousser ou le tirer est une force; une attraction électrique ou magnétique est une force.

Il y a à considérer dans une force : 1° la position du point sur lequel la force agit directement ou le *point d'application*; 2° la *direction* ou la droite que suit le point auquel la force est appliquée s'il cède à l'action de cette force; 3° l'*intensité* ou l'effort exercé par la force.

Forces égales. — Si deux forces appliquées au même point d'un corps en repos peuvent lui donner le même mouvement, on dit que leurs *intensités sont égales*. Deux forces égales pour un effet déterminé sont encore égales pour un autre effet quelconque.

Forces en équilibre. — On dit que des forces se neutralisent ou *se font équilibre* quand on peut les supprimer sans que le mouvement du corps auquel elles sont appliquées simultanément soit changé.

On constate que deux forces égales, appliquées au même point et directement opposées se font équilibre. L'observation montre aussi que deux forces égales et de sens contraires, agissant en des points différents d'un corps solide, mais suivant la même droite se font encore équilibre.

11. Représentation d'une force. — On représente une force en menant par son point d'application A une ligne droite ayant la direc-



Fig. 11.

tion de la force et dont la longueur AF est proportionnelle au nombre d'unités de force qui produisent le même effet (fig. 11).

12. Transport d'une force en un point de sa direction. — Une force F appliquée en un point A d'un corps peut être transportée en un point quelconque B de sa direction, invariablement lié au point A, sans que l'effet soit changé.

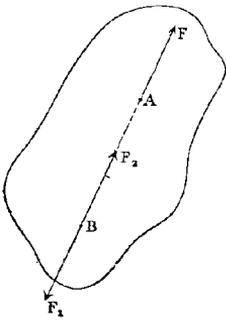


Fig. 12.

Appliquons en effet au point B deux forces F_1 et F_2 égales à F et de sens opposés, rien ne sera modifié; mais comme les forces égales et contraires appliquées en A et en B se neutralisent, on peut les supprimer, et il ne reste qu'une force F_2 appliquée en B, égale à la force appliquée en A et de même sens (fig. 12).

13. Mesure des forces. — On compare les forces entre elles à l'aide d'appareils appelés **dynamomètres**. Un dynamomètre est un

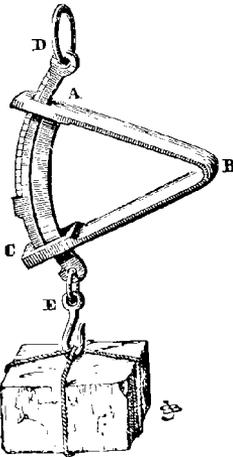


Fig. 13.

ressort en acier fixé à l'une de ses extrémités; à l'autre extrémité on fait agir une force. Le ressort se déforme. La déformation croît avec l'effort exercé par la force. Deux forces égales produisent la même déformation.

On *mesure* une force en la comparant à une force déterminée choisie pour unité. Toute force qui produira sur un dynamomètre la même déformation que n unités de force agissant ensemble est dite une force de n unités.

Peson. — Comme exemple de dynamomètre nous décrirons le *peson* (fig. 13). C'est une lame d'acier flexible recourbée en forme de V, dont chacune des branches porte à l'une de ses extrémités un arc de cercle métallique qui traverse librement l'autre branche;

l'arc CD, fixé en C à la branche inférieure, est terminé par un anneau D qui sert à suspendre le dynamomètre. L'arc AE, fixé en A à la branche supérieure porte en E un crochet auquel on applique la force. Les deux branches du ressort se rapprochent plus ou moins suivant l'effort exercé en E sur l'arc métallique AE. L'arc métallique CD dépasse la branche BA et le rapprochement des deux branches se mesure sur une division que porte l'arc CD. L'instrument étant fixé en D, on le gradue en appliquant successivement en E des forces égales à 1, 2, 3, ... n unités de force et en marquant au point où s'arrête la branche BA, le nombre d'unités de force supportées. Si l'on applique ensuite au crochet une force à mesurer, la division à laquelle s'arrête le bord de la branche BA fait connaître le nombre d'unités de force équivalant à la force.

COMPOSITION DES FORCES

14. Résultante et composantes. — On appelle *résultante* de plusieurs forces agissant simultanément une force unique, de grandeur déterminée, susceptible de produire seule le même effet que l'ensemble des forces données; celles-ci sont appelées *composantes*.

Plusieurs forces appliquées à un corps ne peuvent être remplacées par une force unique que dans certains cas particuliers.

15. COMPOSITION DES FORCES APPLIQUÉES EN UN POINT. — Des forces appliquées en un même point ont une résultante. En effet, ces forces, quelles qu'elles soient, ne peuvent imprimer à ce point qu'un mouvement dans une direction déterminée; une force unique est donc capable de produire le même effet.

16. Composition de deux forces agissant suivant une même droite. — Deux forces dirigées dans le même sens ont une résultante de même sens égale à leur somme. Deux forces dirigées en sens contraires ont une résultante égale à leur différence et ayant le sens de la plus grande des deux forces. Par conséquent la résultante de plusieurs forces qui agissent suivant une même droite est égale à la somme algébrique de ces forces.

17. Composition de deux forces concourantes. — **Parallélogramme des forces.** — On démontre que deux forces, F et F', de

directions différentes ont une résultante R représentée en grandeur, en direction et en sens par la diagonale AD du parallélogramme construit sur les droites AB et AC représentatives des forces (fig. 14).

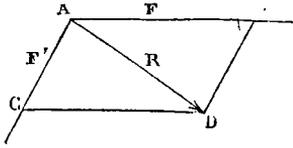


Fig. 14.

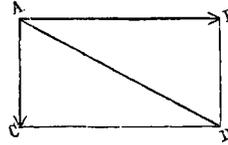


Fig. 15.

Si les deux composantes sont rectangulaires, le parallélogramme devient un rectangle (fig. 15).

On peut exprimer la règle de la composition de deux forces concourantes en disant que les deux forces et leur résultante forment un *triangle*. On construit ce triangle en menant par A l'une des forces F , puis par l'extrémité B une droite BD égale, parallèle à la force F' et de même sens; enfin on joint au point A l'extrémité D . Une résultante R est toujours inférieure à la somme $F + F'$. Si les forces sont rectangulaires $R^2 = F^2 + F'^2$ (fig. 15).

18. Composition de plusieurs forces concourantes. — Soient F, F_1, F_2, F_3 les forces à composer. On mène à l'extrémité de F une parallèle égale à F_1 et de même sens, on joint R_1 et A ; AR_1 est la résultante de F et de F_1 . On compose AR_1 et F_2 en menant par R_1 une parallèle égale à F_2 et de même sens, on joint R_2 et A ; AR_2 est la résultante de AR_1 et F_2 , ou de F, F_1 et F_2 . On compose AR_2 et $F_3 \dots$ (fig. 16).

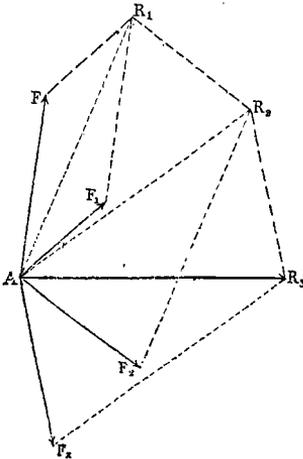


Fig. 16.

Polygone des forces. — Les résultantes intermédiaires AR_1, AR_2, \dots pouvant être supprimées, la construction revient à placer bout à bout les droites qui représentent en grandeur et en direction les forces données, transportées parallèlement à elles-mêmes; la résultante est en grandeur et en direction la droite AR qui ferme la ligne brisée en joignant

au point de départ A l'extrémité R de la dernière parallèle (AR_3 sur la fig. 16).

Le polygone $AFR_1R_2R_3$ s'appelle le *polygone des forces*. C'est un polygone *plan* si les forces sont dans un même plan, sinon c'est un polygone *gauche*. La résultante ne dépend pas de l'ordre dans lequel la composition est faite.

Cas de trois forces. — Pour trois forces AF , AF_1 , AF_2 qui ne sont pas dans un même plan, la résultante AR est la diagonale du paral-

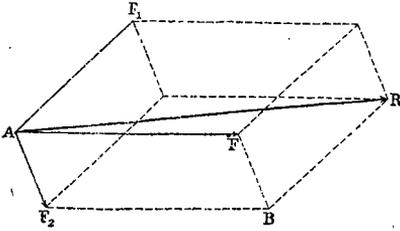


Fig. 17.

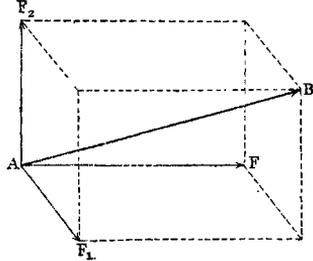


Fig. 18.

lélépipède dont les trois forces sont les trois arêtes (fig. 17). Ce parallélépipède est rectangle si les trois forces concourantes sont deux à deux rectangulaires. Dans ce cas $R^2 = F^2 + F_1^2 + F_2^2$ (fig. 18).

19. Conditions d'équilibre. — Pour que des forces concourantes se fassent équilibre, il faut que leur résultante soit nulle ou que le polygone construit en portant bout à bout les droites représentatives des forces soit fermé. L'une quelconque des forces RA est alors égale et directement opposée à la résultante AR des autres forces.

S'il n'y a que deux forces, la résultante ne peut être nulle que si les deux forces sont égales et contraires, car il faut qu'en appliquant la règle du polygone on parte de A et on revienne en A .

20. Décomposition d'une force. — On peut remplacer une force donnée par plusieurs autres appliquées au même point et produisant le même effet, car si la force AD peut être substituée aux deux forces AB et AC (fig. 14), inversement deux forces telles que AB et AC peuvent remplacer AD .

Tandis qu'à deux forces données il ne correspond qu'une résultante, la décomposition d'une force AD en deux autres peut se faire d'une infinité de façons. Il suffit en effet que les deux composantes puissent former un triangle avec AD .

Si l'on fixe les grandeurs des deux composantes, on aura à cons-

truire un triangle dont les trois côtés sont connus. On pourra fixer la grandeur et la direction d'une composante, ou construire un triangle en connaissant deux côtés et l'angle compris. Lorsque la direction des deux composantes sera donnée, le problème reviendra à la construction d'un triangle dont on connaît un côté et les deux angles adjacents.

Chaque composante peut se décomposer à son tour.

Il est utile de décomposer une force dont l'effet ne peut s'exercer que dans une direction déterminée.

21. COMPOSITION DES FORCES PARALLÈLES. — Des forces parallèles, appliquées en divers points d'un corps solide, admettent en général une résultante.

22. Composition de deux forces parallèles de même sens.

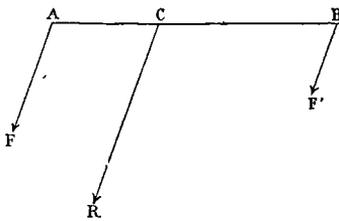


Fig. 19.

— On démontre que deux forces parallèles F et F' , appliquées en deux points A et B d'un corps, ont une résultante R égale à leur somme, de même direction et de même sens, appliquée entre A et B en un point C qui partage AB en deux segments *inversement proportionnels aux intensités des forces* (fig. 19).

$$R = F + F'$$

$$\frac{AB}{BC} = \frac{F'}{F}$$

$$\text{ou } AC \times F = BC \times F'$$

Si les deux forces sont égales, le point C sera au milieu de AB ; si la force F est double de F' le segment CA sera moitié de CB .

23. Composition de deux forces parallèles de sens contraires. — Les deux forces F et F' ont une résultante qui leur est parallèle, est égale à leur différence et de même sens que la plus grande.

Son point d'application est situé sur le prolongement de AB , du côté de la plus grande en un point C tel que les distances CA et CB

soient *inversement proportionnelles aux intensités des forces F et F'* (fig. 20).

$$R = F - F'$$

$$\frac{AC}{BC} = \frac{F'}{F}$$

ou $AC \times F = BC \times F'$,

de là $\frac{AC}{BC - AC} = \frac{F'}{F - F'}$

ou $AB = AC \cdot \frac{F'}{F - F'}$

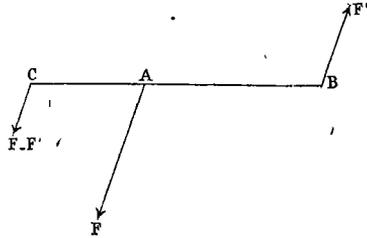


Fig. 20.

24. Couple. — Si les deux forces F et F' diffèrent très peu l'une de l'autre, la résultante $F - F'$ est très petite et son point d'application s'éloigne beaucoup sur le prolongement de AB. Dans le cas particulier de deux forces égales, la règle est inapplicable.

Un système de deux forces égales, parallèles, dirigées en sens contraires et appliquées en deux points différents d'un corps, porte le nom de *couple* (fig. 21). Le plan des deux forces est le plan du couple.

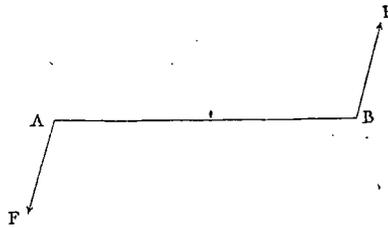


Fig. 21.

On démontre qu'un couple ne peut pas être remplacé par une force unique; il ne tend donc pas à entraîner le corps, il tend à le faire tourner jusqu'à ce que la ligne AB qui joint les points d'application ait pris la direction des deux forces; alors les deux forces se font équilibre.

25. Composition de plusieurs forces parallèles de même sens. — En composant d'abord deux forces F et F₁, on obtient une première résultante partielle R₁; celle-ci composée avec une force F₂ conduit à une résultante R... (fig. 22).

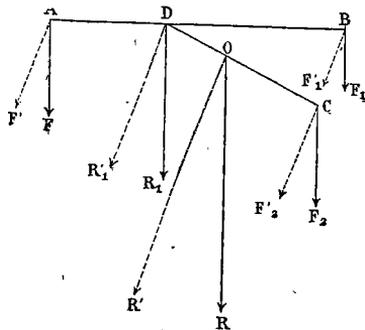


Fig. 22.

La résultante générale est toujours égale à la somme de toutes les

forces parallèles. Son point d'application O s'appelle **centre des forces parallèles**.

Nous avons vu que le point C d'application de la résultante de deux forces parallèles est donné par la proportion

$$\frac{AB}{BC} = \frac{F'}{F}$$

la position de ce point ne dépend ni de la direction des forces ni de leur valeur absolue, pourvu que le rapport de leurs intensités ne varie pas.

Les points d'application des résultantes successives jouissent de la même propriété et par conséquent aussi le point d'application de la résultante générale. *La position du centre des forces parallèles reste donc la même quand on fait varier la direction commune des forces (F en F' , etc... fig. 22) et quand on altère toutes les forces dans un même rapport.*

26. Composition de forces parallèles quelconques. —

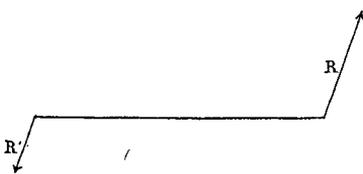


Fig. 23.

Si les forces parallèles sont dirigées les unes dans un sens, les autres en sens contraire, on composera d'abord les premières qui donneront une résultante R ; les autres composées à part conduiront à une résultante R' ; on composera enfin les deux résultantes de sens contraires R et R' (fig. 23).

27. Décomposition d'une force en forces parallèles. — Une force peut être décomposée d'une infinité de façons en composantes parallèles. Cela résulte des propositions précédentes.

28. Propositions relatives aux couples. — On appelle **bras de levier** d'un couple la longueur de la perpendiculaire commune aux deux forces. Le **moment** d'un couple est le produit de l'intensité de l'une des forces par la longueur du bras de levier. L'effet dû à un couple se mesure par son moment.

On démontre les deux théorèmes suivants :

1° Un couple appliqué à un corps peut être remplacé par un autre couple de même sens de rotation, situé dans le même plan ou dans

un plan parallèle, pourvu que le moment des deux couples soit le même.

Il résulte de là que deux couples situés dans un même plan ou dans des plans parallèles, se font équilibre s'ils ont des moments égaux et de sens contraires.

Un couple est donc déterminé par le plan de ses deux forces parallèles, par son moment et par le sens de la rotation qu'il tend à imprimer au corps auquel il est appliqué.

2° Plusieurs couples situés dans le même plan ou dans des plans différents et appliqués à un même corps peuvent être remplacés par un couple unique qu'on appelle **couple résultant**.

RÉDUCTION DES FORCES APPLIQUÉES A UN CORPS SOLIDE

29. Plusieurs forces de directions quelconques F, F', F'', \dots appliquées en différents points A, B, C, \dots d'un corps, peuvent être remplacées par **un couple et une force** qui n'est pas située en général dans le plan du couple.

Pour le démontrer, choisissons arbitrairement un point M du corps, appliquons-y deux forces contraires et égales à F : rien n'est changé puisque ces deux forces se font équilibre. Nous substituons ainsi à la force F appliquée en A une force égale et parallèle transportée en M , et un couple dont l'une des forces est en A et l'autre en M (fig. 24).

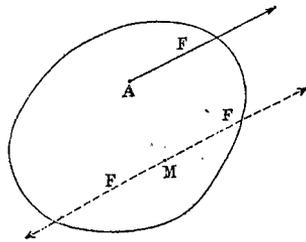


Fig. 24.

En procédant ainsi successivement pour chacune des forces, nous leur substituons en définitive d'une part des couples en nombre égal à celui des forces et d'autre part les forces elles-mêmes transportées parallèlement en M .

Les couples peuvent être remplacés par un couple résultant unique (28); d'autre part, les forces appliquées en M ont une résultante appliquée au même point M . *Toutes les forces appliquées au corps peuvent donc être remplacées par une force et un couple.* Comme un couple ne peut être remplacé par une force (24), le système de forces appliquées au corps ne peut laisser le corps en équilibre que si la *force* résultante et le *couple* résultant sont séparément nuls.

Ce n'est que dans des cas particuliers que les forces peuvent être

remplacées par une force unique. Nous avons vu que des forces concourantes avaient toujours une résultante unique et qu'il en était de même pour des forces parallèles, sauf dans le cas spécial où celles-ci se réduisent à des forces égales, parallèles, appliquées en deux points différents et formant un couple.

PRINCIPES DE LA MÉCANIQUE

On se propose en mécanique de trouver le mouvement d'un corps quand on connaît les forces qui lui sont appliquées ou de déterminer les forces quand on connaît le mouvement. La solution de ces problèmes est fondée sur plusieurs principes *déduits de l'expérience*.

30. PRINCIPE DE L'INERTIE. — *Un point matériel ne peut de lui-même modifier son état de repos ou de mouvement: il demeure indéfiniment en repos s'il est en repos; s'il se meut, il continue à se mouvoir d'un mouvement rectiligne et uniforme. Pour que l'état de repos ou de mouvement d'un point vienne à être modifié, une action extérieure est nécessaire. Cette action s'appelle une force (10). Si un point matériel est en repos ou en mouvement uniforme, les forces qui agissent sur lui se font équilibre.*

L'inertie dans le repos s'observe aisément. Une bille posée sur un plan horizontal reste en repos. Quant à l'inertie dans le mouvement, un examen attentif des phénomènes la fait concevoir. Une bille lancée sur un plan horizontal prend un mouvement rectiligne. Ce mouvement serait uniforme si le frottement sur le plan ne diminuait progressivement la vitesse jusqu'à l'annuler. Le mouvement se continue d'autant plus longtemps et est d'autant plus voisin d'être uniforme que la bille et le plan sont mieux polis. On admet que le mouvement persisterait indéfiniment sans se modifier si le frottement sur le plan et la résistance de l'air étaient nuls.

31. PRINCIPE DE L'INDÉPENDANCE DE L'EFFET D'UNE FORCE ET DU MOUVEMENT ANTÉRIEUREMENT ACQUIS. — *La vitesse imprimée par une force à un point matériel est la même, que ce point parte du repos ou qu'il soit déjà en mouvement.*

C'est un principe expérimental. Prenons un exemple : un corps qu'on laisse tomber dans l'intérieur d'un wagon en mouvement est animé au moment de sa chute de la vitesse de translation du wagon, il garde cette vitesse à tous les instants de sa chute et vient rencontrer le plancher au même point que si le wagon était au repos; d'autre part, la vitesse du mouvement vertical de chute est la même que si le corps n'avait pas eu de mouvement de translation.

En particulier, si nous considérons plusieurs forces agissant *successivement* dans une même direction sur un point matériel, les vitesses qu'elles lui impriment séparément s'ajouteront.

32. Mouvement produit par une force constante. — Une force constante engendre un mouvement uniformément varié.

Soit un mobile A animé d'une vitesse v_0 dans une direction AX (fig. 25); d'après le principe de l'inertie, le mobile devrait conserver cette vitesse; mais si nous faisons agir sur lui dans la même direc-

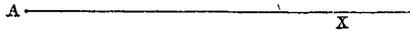


Fig. 25.

tion une force constante, cette force lui imprimera en une seconde une vitesse γ qui sera la même que si le mobile était au repos et s'ajoutera à la vitesse v_0 . Si la force cessait d'agir, le mobile conserverait la vitesse $v_0 + \gamma$, mais si la force continue son action pendant la seconde suivante, elle communiquera encore au mobile une vitesse γ et la vitesse deviendra $v_0 + 2\gamma$. Après t secondes, la vitesse sera devenue $v_0 + \gamma t$; le mouvement sera donc uniformément varié (5).

Réciproquement, un mobile animé d'un mouvement rectiligne uniformément varié est sollicité par une force constante dont la direction est celle du mouvement.

En effet, le mobile est soumis à l'action d'une force puisque le mouvement n'est pas uniforme; le mouvement étant rectiligne, la force est dirigée suivant la droite que décrit le mobile, car si la force avait pendant un instant une direction différente, le mobile changerait de direction; enfin la force est constante, car une force variable donnerait au mobile pendant des temps égaux des accroissements de vitesse inégaux.

33. PRINCIPE DE L'INDÉPENDANCE DES EFFETS DES FORCES.
— Quand plusieurs forces agissent simultanément sur un point matériel, chacune agit comme si elle était seule.

Il résulte de là que si plusieurs forces constantes agissent dans une même direction sur un point matériel, elles lui communiquent une accélération égale à la somme des accélérations que produirait chacune des forces, car chacune des forces exerce le même effet que si elle était seule, et les vitesses s'ajoutent.

En particulier, si une force f communique à un point matériel une accélération j , une force $2f$ lui communiquera une accélération $2j$ et une force nf lui communiquera une accélération nj .

34. Proportionnalité des forces aux accélérations. —

Soient une force $F = nf$ et une force $F' = n'f$, $\frac{F}{F'} = \frac{n}{n'}$; d'après ce que nous venons de voir (33), si l'on désigne par j l'accélération due à la force f , les accélérations communiquées par les forces nf et $n'f$ seront $nj = \gamma$ et $n'j = \gamma'$.

On a donc $\frac{\gamma}{\gamma'} = \frac{n}{n'}$, les accélérations sont comme les forces dans le rapport $\frac{n}{n'}$, par suite $\frac{\gamma}{\gamma'} = \frac{F}{F'}$.

Le théorème s'étend au cas où les forces sont incommensurables.

35. Masse. — La relation précédente peut être mise sous la forme

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

Pour un point matériel déterminé, le rapport d'une force qui agit sur ce point à l'accélération qu'elle lui communique est constant. Ce rapport est un coefficient qui varie avec chaque point matériel et le caractérise au point de vue du mouvement. On l'appelle la *masse* du point.

De la relation $F = M\gamma$ on déduit que, si une même force agit successivement sur deux points différents, les accélérations qu'elle leur communique sont en raison inverse de leurs masses.

En effet, nous avons $F = M\gamma = M'\gamma'$

$$\text{d'où } \frac{\gamma}{\gamma'} = \frac{M'}{M}.$$

On voit encore que deux forces constantes F et F' sont entre elles

comme les masses des points auxquels elles communiquent une même accélération.

En effet, si $F = M\gamma$

et $F' = M'\gamma$

on aura $\frac{F}{F'} = \frac{M}{M'}$

Comme tous les corps prennent en un même lieu une même accélération en chute libre sous l'action de leur poids (97), les masses sont proportionnelles aux poids. On a donc

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

Deux points de même poids ont la même masse, quelle que soit leur nature ; à un poids double correspond une masse double. On aura une masse double en juxtaposant deux points de même masse.

Les masses s'additionnent donc comme les poids. La masse d'un corps quelconque est la somme des masses de ses points matériels, de même que son poids est la somme des poids des points qui le composent.

Nous voyons bien d'après cela que la masse d'un corps homogène est proportionnelle à la quantité de matière qu'il renferme et que la notion vulgaire de la masse s'accorde avec la notion théorique déduite du fait expérimental de la proportionnalité des forces aux accélérations.

36. Unité de masse. — Dans la relation $F = M\gamma$, γ est une longueur qu'on exprime en centimètres (4). Si l'unité de force n'a pas été choisie, on peut choisir arbitrairement l'unité de masse. On prend pour *unité de masse* une masse de platine qu'on appelle **gramme-masse** ou simplement **gramme**. C'est la millième partie de la masse d'un bloc de platine appelé **kilogramme**, conservé au Bureau international des Poids et Mesures. Le gramme-masse est aussi la masse d'un centimètre cube d'eau pure à 4°. (1)

On appelle encore **gramme** le poids d'un centimètre cube d'eau pure à 4°, c'est le **gramme-poids** ou le poids d'une masse égale à un

(1) Bien qu'on se soit attaché à rendre la masse du kilogramme étalon rigoureusement égale à la masse d'un décimètre cube d'eau pure à 4°, il y a une différence *extrêmement petite*. Nous négligerons cette différence en toute circonstance.

gramme. Tous les corps de même poids ayant la même masse, la masse de tous les corps qui pèsent un gramme est égale à l'unité de masse. En tout lieu un poids de p grammes vaut p unités de masse.

La balance mesure la masse d'un corps (120) puisqu'elle *compare* son poids à celui d'un gramme et fait connaître son poids en grammes⁽¹⁾.

37. Unité de force. — L'unité de masse étant choisie, l'unité de force en dérive : d'après la relation $F = M\gamma$, c'est la force constante en grandeur et en direction qui imprime en une seconde à l'unité de masse partant du repos une vitesse de 1 centimètre. Cette unité de force se nomme **dyne** (du grec δύναμις, force). Elle est indépendante du lieu où l'on se trouve.

Une masse d'un gramme prend à Paris sous l'action de son poids une vitesse de 981 centimètres en une seconde : d'après la proportionnalité des forces aux accélérations, le poids d'un gramme vaut donc à Paris 981 dynes. Le poids d'un gramme ou l'effort qu'une masse d'un gramme exerce sur le plateau d'une balance varie avec le lieu où se fait l'expérience. Le poids d'un kilogramme vaut à Paris 981 000 dynes.

38. Densité. — Différentes substances prises sous le même volume ont chacune une masse différente. La masse d'une substance homogène sous l'unité de volume s'appelle sa *densité*. D'après cette définition, la masse d'un corps est égale au produit de son volume par sa densité. $M = VD$.

Pour l'unité de volume d'eau ou un centimètre cube d'eau, $M = 1$ et $V = 1$, donc $D = 1$; avec ce choix d'unités (centimètre pour la longueur, gramme pour la masse) la densité de l'eau est égale à 1.

39. PRINCIPE DE L'ÉGALITÉ DE L'ACTION ET DE LA RÉACTION. — Lorsque deux points agissent l'un sur l'autre, les choses se passent comme si un ressort intermédiaire tendu appuyait également sur les deux points.

(1) Il convient de remarquer que la connaissance des poids facilite la mesure des masses, mais la masse d'un corps a une existence indépendante de celle de son poids et un corps conserve partout sa masse, même s'il est soustrait à l'action de la pesanteur.

Notons encore que les forces que nous connaissons ne s'exercent pas d'ordinaire proportionnellement aux masses matérielles. C'est particulier à la pesanteur.

Si un point A reçoit une action du point A', il exerce à son tour sur A' une réaction égale et contraire. Ce principe s'étend à des corps de dimensions finies.

Une masse pesant un kilogramme est attirée par la terre par une force de un kilogramme. La terre est attirée par la même force et la masse s'avance vers la terre, la terre s'avance aussi vers la masse, mais comme les accélérations dues à une même force sont en raison inverse des masses, l'accélération de la terre est absolument négligeable.

Tout corps posé sur un appui exerce une action sur cet appui, celui-ci réagit et sa réaction fait partie des forces qui s'exercent sur le corps.

TRAVAIL

40. Une force n'a d'effet utile que si elle déplace son point d'application. On dit alors qu'elle accomplit un **travail**. Un manoeuvre en soulevant un poids à une certaine hauteur, la vapeur en poussant le piston d'un corps de pompe effectuent des travaux.

DÉPLACEMENT DU POINT D'APPLICATION DANS LA DIRECTION DE LA FORCE

41. **Travail d'une force constante.** — Soit une force constante appliquée en un point A d'un corps ; supposons que le déplacement

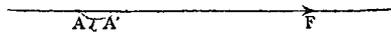


Fig. 26.

AA' du point a lieu dans la direction de la force (fig. 26), le travail de la force est par définition le *produit de la force par le déplacement de son point d'application*.

$$W = Fe.$$

Le travail d'une force est donc proportionnel à la force et au déplacement de son point d'application. *Le temps n'entre pas dans la définition du travail.*

42. Kilogrammètre. — Le travail pour lequel $Fe = 1$ est l'unité de travail. C'est en particulier le travail accompli par l'unité de force quand son point d'application se déplace de l'unité de longueur. Dans l'industrie mécanique, où l'unité de force est le kilogramme et l'unité de longueur le mètre, l'unité de travail est appelée **kilogrammètre** : c'est le travail nécessaire pour élever un poids d'un kilogramme à une hauteur d'un mètre. Quel que soit le travail qu'une machine accomplit, ce travail peut être comparé à celui d'un poids soulevé à une certaine hauteur et par conséquent évalué en kilogrammètres.

43. Erg. — En physique où l'unité de force est la dyne et l'unité de longueur le centimètre, l'unité de travail est le travail accompli par une dyne lorsque son point d'application parcourt un centimètre dans la direction de la force. Cette unité de travail est appelée **erg** (du grec ἔργον, travail).

Nous savons qu'une force d'un kilogramme vaut à Paris 981 000 dynes ; pour convertir un kilogrammètre en ergs, dans l'expression $W = Fe$, où W vaut 1 kilogrammètre, $F = 1$ kilogramme et $e = 1$ mètre, remplaçons F par 981 000, e par 100 ; nous aurons $W = 981\,000\,00$ ou $9,81 \cdot 10^7$; c'est la valeur en ergs du kilogrammètre à Paris. Le kilogrammètre varie avec la latitude comme le kilogramme, l'erg est invariable.

44. Joule. — En raison de l'extrême petitesse de l'erg, on prend souvent comme unité de travail le **joule** qui vaut 10 millions ou 10^7 ergs. Un kilogrammètre à Paris vaut 9,81 joules.

45. Pratiquement, en raison de l'importance du temps dans l'évaluation de l'effet utile d'une machine, on ne se borne pas à mesurer un travail, on note le temps pendant lequel ce travail est effectué et on appelle **puissance** d'une machine son travail par seconde. Cette puissance s'exprime en kilogrammètres par seconde ou en *chevaux-vapeur* (Le cheval-vapeur est un travail de 75 kilogrammètres accompli en une seconde).

Lorsque l'unité de travail est le joule, la puissance s'exprime en *watts*, c'est-à-dire en joules par seconde.

46. Travail moteur, travail résistant. — Quand le déplacement a lieu dans la direction de la force, le travail de la force est dit *moteur*, on le compte positivement. Le travail d'un poids de P kilogrammes tombant de h mètres est $+Ph$ kilogrammètres.

Si le déplacement a lieu en sens inverse de la force (par suite de

l'action simultanée d'autres forces ou par suite d'un mouvement antérieurement acquis), le travail de la force est dit *résistant* ; on le compte négativement. Quand on soulève de h mètres un poids d'un kilogramme, le travail du poids est $-Ph$ kilogrammètres.

47. Travail d'une force variable. — Lorsque le point d'application se meut dans la direction de la force, mais que la force est variable, on décompose l'espace parcouru en trajets assez petits $\Delta s, \Delta s' \dots$ pour que la force puisse être considérée comme constante sur chacun d'eux ; le travail sera $F\Delta s$ sur un de ces trajets, $F'\Delta s'$ sur le suivant, le travail total sera la somme $F\Delta s + F'\Delta s' + \dots$. Cette somme s'écrit pour abrégé : $\Sigma F\Delta s$. C'est par une somme de **travaux élémentaires** qu'on évalue le travail du piston dans le cylindre d'une machine à vapeur.

DÉPLACEMENT DU POINT D'APPLICATION DANS UNE DIRECTION DIFFÉRENTE DE CELLE DE LA FORCE

48. Force constante. — Déplacement rectiligne. — Décomposons la force F en deux composantes : Af dans la direction du déplacement, et Af' dans la direction perpendiculaire (fig. 27). La composante normale Af' ne déplace pas le point d'application et ne produit pas de travail. La force n'agit donc efficacement que par sa composante Af suivant la direction du déplacement. On appelle travail de la force F le travail W de cette composante.

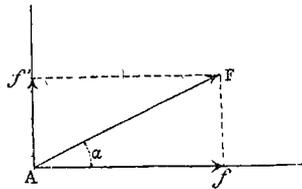


Fig. 27.

e désignant l'espace rectiligne parcouru par le point d'application, et α l'angle de la direction de la force et de la direction du déplacement, $Af = F \cos \alpha$,

$$W = Fe \cos \alpha.$$

Si $\alpha = 0$, $W = Fe$, la première définition se présente ainsi comme un cas particulier de celle-ci. Tant que α est aigu, la projection de F est dirigée dans le sens du mouvement, le travail est moteur (46) et il est positif comme le cosinus.

Lorsque $\alpha = 90^\circ$, $\cos \alpha = 0$ et $W = 0$.

Lorsque α est obtus, la projection de F est dirigée en sens con-

traire du mouvement, le travail est résistant et il est négatif comme le cosinus.

Lorsque $\alpha = 180^\circ$, $\cos \alpha = -1$, la force est dirigée en sens inverse du déplacement; $W = -Fe$, conformément à la première définition.

Nous voyons que les *forces motrices* font un angle aigu avec la direction du déplacement de leur point d'application, tandis que les *forces résistantes* font un angle obtus avec la direction du déplacement.

$F \cos \alpha$ étant la projection de la force sur la direction du déplacement, le travail est le *produit du déplacement par la projection de la force sur la direction du déplacement*.

$e \cos \alpha$ étant la projection du chemin parcouru sur la direction de la force, on peut aussi définir le travail le *produit de la force par la projection du chemin parcouru sur la direction de la force*.

49. Trajectoire curviligne. — Soit une force constante, de direction OZ. Décomposons la trajectoire AA'B en éléments assez petits pour que chacun d'eux puisse être considéré comme rectiligne. Le travail de la force le long d'un élément A'A'' est le produit de la force F par la projection $\alpha'\alpha''$ de A'A'' sur la direction de la force (fig. 28).

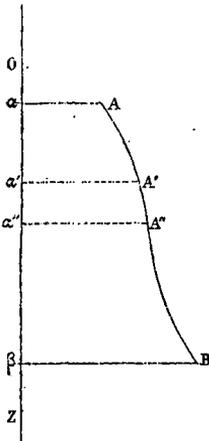


Fig. 28.

Le travail total sera la somme des travaux partiels,

$$F (\alpha\alpha' + \alpha'\alpha'' + \dots) = F\alpha\beta.$$

produit de la force par la projection de la trajectoire sur la direction de la force.

D'après cela, le travail d'un poids qui descend sans frottement le long d'un plan incliné ou d'une courbe quelconque est le même au bas de la course que si le poids était tombé verticalement de la même hauteur.

50. Force variable. — Terminons par l'étude du cas général où la force est variable en intensité et en direction et appliquée à un point qui décrit une trajectoire quelconque. Quand un point, libre ou non, parcourt une trajectoire AB (fig. 29) et est sollicité à chaque instant par une force F variable, on appelle travail total de la force F sur le parcours AB la somme des travaux élémentaires que l'on

obtient en décomposant l'arc parcouru AB en un nombre infiniment grand de parties infiniment petites, égales ou inégales. La force est pour chacun de ces éléments sensiblement constante en grandeur et en direction et ces éléments peuvent être considérés comme rectilignes. Le travail élémentaire est $F \cdot Mm$ ou $F \Delta s \cos \alpha$, α angle des directions de l'élément et de la force. Le travail total sera la somme algébrique des travaux élémentaires successifs $F \cdot Mm + F' \cdot Mm' + \dots$ somme que l'on représente par $\Sigma F \Delta s \cos \alpha$.

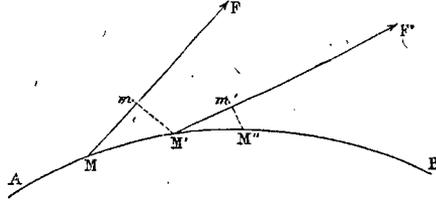


Fig. 29.

ÉQUIVALENCE DE LA FORCE VIVE ET DU TRAVAIL

51. Relation entre la force vive d'un point matériel et le travail dépensé pour lui communiquer sa vitesse. — Soit un mobile de masse m partant du repos et parcourant en un temps t un espace e sous l'action d'une force constante F , elle prend une accélération γ (32) donnée par la relation $F = m\gamma$, le travail dépensé est $Fe = m\gamma e$. Désignons par v la vitesse communiquée au mobile par la force après le temps t ,

$$v = \gamma t \quad e = \frac{1}{2} \gamma t^2;$$

on en déduit $v^2 = \gamma^2 t^2 = 2\gamma e$,

et en multipliant par m $mv^2 = 2m\gamma e$

$$\text{ou } \frac{mv^2}{2} = Fe.$$

Le travail Fe dépensé pour produire le mouvement de la masse m est égal au produit $\frac{1}{2} mv^2$. Ce produit s'appelle la *force vive* du mobile.

Si la force cesse d'agir, la masse poursuivra son mouvement en conservant sa force vive et elle ne pourra passer à l'état de repos qu'en produisant un travail ou en communiquant son mouvement à une autre masse.

52. Relation entre la force vive d'un point matériel et le travail qu'il peut effectuer en perdant sa vitesse. — Supposons que le mobile de masse m , animé de la vitesse v , rencontre une résistance constante encore égale à F , son mouvement sera uniformément retardé, les équations de la vitesse et de l'espace seront

$$v' = v - \gamma t$$

$$e' = vt - \frac{\gamma t^2}{2}.$$

Le mobile s'arrêtera lorsque sa vitesse sera devenue nulle, au temps t donné par l'équation

$$0 = v - \gamma t$$

en substituant cette valeur de t dans e' , on trouve

$$e' = \frac{v^2}{2\gamma}$$

$$\text{on a donc } e' = e,$$

la masse en mouvement n'aura perdu sa vitesse qu'après avoir parcouru un espace égal à celui qu'elle avait parcouru précédemment pour prendre cette vitesse.

Multiplions par m

$$\frac{mv^2}{2} = m\gamma e = Fe$$

Fe est un travail effectué par le corps en mouvement. Ce travail ne dépend pas de sa vitesse seule ou de sa masse seule, mais du produit $\frac{1}{2}mv^2$.

Une masse en mouvement a donc une capacité de travail; elle peut effectuer un travail en perdant sa vitesse, et ce travail est égal au travail qui avait été dépensé pour lui communiquer sa vitesse.

Il n'y a pas seulement égalité numérique entre la force vive et le travail, il y a transformation équivalente.

Le travail Fe avait disparu en créant une force vive $\frac{mv^2}{2}$, et cette force $\frac{mv^2}{2}$ a été à son tour dépensée en un travail Fe .

Si le mobile ne part pas du repos, mais a une vitesse v_0 , le théorème a pour expression :

$$\frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}mv_0^2 = Fe. \quad (1)$$

La variation de force vive du mobile est égale au travail.

Cette relation établie ici seulement pour une force constante est vraie pour une force quelconque appliquée à un point matériel.

53. Théorème des forces vives. — La relation entre la force vive et le travail se vérifie pour un système de points matériels. C'est le *théorème des forces vives* que l'on énonce comme il suit :

La variation de la somme des forces vives de tous les points d'un système pendant un temps quelconque est égale à la somme algébrique des travaux de toutes les forces appliquées aux différents points pendant ce temps.

$$\frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}mv_0^2 + \frac{1}{2}m'v'^2 - \frac{1}{2}m'v_0'^2 + \dots = W,$$

$$\text{ou } \frac{1}{2}\Sigma mv^2 - \frac{1}{2}\Sigma mv_0^2 = W$$

(1) La vitesse initiale du mobile étant v_0 , les équations du mouvement sont :

$$v = v_0 + \gamma t$$

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

$$\text{de là } v^2 = v_0^2 + 2\gamma v_0 t + \gamma^2 t^2 = v_0^2 + 2\gamma e$$

$$\text{d'où } v^2 - v_0^2 = 2\gamma e$$

$$\text{et } \frac{mv^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2} = m\gamma e = Fe.$$

Si, après avoir acquis cette vitesse v , le mobile rencontre une résistance constante F , son mouvement sera ralenti, uniformément retardé, et ses équations seront :

$$v' = v - \gamma t$$

$$e' = vt - \frac{\gamma t^2}{2}$$

Le mobile aura repris la vitesse v_0 au temps

$$t = \frac{v - v_0}{\gamma}$$

$$\text{à ce moment } e' = \frac{v^2 - v_0^2}{2\gamma}$$

$$\text{d'où } v^2 - v_0^2 = 2\gamma e' \quad e' = e$$

$$\text{et } \frac{mv^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2} = m\gamma e = Fe.$$

Si cette variation de force vive est un accroissement, un travail égal à cet accroissement a été dépensé pour le produire ; le même travail peut être reproduit quand le système perd son accroissement de force vive.

Lorsque *le mouvement du système est uniforme*, la force vive des différents points est constante et *la somme algébrique des travaux des forces est nulle*, le travail moteur est compensé par un égal travail résistant⁽¹⁾.

Dans une machine telle qu'une *machine à vapeur* où le mouvement est *périodique*, les différents points reprennent les mêmes positions relatives et les mêmes vitesses à des intervalles de temps égaux appelés périodes. *Pour une période ou un nombre entier de périodes*, la variation de la force vive totale est nulle et par conséquent la somme algébrique des travaux des forces ; par conséquent, le travail moteur total est égal au travail résistant total.

54. ÉNERGIE. — La capacité de travail d'un système est appelée *énergie*. On distingue deux formes d'énergie, l'énergie de mouvement ou *énergie cinétique*, et l'énergie de position ou *l'énergie potentielle*. Les quantités d'énergie se mesurent avec les mêmes unités que le travail mécanique (erg, joule, kilogrammètre).

55. Énergie de mouvement. — Un corps en mouvement possède une force vive qui peut se transformer en travail (52). La force vive est donc une forme d'énergie ; c'est *l'énergie cinétique*. Avec cette nouvelle dénomination de la force vive, le théorème des forces vives peut s'énoncer : *L'accroissement d'énergie cinétique d'un système se fait par une dépense de travail ; une diminution d'énergie cinétique peut produire un travail.*

(1) Le travail résistant d'une machine comprend le travail des outils actionnés ou travail utile, et le travail des résistances passives (frottements, etc..)

Pendant la mise en marche de la machine, le travail du moteur qui produit le mouvement est d'abord supérieur au travail résistant et la somme algébrique des travaux est positive : la force vive des organes augmente donc et par suite leur vitesse.

La vitesse continuant à croître, les résistances absorbent une portion de plus en plus grande du travail fourni. Quand elles l'absorbent entièrement, la vitesse ne croît plus et le mouvement devient uniforme. *C'est alors que la somme algébrique des travaux des forces est nulle*. A cause des résistances passives, le travail utile est toujours inférieur au travail moteur.

Si le moteur cesse d'agir, les résistances continuent à absorber du travail et la somme des travaux devient négative, les organes consomment alors leur force vive qui se comporte comme une réserve de travail. La vitesse diminue et la machine s'arrête quand elle a épuisé sa force vive.

56. Énergie potentielle. — L'énergie se présente sous une autre forme. Un ressort tendu possède une énergie, car en se détendant il pourra reproduire un travail égal au travail dépensé pour le tendre.

De même, un poids P , soulevé à une hauteur h , diffère du même poids au repos posé sur le sol ; car la terre et le poids constituent un système qui est déformé quand le poids est soulevé et qui tend à revenir à son état primitif comme si le poids et la terre étaient réunis par un ressort tendu. Le poids peut reproduire en tombant le travail Ph dépensé pour le soulever ; il possède donc une énergie potentielle Ph qui croît avec l'altitude. Il y a égalité entre le travail dépensé et l'énergie potentielle acquise.

Les réserves d'énergie du ressort tendu et du poids soulevé ont reçu le nom d'*énergie potentielle*. Tout système dont certaines parties peuvent produire du travail en changeant de positions relatives possède de l'énergie potentielle. Cette énergie existe dans un système bien que ses parties puissent être en repos.

L'eau courante, le vent, un projectile lancé par une arme, le volant d'une machine en mouvement ont de l'énergie cinétique : un ressort tendu, un gaz comprimé, une vapeur en pression, un liquide emmagasiné derrière un barrage, une substance explosible possèdent une énergie potentielle.

Tandis que l'énergie cinétique est susceptible d'être convertie en travail mécanique sans l'intervention d'une énergie étrangère, l'énergie potentielle a besoin de cette intervention pour se transformer. C'est ainsi que l'énergie d'une substance explosible reste potentielle jusqu'au moment où une énergie étrangère vient à l'enflammer : elle devient alors énergie cinétique, et elle se convertit en travail mécanique quand elle lance un projectile.

57. Transformation réciproque des deux énergies — Une énergie peut passer d'une forme à l'autre. Soit par exemple, un poids P maintenu en repos à la hauteur h , son énergie potentielle est mgh ; sa vitesse est nulle, et il en est de même de sa force vive ou de son énergie de mouvement. S'il est abandonné à l'action de la pesanteur et tombe, quand il est descendu de h' , son énergie de mouvement devient $\frac{1}{2}mv^2 = mgh'$; mais comme il est encore à la distance $h - h'$ du sol, il possède une énergie potentielle $mg(h - h')$; la somme $mgh' + mg(h - h') = mgh$ reste constante. Il n'y a pas

eu perte d'énergie, mais simplement échange d'une partie de l'énergie potentielle en énergie de mouvement.

La somme de l'énergie potentielle et de l'énergie de mouvement du système est constante, on appelle cette somme **énergie totale**.

C'est une application simple du principe connu sous le nom de **principe de la conservation de l'énergie (504)**.

Applications. — 1° Quel travail faut-il dépenser à la surface de la Lune pour soulever une masse de 10 kilogrammes à la hauteur de 20 mètres, l'intensité de la pesanteur à la surface de la Lune étant 160?

2° Un bloc de 5 kilogrammes tombe en un lieu où $g = 980$. Quelle sera son énergie cinétique après 4 secondes?

3° Un boulet de 10 kilogrammes est lancé avec une vitesse de 600 mètres par seconde. Quelle est son énergie cinétique?

4° Quelle est la capacité de travail d'une balle de 15 grammes lancée par un fusil de petit calibre avec une vitesse de 650 mètres par seconde?

5° Un tramway à vapeur du poids de 10 tonnes transporte 100 voyageurs d'un poids moyen de 65 kilos. Il se meut avec une vitesse de 18 kilomètres à l'heure. Quelle est son énergie cinétique?

6° En un lieu où $g = 980$, une masse de 24 kilogrammes a été soulevée à une hauteur de 8 mètres. Quelle est son énergie potentielle?

7° Calculer la puissance d'une chute d'eau dont le débit est 240 mètres cubes par minute et la vitesse 5 mètres par seconde.

8° Quel est le travail nécessaire pour faire passer un corps de masse égale à 5 kilogrammes de la vitesse de 10 mètres par seconde à celle de 20 mètres?

9° Quel est le travail produit par la chute d'une goutte d'eau d'un millimètre $1/4$ de diamètre tombant de la hauteur d'un centimètre?

MACHINES

58. Pour surmonter une résistance, il est souvent avantageux de ne pas faire agir directement la force sur le corps qui offre la résistance, mais d'interposer entre la force et la résistance un appareil qui transmet la force. Un semblable appareil est une **machine**.

Une machine utilise le travail dont on dispose, *elle n'en crée pas*⁽¹⁾.

La transmission de l'effet des forces se fait dans une machine par l'intermédiaire de ses organes. Une *machine simple* est une machine dont les organes se réduisent à une seule pièce solide. Une *machine composée* est un ensemble de machines simples associées.

(1) Une machine qui fonctionnerait *sans frottement* ne pourrait pas transmettre plus de travail qu'elle n'en reçoit. Après la suppression de l'action motrice, elle ne pourrait que se maintenir d'elle-même en mouvement uniforme, sans travail. Mais cela n'est même pas possible, car on ne peut que réduire le frottement sans parvenir à l'annuler.

Le levier, le treuil, sont des machines simples. Nous étudierons le levier⁽¹⁾.

59. LEVIER. — C'est une barre rigide, mobile autour d'un point fixe et à laquelle sont appliquées deux forces, appelées *puissance* et *résistance*. Les perpendiculaires abaissées du point fixe sur les directions de la puissance et de la résistance sont appelées les *bras du levier*. Nous supposons, parce que c'est le cas que nous rencontrons le plus souvent, que la puissance et la résistance sont deux forces parallèles. D'après la position relative des points d'application des forces et du point fixe, on distingue trois genres de levier.

60. Levier du premier genre. — *Le point d'appui est compris entre les points d'application des deux forces.* Quand l'équilibre est établi, la résultante R des deux forces P et P' (22) passe par le point

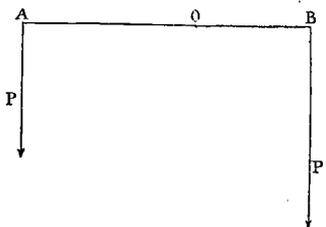


Fig. 30.

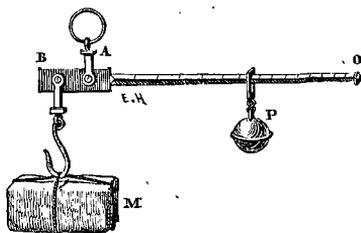


Fig. 31.

d'appui O dont la réaction détruit cette résultante (fig. 30). Un *fléau de balance* est un levier du premier genre à bras égaux (122) ; la *balance romaine* est un levier du premier genre à bras inégaux (fig. 31) ; chacune des branches d'une paire de ciseaux est un levier du premier genre dont la vis est le point d'appui.

Nous avons dans ce cas les relations :

$$P \cdot OA = P' \cdot OB \quad (1)$$

$$R = P + P'.$$

La pression sur le point d'appui est égale à R .

(1) Les machines qui servent à transmettre un travail mécanique n'ont pas toutes le même but à remplir. Les unes n'ont qu'à déterminer un changement de direction sans modifier la valeur des facteurs du produit *force et déplacement* qui représente le travail. C'est le cas de la *poulie*. D'autres ont pour objet de modifier les facteurs du produit de façon à faire croître la force aux dépens du chemin parcouru ou inversement, le travail restant constant. Le *levier* appartient à ce groupe.

Si nous supposons que le levier tourne autour de son point d'appui d'un mouvement uniforme, la puissance et la résistance continueront à se faire équilibre.

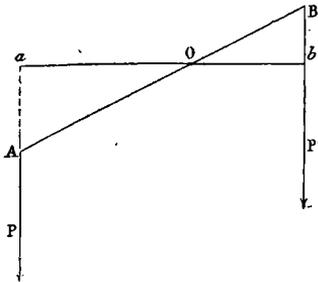


Fig. 32.

Soient Aa , Bb les projections des chemins parcourus sur les forces (fig. 32), les triangles semblables Oaa , OBb nous donneront :

$$\frac{OA}{OB} = \frac{Aa}{Bb}$$

par suite, d'après l'équation (1) :

$$P \cdot Aa = P' \cdot Bb.$$

ce qui exprime que le travail moteur est égal au travail résistant. Ce levier permet de surmonter une résistance considérable avec une force motrice faible.

Si l'un des bras OA est dix fois plus long que l'autre, en faisant agir un kilogramme en A de façon à faire descendre le grand bras de 10 centimètres, le petit remontera seulement de 1 centimètre, mais en soulevant 10 kilogrammes. Ce que l'on perd en vitesse on le gagne en force.

61. Levier du second genre. — *La résistance se trouve entre le point d'appui et la puissance.*

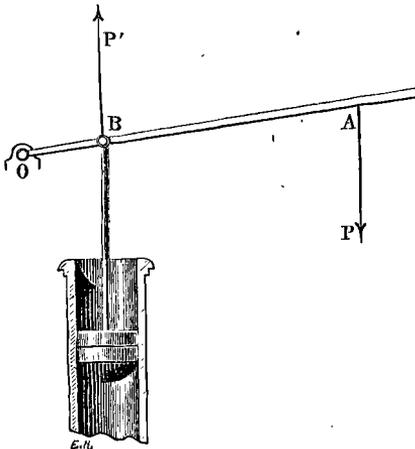


Fig. 33.

Ce levier est favorable à la puissance qu'il permet de diminuer.

La brouette est un levier du second genre, l'axe de la roue sert de point d'appui, la résistance est le fardeau posé dans la brouette, la puissance est dans le bras. Les avirons d'une barque, chacune des branches d'un casse-noisette sont des leviers du second genre.

Dans les pompes on utilise fréquemment des leviers du second genre (fig. 33).

$$P \cdot OA = P' \cdot OB$$

$$R = P' - P.$$

62. Levier du troisième genre. — *La puissance se trouve entre le point d'appui et la résistance.* Ce levier est favorable à la rapidité du mouvement, on gagne en vitesse ce que l'on perd en force. La pédale du rémouleur est un levier du troisième genre (fig. 34),

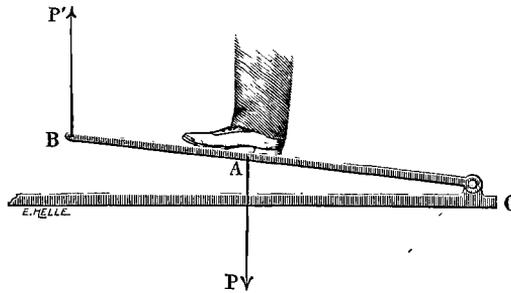


Fig. 34.

il en est de même de chacune des branches des pincettes de nos foyers.

$$R = P - P' \quad P \cdot OA = P' \cdot OB.$$

Pour les trois cas, la condition d'équilibre est $P \cdot OA = P' \cdot OB$.

Dans le corps de l'homme et des animaux, le mécanisme des mouvements a lieu par l'intermédiaire de leviers; le levier du troisième genre est celui que l'on y rencontre le plus fréquemment.

PHYSIQUE

OBJET DE LA PHYSIQUE

63. Modifications chimiques. — Les corps peuvent subir des changements qui altèrent leurs propriétés d'une façon permanente : tel est le cas d'une pierre calcaire qui se transforme en chaux par la calcination ou du plomb fondu qui se change en une poussière jaune d'oxyde de plomb quand on le chauffe au contact de l'air. Ces phénomènes sont dits *chimiques*.

64. Modifications physiques. — Il y a d'autres phénomènes dits *physiques* qui se manifestent dans les corps, sans amener de modification permanente dans leur nature; citons le changement d'état de l'eau que l'action d'un foyer de chaleur transforme en vapeur ou encore le changement d'un bâton de verre qu'on électrise par le frottement. Ces modifications laissent intacte la nature du corps et cessent avec la cause qui les a produites. C'est à l'étude de ces modifications passagères et des lois qui les régissent que se borne la physique proprement dite.

Observation; expérimentation. — Deux méthodes conduisent à la connaissance des phénomènes physiques : l'observation et l'expérimentation.

L'*observation* précède l'expérimentation; c'est l'examen attentif et détaillé d'un phénomène et de ses diverses phases, tel qu'il se produit dans la nature.

L'*expérimentation* s'applique à provoquer la reproduction d'un phénomène spécial pour l'observer à loisir, et à varier les conditions

dans lesquelles il s'accomplit pour reconnaître sa cause et l'influence des diverses circonstances qui l'accompagnent.

65. BRANCHES DE LA PHYSIQUE. — Certains phénomènes physiques se présentent comme indépendants; d'autres se rapportent manifestement à une cause commune ou à un même *agent physique*. On a cherché à réduire le plus possible les agents physiques et toutes les fois qu'un fait nouveau est observé, on s'efforce de l'expliquer, c'est-à-dire de le rattacher à d'autres faits mieux connus. En procédant ainsi, on est parvenu à classer les phénomènes physiques en un petit nombre de groupes qui constituent les branches de la physique : phénomènes *calorifiques*, phénomènes *sonores*, phénomènes *optiques*, phénomènes *électriques* et *magnétiques*. Quelques-uns de ces groupes se rapportent directement à un sens spécial.

66. Lois physiques. — Dans chacun de ces groupes, ayant reconnu par l'observation et par l'expérimentation des effets communs à certains corps dans des conditions déterminées on a formulé des énoncés qui constituent des *lois physiques*. Ex. : *tous les corps sont pesants; tous les corps s'électrisent par le frottement*. Une loi physique peut résumer une étude complète d'un phénomène et être exprimée par une relation algébrique, par exemple : *à une température donnée, la densité d'un gaz est proportionnelle à la pression qu'il supporte*.

67. Théories physiques. Hypothèses. — Pour plusieurs groupes on a réussi à établir entre les différents phénomènes d'un même groupe un lien qui permet de les déduire d'un fait fondamental; c'est ainsi que les phénomènes sonores ont été reconnus dépendre de mouvements vibratoires faciles à percevoir, qui se propagent dans un milieu élastique. L'étude de ces mouvements vibratoires sert de base à la théorie des phénomènes sonores.

La comparaison des phénomènes lumineux et des phénomènes sonores conduit à admettre que la lumière se propage comme le son et doit aussi être attribuée à un mouvement vibratoire. Le milieu élastique nécessaire à la propagation paraissait manquer dans le cas de la lumière puisque la lumière se propage dans le vide. On a pourtant constitué une théorie optique, analogue à la théorie acoustique en faisant l'*hypothèse* d'un milieu spécial appelé *éther* qui remplirait l'espace et serait susceptible d'entrer en vibration. L'hypothèse du mouvement vibratoire lumineux a permis d'expliquer simplement les

phénomènes lumineux connus et d'en découvrir de nouveaux. Certains phénomènes électriques s'expliquent aussi par analogie avec les phénomènes lumineux par l'hypothèse d'un mouvement vibratoire électrique. Ce mouvement vibratoire électrique se propage par le même milieu que le mouvement vibratoire lumineux.

68. Divisions de la physique. — D'après le groupement des phénomènes physiques, nous diviserons l'étude de la physique en six parties : 1° Propriétés générales des corps ; 2° Pesanteur ; 3° Chaleur ; 4° Acoustique ; 5° Optique ; 6° Électricité et magnétisme.

PROPRIÉTÉS GÉNÉRALES DES CORPS

69. Étendue. — La matière est *étendue*; on entend par là qu'un corps occupe une certaine partie de l'espace. Le *volume* d'un corps est la portion de l'espace qu'il occupe.

70. Divisibilité. — Un corps peut être divisé en fragments; ceux-ci sont à leur tour susceptibles d'un nouveau fractionnement. La divisibilité peut être poussée fort loin : l'or se réduit en feuilles très minces; quelques milligrammes de fuchsine colorent en rouge plusieurs litres d'eau; la divisibilité des substances odorantes est extrêmement grande. On admet toutefois en chimie que la divisibilité est limitée et qu'un corps se compose de parties élémentaires insécables appelées **atomes**.

71. Compressibilité. Intervalles moléculaires. — Un corps paraît formé d'une agrégation de particules extrêmement petites ou **molécules** offrant les mêmes propriétés que le corps lui-même (une molécule est un édifice décomposable en atomes). Il convient d'admettre que les molécules ne se touchent pas. En effet, tous les corps diminuent de volume quand on les comprime ou quand on abaisse leur température, et si l'on admet que deux molécules ne peuvent occuper en même temps la même place dans l'espace, cette diminution de volume ne se conçoit que par la variation de grandeur d'*intervalles intermoléculaires* invisibles au microscope. Ces intervalles ne doivent pas être confondus avec les lacunes des substances poreuses telles que les pores des pierres filtrantes, les stomates des feuilles, etc.

72. Élasticité. — En même temps que les corps sont compressibles, ils sont *élastiques*, c'est-à-dire que, s'ils ont subi une déforma-

tion par l'effet d'une action mécanique, ils tendent à reprendre leur forme initiale aussitôt que la force étrangère cesse d'agir.

Nous avons utilisé plus haut l'élasticité dans l'emploi des dynamomètres (13).

ÉTATS DES CORPS

73. Un même corps, tout en conservant sa nature chimique, peut se présenter sous trois états physiques différents : *état solide, état liquide, état gazeux*. L'eau nous en donne un exemple : elle existe à l'état de vapeur dans l'air atmosphérique, elle devient liquide en se condensant, puis elle passe à l'état solide sous forme de glace. Tous les corps se comportent de même.

74. **État solide.** — Les solides ont *une forme et un volume déterminés*, ils opposent une résistance à un changement de forme ou de volume. Les particules sont liées les unes aux autres par des forces

attractives dites *forces de cohésion*.

Ces forces sont considérables, car il faut exercer une traction de près de 100 kilogrammes dans le sens de la longueur pour rompre une tige d'acier de 1 millimètre carré de section. La distance à laquelle ces forces s'exercent est extrêmement petite. Il ne suffit pas en effet de placer l'une sur l'autre deux surfaces de verre bien polies *ab, cd*, pour qu'elles adhèrent ; toutefois, si on les fait glisser l'une contre l'autre avec pression, elles s'attachent et ne peuvent ensuite être séparées qu'avec effort. Ces

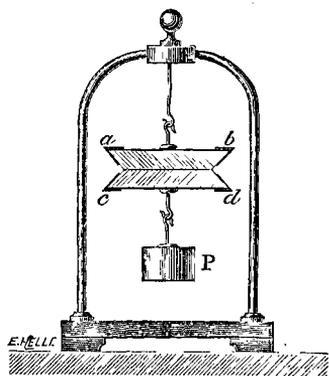


Fig. 35.

glaces, une fois unies, ne se séparent pas même dans le vide, ce qui montre que leur adhérence ne provient pas de la pression atmosphérique (fig. 35).

Un solide soumis à une traction ou à une compression n'éprouve qu'un changement de volume extrêmement faible ; en outre, si l'écart moléculaire dépasse une certaine limite, le solide ne reprend pas son volume primitif ; on dit que la *limite d'élasticité* a été dépassée⁽¹⁾.

(1) Les corps appelés vulgairement élastiques, tels que le caoutchouc, sont ceux auxquels on peut faire subir une déformation notable sans dépasser leur limite d'élasticité.

75. État liquide. — Les liquides *ont un volume déterminé*, comme les solides, mais *ils n'ont pas de forme propre* et se moulent sur les vases qui les reçoivent; ils se terminent par une *surface libre*. Bien que les molécules liquides puissent glisser facilement les unes sur les autres, elles offrent encore entre elles une certaine cohésion qui les empêche de se disperser⁽¹⁾.

Les liquides sont *plus compressibles que les solides*, mais ils le sont encore très peu.

Ils sont *parfaitement élastiques*, sans présenter de limite d'élasticité; en effet, quelle que soit l'intensité de la force qui les comprime, ils reprennent toujours leur volume initial quand la force a cessé son action, et cette élasticité ne diminue pas par l'usage, comme cela a lieu pour les solides.

76. État gazeux. — Les gaz *n'ont ni forme ni volume déterminés*, leurs molécules paraissent indépendantes; ils sont beaucoup *plus compressibles que les liquides* et leur *élasticité est parfaite* comme celle des liquides. On démontre cette *compressibilité* et cette *élasticité* en engageant un piston en cuir graissé dans un tube épais en verre fermé à l'une de ses extrémités (fig. 36). Quand on enfonce vivement le piston, l'air qui remplit le tube est fortement comprimé; réduit au quart et même au dixième de son volume, il reprend son volume primitif et chasse le piston dès qu'on cesse la pression⁽²⁾.

Les gaz *n'ont pas de surface libre*; ils se distinguent des liquides par leur **expansibilité** qui leur permet d'occuper tout le volume qui leur est offert. Un gaz peut être assimilé à un ressort constamment

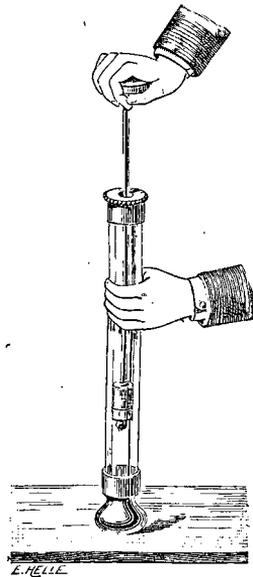


Fig. 36.

(1) Si l'on plonge une tige de verre dans un liquide qui la mouille, par exemple dans l'eau et qu'on la retire ensuite, une goutte liquide reste suspendue à l'extrémité inférieure de la tige. Le liquide qui touche immédiatement le verre est retenu par une adhérence du liquide au solide, mais le reste de la goutte est suspendu par la cohésion du liquide sur lui-même.

La forme sphéroïdale des gouttes de pluie est encore une preuve de la cohésion des liquides.

(2) Cet appareil a reçu le nom de *briquet à air* à cause de la chaleur (494) que dégage la compression brusque de l'air qu'il renferme.

tendu qui fait effort pour se détendre; ses molécules se repoussent et exercent contre les parois du vase qui les renferme une pression ou **force élastique**. On met en évidence cette force élastique en plaçant sous la cloche d'une machine pneumatique une vessie munie d'un robinet; dégonflée quand le robinet était ouvert, puis fermée,

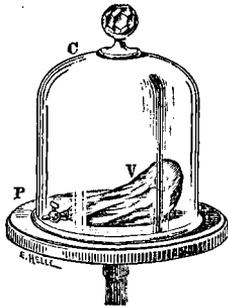


Fig. 37.

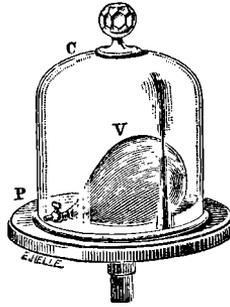


Fig. 38.

elle ne renferme que très peu d'air; la force élastique de l'air qu'elle contient fait équilibre à la force élastique de l'air de la cloche (fig. 37). Si l'on diminue progressivement la pression de l'air de la cloche en faisant le vide, la vessie se gonfle par l'expansibilité du gaz qu'elle contient (fig. 38). Quand on fait rentrer l'air dans la cloche, la vessie s'affaisse de nouveau.

77. États intermédiaires. — Entre ces trois états bien définis, on observe des états intermédiaires. Les *corps mous* se placent entre les liquides et les solides, ils ont l'apparence des solides, mais des forces très faibles déterminent en eux des déformations notables et permanentes.

MESURE DES LONGUEURS

78. La détermination de l'étendue d'un corps ne comprend que des mesures de longueurs, de surfaces, de volumes; nous allons nous occuper ici des mesures des longueurs rectilignes.

On mesure une longueur rectiligne en cherchant combien de fois on peut porter sur cette longueur l'unité de longueur.

L'unité de longueur est le **mètre**. Le mètre est la longueur à 0° d'une règle étalon de platine iridié conservé au Bureau international des Poids et Mesures à Sèvres. Les règles usuelles sont des copies du mètre étalon; elles sont subdivisées en centimètres, et le centimètre est divisé en millimètres. Pratiquement, on ne peut pas songer à subdiviser le millimètre en dixièmes de millimètre, car les traits se confondraient à cause de leur épaisseur.

Pour mesurer une longueur, on met l'une de ses extrémités en

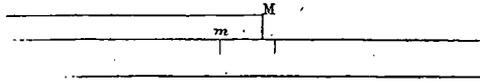


Fig. 39.

coïncidence avec le zéro de la règle principale, et on lit la division à laquelle s'arrête l'autre extrémité.

Lorsque la longueur à mesurer ne contient pas un nombre exact de millimètres, son extrémité M se place entre deux divisions de la règle (fig. 39); on lit la division *m* qui précède le point où s'arrête l'extrémité M, et avec un peu d'habitude on évalue la fraction *mM* en dixièmes de millimètre sans commettre une erreur supérieure à un dixième de millimètre.

79. Vernier. — L'évaluation en dixièmes de millimètre s'obtient avec sûreté au moyen d'une échelle spéciale appelée *vernier*.

Description. — Le vernier est une courte règle divisée, glissant le long de la règle principale. Sur le vernier au dixième une longueur

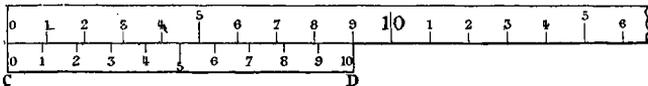


Fig. 40.

CD de 9 millimètres, a été divisée en dix parties, ce qui fait que chacune des divisions du vernier vaut $\frac{9}{10}$ de millimètre (fig. 40).

Mesure. — Supposons qu'une longueur à mesurer occupe *n* divisions de la règle divisée plus un reste; on fait glisser le vernier le long de la règle jusqu'à ce que son zéro vienne s'appliquer contre l'extrémité M de la longueur à mesurer (fig. 41), et on examine quel est le *trait du vernier* qui se trouve en prolongement d'un trait de la

règle. Supposons que la coïncidence ait lieu au trait 7 du vernier. La division 6 du vernier qui précède la division 7 pour laquelle il y a coïncidence est distante du trait précédent de la règle de $\frac{1}{10}$ de millimètre, la division 5 du vernier qui précède de 2 divisions la division 7

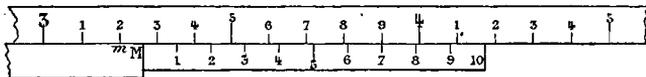


Fig. 41.

est distante du trait précédent de la règle de $\frac{2}{10}$ de millimètre, ... l'extrémité M ou la division 0 du vernier qui précède de 7 divisions la division 7. est distante du trait précédent de la règle de $\frac{7}{10}$ de millimètre. La longueur mM à évaluer vaut donc $\frac{7}{10}$ de millimètre.

Lorsque la longueur mM vaut un nombre exact de dixièmes de millimètre, il y a coïncidence entre une division du vernier et une division de la règle, et le numéro de la division du vernier qui coïncide avec une division de la règle indique le nombre de dixièmes de millimètre à ajouter.

S'il n'y a pas coïncidence, on observe quel est le numéro du vernier qui est le plus voisin d'un trait de la règle, et on ajoute un nombre de dixièmes de millimètre égal à ce numéro.

Vernier au vingtième. — On évaluera le vingtième de millimètre avec un vernier au vingtième formé en divisant en 20 parties une longueur de 19 millimètres. Pour apprécier le cinquantième, on prendra une longueur de 49 divisions qu'on divisera en 50. Pratiquement on ne peut guère dépasser cette approximation.

80. Pied à coulisse. — C'est une règle divisée en millimètres terminée

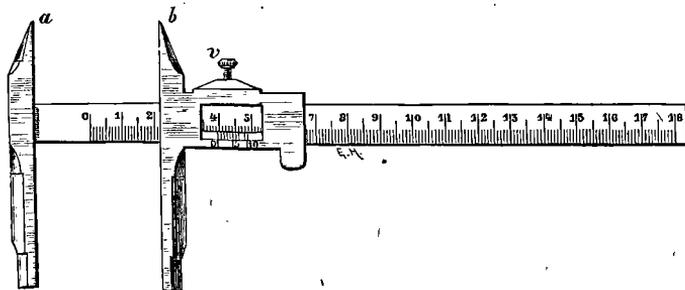


Fig. 42.

par un talon perpendiculaire fixe. Un curseur muni également d'un talon est mobile sur la règle et peut être arrêté à l'aide d'une vis de pression v . Le curseur présente une fenêtre dont l'un des bords taillé en biseau est muni d'un vernier au dixième de millimètre. Cet appareil (fig. 42) permet de mesurer l'épaisseur d'un objet placé entre le talon fixe et le talon du curseur. Les bords internes des deux talons sont bien plans et s'appliquent exactement l'un contre l'autre. A ce moment, le zéro du vernier doit être en coïncidence avec le zéro de la règle.

81. Vis micrométrique. — Une vis micrométrique permet d'apprécier des fractions de millimètre beaucoup plus petites que le $\frac{1}{50}$.

Une vis est formée d'un noyau cylindrique sur lequel s'enroule en hélice une saillie appelée *filet* (fig. 43). La vis s'engage dans une pièce solide nom-

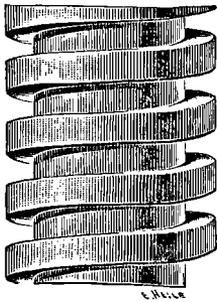


Fig. 43.

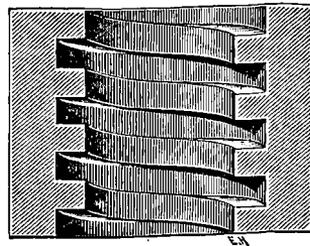


Fig. 44.

mée *écrou*, creusée d'une rainure qui offre en creux le filet que la vis présente en relief (fig. 44). Si l'écrou est fixe, la vis en s'avancant dans son écrou prend un mouvement de rotation autour de son axe accompagné d'un mouvement de translation suivant le même axe. Le déplacement suivant l'axe à chaque tour de la vis s'appelle le *pas* de la vis; si la vis tourne d'une fraction de tour, son déplacement suivant l'axe est proportionnel à l'angle dont elle a tourné. Cette propriété permet de mesurer une longueur avec une très grande précision.

82. Sphéromètre. — Cet instrument est employé pour mesurer l'épaisseur d'une lame mince à faces parallèles.

Description. — Il consiste en une vis à pas très régulier dont le filet s'engage dans un écrou fixe porté sur un trépied; ce trépied repose par trois pointes équidistantes sur un plateau de verre dépoli rigoureusement plan (fig. 45).

L'axe de la vis passe par le centre du cercle circonscrit au triangle équilatéral des pointes. Le corps de la vis se termine à sa partie inférieure par une pointe mousse, sa tête porte un large cercle gradué qui est perpen-

diculaire à l'axe de la vis et tourne devant une réglette verticale divisée, fixée sur le trépied; les divisions de la réglette sont égales au pas de la vis.

Si le pas est d'un demi-millimètre, un tour entier du disque divisé déplace la pointe de la vis d'un demi-millimètre. Lorsque le disque porte 500 divisions et qu'on le fait tourner d'une division, la pointe se déplace de $\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{500}$ de millimètre ou $0^{\text{mm}}001$.

Mesure. — On pose le trépied sur le plateau de verre dépoli et on tourne la tête de la vis jusqu'à ce que la pointe touche le plan. Le contact se reconnaît avec précision, car si la pointe dépasse un peu le plan des trois

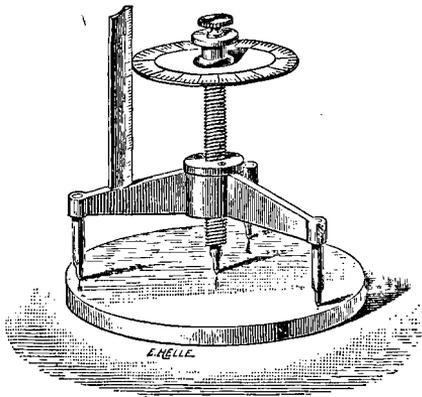


Fig. 45.

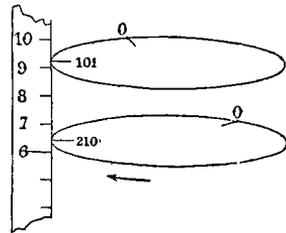


Fig. 46.

pointes du trépied, l'appareil ballotte autour de la pointe avec un grincement spécial. On remonte un peu la vis jusqu'à ce que le ballonnement cesse. On lit alors la division de la règle qui affleure au bord du disque et la division du cercle gradué qui correspond à l'arête de la règle. La règle marque le nombre de tours et le cercle le nombre de fractions de tours. C'est la première lecture. (Sur la figure 46 on lit 6 tours $\frac{210}{500}$.)

On relève la pointe de la vis, on introduit au dessous la lame dont on cherche l'épaisseur et on établit le contact entre la pointe et la face supérieure de la lame. On fait une deuxième lecture (9 tours $\frac{101}{500}$.)

La différence des deux nombres exprime la hauteur dont la vis s'est élevée entre les deux contacts ou l'épaisseur de la lame (2 tours $\frac{391}{500}$ ou $1^{\text{mm}},391$.)

Si le pas de la vis était inconnu, on l'obtiendrait en faisant une mesure pour une lame d'épaisseur connue.

83. Le **palmer** qui sert à mesurer de petites épaisseurs, spécialement l'épaisseur des fils, est un véritable sphéromètre. L'écrou dans lequel s'engage la vis est un étrier en fer muni d'un butoir fixe A, plan à son extrémité. La vis se termine par un butoir identique V, qui peut venir s'appuyer sur le

butoir fixe. Des divisions égales au pas de la vis (1 millimètre) sont tracées sur une génératrice de la surface extérieure de la tige qui sert d'écrou. La

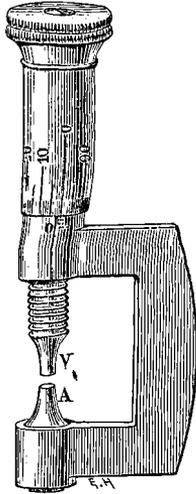


Fig. 47.

tête de la vis est revêtue d'un manchon qui entoure la tige de l'écrou et sur le bord inférieur, duquel sont gravées 100 divisions parallèles à la tige. On apprécie ainsi le $\frac{1}{100}$ de millimètre (fig. 47). Quand les butoirs V et A sont en contact, les divisions doivent être au zéro.

84. Cathétomètre. — Le cathétomètre sert à mesurer la distance verticale des plans horizontaux qui passent par deux points situés ou non sur la même verticale.

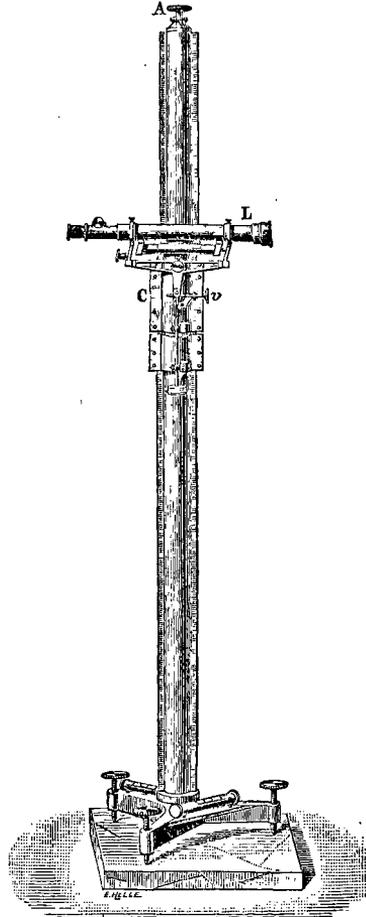


Fig. 48.

Description. — Il se compose d'une lunette L portée par un chariot C mobile à frottement doux le long d'une règle divisée. La règle est fixée à un cylindre creux qui peut tourner librement autour d'un axe A fixé perpendiculairement à un support horizontal muni de trois vis calantes (fig. 48). Le chariot qui porte la lunette peut être arrêté par une vis de pression K en chacun des points de sa course. Un niveau n placé au-dessous de la lunette sert à reconnaître l'horizontalité de l'axe optique de la lunette (fig. 49).

On commence par établir la verticalité de l'axe de rotation et de la règle qui lui est parallèle par un réglage au moyen des trois vis calantes du sup-

port et on rend l'axe de la lunette horizontal au moyen de son niveau et d'une vis v avec laquelle on peut l'incliner.

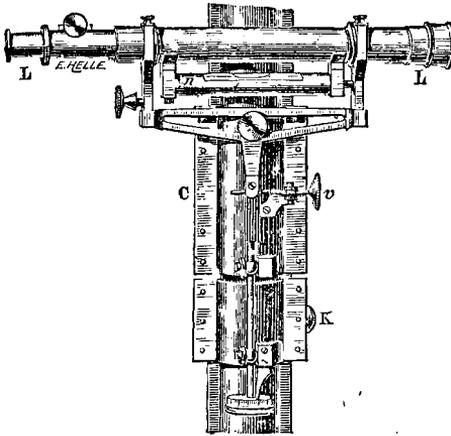


Fig. 49.

Mesure. — Pour mesurer la différence des niveaux de deux points A et B, on place le cathétomètre à une distance telle que ces deux points puissent être vus distinctement avec la lunette; on fait ensuite glisser le chariot le long de la règle, et on tourne celle-ci autour de l'axe de rotation de façon à viser A, ce que l'on fait en amenant l'image du point A à coïncider avec la croisée de deux fils très fins tendus à angle droit au foyer de l'objectif de la lunette, à une petite distance de l'oculaire; on serre alors la vis qui fixe le chariot sur la règle.

Une division tracée sur le bord du chariot fait vernier avec la division de la règle (fig. 50). On lit les millimètres sur la règle, et les fractions de millimètre sur le vernier. De là un premier nombre. ($555 \frac{9}{20}$ sur la figure.)

On fait glisser verticalement le chariot qui porte la lunette et on fait tourner au besoin la règle autour de l'axe vertical de façon à viser B comme on a visé A. On fait une lecture qui donne un deuxième nombre.

La différence des deux nombres exprime la différence des niveaux des deux points A et B.

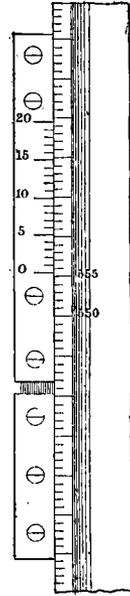


Fig. 50.

PESANTEUR

85. Tous les corps sont pesants. — A la surface de la terre, tout corps abandonné à lui-même *tombe*, c'est-à-dire se dirige vers le sol s'il n'est pas soutenu. C'est un fait bien connu pour les corps solides et pour les corps liquides tombant dans l'air ; nous démontrerons plus tard que les gaz ne font pas exception (184).

86. Pesanteur. — La cause du mouvement de chute des corps est appelée *pesanteur*.

La pesanteur agit sur tous les corps, indistinctement, quels que soient leur volume, leur forme, leur nature. Elle exerce son action sur toutes les molécules, car si on divise un corps quelconque en parties de plus en plus petites, jusqu'à le réduire à l'état de poussière, chacune de ses parties est pesante.

La pesanteur est donc une force appliquée aux particules de tous les corps ; nous chercherons sa direction et son intensité.

87. Direction de la pesanteur. Fil à plomb. — *Le fil à plomb fait connaître la direction de la force*, c'est-à-dire la direction suivant laquelle la pesanteur ferait mouvoir un point matériel isolé sur lequel elle agirait librement.

Un *fil à plomb* est un fil flexible F suspendu à un point fixe par une de ses extrémités et portant à l'autre extrémité un corps pesant tel qu'une balle de plomb (fig. 51). Le corps suspendu étant au repos, la pesanteur agit sur lui, mais la tension qu'elle détermine dans le fil empêche le corps de tomber

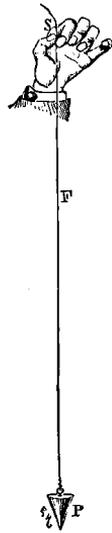


Fig. 51.

Comme il n'y a que deux forces agissant sur la balle de plomb, il faut pour l'équilibre qu'elles soient égales et opposées, ou que la pesanteur agisse sur la balle de plomb en sens inverse de la tension, c'est-à-dire suivant le prolongement du fil. La direction du fil à plomb est donc bien la direction de la pesanteur.

Plusieurs fils terminés par différents corps pesants placés au voisinage les uns des autres sont parallèles au repos; la direction de la pesanteur est donc *la même en un même lieu* pour tous les corps, quels que soient leur volume, leur forme et leur nature.

88. Verticale. — La direction du fil à plomb en repos est désignée sous le nom de *verticale*. Elle est *constante* en un même lieu et perpendiculaire à la surface des eaux tranquilles ou en général à la surface d'un liquide en repos.

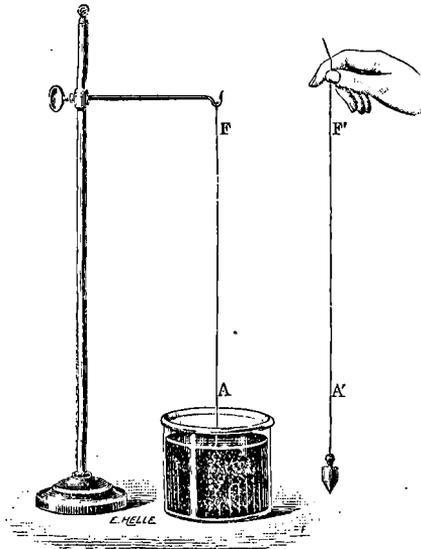


Fig. 52.

Pour le vérifier, on prend un fil muni à sa partie inférieure d'un poids en platine plongeant dans un bain de mercure (ou d'un autre liquide opaque comme l'eau noircie), l'image du fil fournie par la surface du liquide est dans le prolongement du fil lui-même (fig. 52).

Plaçons en effet un deuxième fil à plomb $F'A'$ entre l'œil et le fil à plomb FA de façon à cacher celui-ci; l'image de FA est cachée en même temps; cette image est donc dans le plan des deux parallèles FA , $F'A'$. Pour toute autre position $F''A''$ du second fil, l'image du

fil FA est encore dans le plan des deux parallèles FA , $F''A''$, elle se trouve donc sur l'intersection des deux plans qui est FA . Or l'image ne peut être sur le prolongement du fil que si le fil est perpendiculaire à la surface du bain, car d'après les lois de la réflexion de la lumière, l'image d'une droite sur un miroir plan est une seconde droite symétrique de la première par rapport au plan du miroir (613).

89. Plan horizontal. — On appelle *plan horizontal* tout plan

perpendiculaire à la verticale, et *horizontale* toute ligne située dans ce plan ou parallèle à ce plan.

90. La direction de la pesanteur passe par le centre de la Terre. — La surface des eaux qui entoure le globe terrestre est sensiblement sphérique; en chaque lieu, elle forme un plan horizontal qui se confond avec le plan tangent à la sphère terrestre; les verticales en différents points ne sont donc pas parallèles, elles sont perpendiculaires aux plans tangents de la sphère en ces points et dirigées suivant des rayons qui se coupent au centre de la Terre (fig. 53).

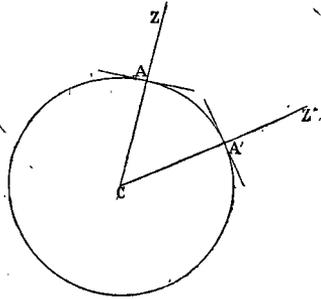


Fig. 53.

La verticale en chaque point du globe étant la direction que suit un corps pesant dans sa chute, tout se passe comme si la pesanteur émanait du centre de la Terre.

En deux points A et A' éloignés l'un de l'autre, les verticales font un angle sensible : l'angle des verticales de Paris et de Barcelone est supérieur à 7° ; deux fils à plomb distants d'un kilomètre font entre eux un angle peu différent d'une demi-minute, mais dans un appartement deux fils à plomb sont parallèles et leur angle échappe à toute mesure.

91. Poids d'un corps. — Un corps pesant peut être considéré comme formé de molécules matérielles sollicitées chacune par une force dirigée suivant la verticale du lieu; ces forces parallèles et de même sens ont une résultante unique, verticale, égale à leur somme, appelée *poids* du corps. *Le poids d'un corps est la résultante des actions exercées par la pesanteur sur tous les points du corps*, c'est aussi la pression exercée par ce corps sur un obstacle qui le soutient. *L'unité de poids* est le poids d'un centimètre cube d'eau distillée prise à 4° et pesée dans le vide; c'est le *poids d'un gramme* (36).

92. Centre de gravité. — Le point d'application G de la résultante des effets de la pesanteur est appelé *centre de gravité*. C'est le centre des forces parallèles p, p' exercées par la pesanteur sur toutes les particules du corps (fig. 54),

Quand on change la position d'un corps, l'action de la pesanteur

sur les molécules du corps ne change pas et le poids total, égal à la somme des poids des molécules, reste le même. Si la forme du corps

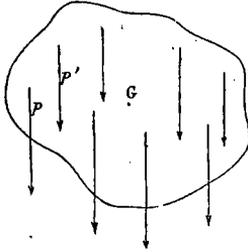


Fig. 54.

est invariable et si la distribution de la matière n'y est pas modifiée, le centre de gravité conserve la même position par rapport au corps, car un centre de forces parallèles ne varie pas de position quand les forces changent de direction sans changer de grandeur ni de point d'application. (25). Si l'intensité de la pesanteur vient elle-même à varier, ce qui arrive lorsque le corps est porté dans un lieu différent, toutes les forces

parallèles appliquées aux molécules sont altérées dans le même rapport et le centre des forces parallèles ou le centre de gravité conserve encore la même position.

93. Détermination géométrique du centre de gravité. — La position du centre de gravité dans un corps homogène (où la matière présente en tous les points la même constitution physique et est uniformément distribuée) ne dépend que de sa forme. Des corps de formes semblables ont leurs centres de gravité semblablement placés.

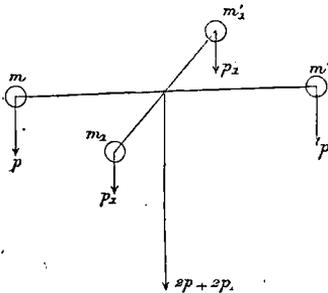


Fig. 55.

Pour un corps homogène de forme géométrique, la recherche du centre de gravité est un problème de géométrie ou de calcul.

Quand il y a dans un corps homogène un *centre de symétrie*, ce point est le centre de gravité; en effet, le corps peut alors être décomposé en groupes de deux masses égales m et m' , m_1 et m'_1 ... également

distantes de ce point O et sollicitées par des forces égales qui se composent en une seule appliquée en ce point (fig. 55). D'après cela, le centre de gravité d'une sphère est son centre; le centre de gravité d'un cylindre à base circulaire est le milieu de la droite qui joint les centres des deux bases; le centre de gravité d'un parallépipède est le point de concours des diagonales.

Une surface, une ligne pesante ont un centre de gravité puisque chaque petite partie de la surface ou de la ligne est pesante. Dans un

cercle, le centre de gravité est le centre; dans un rectangle, c'est le point de concours des diagonales.

Le centre de gravité n'est pas un point ayant une existence propre, il en est de même du poids du corps; ce qui existe, ce sont les poids des molécules du corps. Il est toutefois commode de supposer toutes les actions de la pesanteur remplacées par une seule force appelée le poids du corps et appliquée au centre de gravité et comme on peut annuler l'action de plusieurs forces en contrebalançant l'action de la résultante, on fera équilibre au poids de toutes les molécules en appliquant au corps de bas en haut une force égale à leur somme et passant par le centre de gravité.

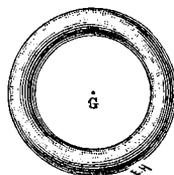


Fig. 56.

Lorsque le centre de gravité d'un corps ne fait pas partie de la masse de ce corps, comme dans le cas d'une sphère creuse ou d'un anneau (fig. 56), il faut que ce point soit relié au corps pour que le poids qu'on y suppose appliqué produise le même effet que l'ensemble des forces agissant sur les molécules.

94. Détermination expérimentale du centre de gravité. — *Un corps pesant est en équilibre si son centre de gravité est soutenu.* On déduit de là une méthode physique de détermination du centre de gravité d'un corps quelconque.

Quand on suspend le corps par un de ses points A à l'extrémité d'un fil flexible, le poids du corps ne peut être annulé que si la verticale du centre de gravité passe par le point de suspension B; le centre de gravité G se trouve donc sur le prolongement du fil. Il en sera de même si l'on soutient le corps par un autre point C. Le centre de gravité se trouvera donc au point d'intersection des deux directions (fig. 57).

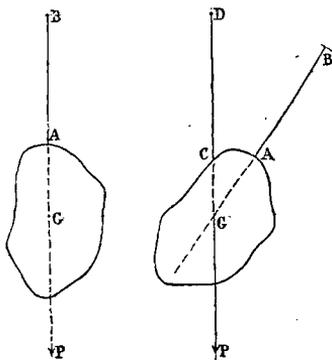


Fig. 57.

95. Équilibre d'un corps solide mobile autour d'un axe ou d'un point fixe. — Il faut pour l'équilibre que le centre de gravité soit soutenu, c'est-à-dire que la verticale menée par ce point passe par l'axe fixe.

Cet équilibre a trois manières d'être : 1° Il est *stable*, lorsque le centre de gravité est au-dessous de l'axe (fig. 58); le corps écarté un peu de sa position d'équilibre *y est ramené* par l'action de son poids,

le centre de gravité tendant toujours à descendre. 2° Il est *instable* lorsque le centre de gravité est au-dessus de l'axe (fig. 59); si dans ce cas le corps est tant soit peu dérangé de sa position d'équilibre, il

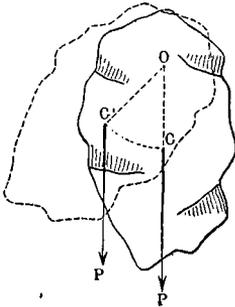


Fig. 58.

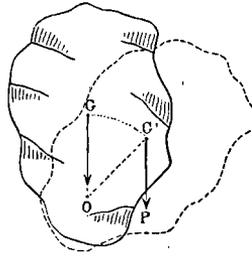


Fig. 59.

s'en éloigne sans retour par l'action de son poids. Le centre de gravité est descendu et ne peut remonter de lui-même. 3° Il est *indifférent* lorsque l'axe passe par le centre de gravité, car le poids du corps est alors annulé par la résistance de l'axe dans toutes les positions possibles. Le centre de gravité ne descend alors ni ne monte dans le mouvement du corps.

96. Équilibre d'un corps solide reposant sur un plan résistant horizontal. — S'il n'y a qu'un point de contact avec le plan, il faut pour l'équilibre que la verticale menée par le centre de gravité rencontre le plan horizontal au point d'appui.

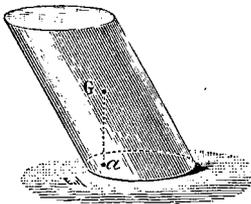


Fig. 60.

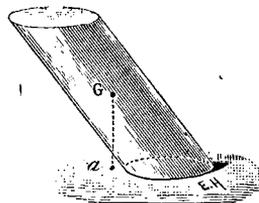


Fig. 61.

Si le corps solide repose sur un plan horizontal par un certain nombre de points, il faut pour l'équilibre que la verticale menée par le centre de gravité tombe à l'intérieur du polygone convexe formé en réunissant les points d'appui (fig. 60).

L'équilibre est d'autant plus stable que ce polygone dit **polygone de sustentation** est plus étendu et que le centre de gravité est plus bas.

Si la verticale du centre de gravité vient à rencontrer le plan d'appui en a , en dehors du *polygone de sustentation* (fig. 61), le corps tombe du côté où le pied de la verticale rencontre le plan.

Ces propositions trouvent leur application dans l'équilibre du corps humain, dans la construction et le chargement des voitures, etc.

LOIS DE LA CHUTE DES CORPS

97. Première loi. — **Chute dans le vide.** — *En un même lieu tous les corps tombent également vite dans le vide.*

98. Deuxième loi. — **Loi des espaces.** — *Les espaces parcourus par un corps qui tombe librement dans le vide en partant du repos sont proportionnels aux carrés des temps employés à les parcourir.*

99. Troisième loi. — **Loi des vitesses.** — *Les vitesses acquises par un corps qui tombe librement dans le vide sont proportionnelles aux temps.*

Les deux dernières lois caractérisent un *mouvement uniformément accéléré*. Elles ne sont pas distinctes, car l'une est la conséquence de l'autre (5). Elles sont exprimées par les équations

$$e = \frac{1}{2}gt^2 \quad v = gt$$

Ces relations algébriques montrent que l'accroissement constant de vitesse par seconde ou l'*accélération* qu'on représente par la lettre g est le double de l'espace parcouru pendant la première seconde de chute. A Paris, g est égal à 981 centimètres.

Si l'on tire t de la première équation, et si l'on substitue sa valeur dans la deuxième, on obtient v en fonction de e (5); $v = \sqrt{2ge}$ est la vitesse acquise par un corps qui tombe, dans le vide, sans vitesse initiale, d'une hauteur e : elle est proportionnelle à la racine carrée de la hauteur de chute.

Nous savions déjà qu'un corps suit en tombant une direction

verticale et que par conséquent le poids d'un corps est une force *constante en direction* en un lieu déterminé. De ce que le mouvement est uniformément accéléré, il résulte que le poids d'un corps est une *force constante en grandeur* pendant la durée de la chute ⁽¹⁾.

L'accélération g étant la même pour tous les corps d'après la première loi, le poids qui sollicite dans sa chute un corps de masse m est exprimé par $p = mg$ (35), le poids d'un corps de masse m' est $p' = m'g$.

$$\text{On en déduit } \frac{p}{p'} = \frac{m}{m'}.$$

Les masses de deux corps en un même lieu sont donc proportionnelles à leurs poids (35).

VÉRIFICATIONS EXPÉRIMENTALES



Fig. 62.

100. PREMIÈRE LOI. Chute dans le vide. — Des corps de nature et de formes diverses tombent inégalement vite dans l'air; la différence est manifeste pour une balle de plomb et une feuille d'or. Ces inégalités dans la durée de la chute proviennent de la résistance de l'air.

Pour montrer que tous les corps tombent également vite dans le vide, on prend un grand tube cylindrique en verre ayant environ 2 mètres de hauteur et 7 à 8 centimètres de diamètre (fig. 62); ce tube est terminé à ses deux extrémités par deux garnitures métalliques dont l'une se prolonge par un robinet que l'on peut visser sur une machine pneumatique. On a introduit dans le tube des corps différents : une balle de plomb, un morceau de liège, une feuille d'or, une barbe de plume. On fait le vide, puis on retourne brusquement le tube; tous les corps qu'il contient tombent et arrivent en même temps à l'extrémité inférieure. En laissant rentrer un peu d'air et en retournant le tube, la rapidité de la chute devient inégale, les corps les plus légers sont en retard; le retard

(1) On démontre encore que le poids d'un corps est une force continue et constante en suspendant ce corps à un dynamomètre : il y a flexion, cette flexion persiste et reste constante.

est d'autant plus accentué qu'on a laissé rentrer l'air plus complètement⁽¹⁾.

La vitesse communiquée par la pesanteur à un corps qui tombe est donc la même au même instant et en un même lieu pour tous les corps.

Tous les corps tombant également vite dans le vide, les lois du mouvement de chute des corps peuvent être étudiées avec un corps quelconque. A cause de la difficulté d'opérer dans le vide, on opère dans l'air, mais dans des conditions où la résistance de l'air n'a pas d'effet appréciable. Les résultats obtenus se rapprochent alors de ceux que donnerait la chute dans le vide.

101. DEUXIÈME LOI. Loi des espaces. — La rapidité croissante de la chute d'un corps rend difficile l'observation précise de l'espace parcouru dans un temps donné, car une petite erreur dans la mesure du temps entraîne une erreur notable dans la mesure de l'espace. On s'est proposé de *ralentir* le mouvement sans en changer la loi ; ce ralentissement facilite les observations, en outre comme la résistance de l'air décroît rapidement quand la vitesse diminue, la diminution de la vitesse du mobile réduit la résistance de l'air.

Plan incliné de Galilée. — Galilée employait un plan incliné le long duquel la chute avait lieu. Le frottement est rendu très faible avec une bille qu'on laisse rouler sur le plan.

Figurons la section du plan incliné par un plan perpendiculaire à son intersection avec le plan horizontal (fig. 63). L'angle BAC est l'angle plan du dièdre formé par le plan incliné avec le plan horizontal, BA est la *ligne de plus grande pente*.

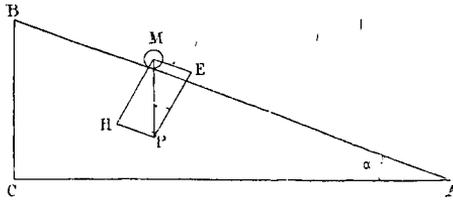


Fig. 63.

(1) La force qui fait tomber dans le vide l'ensemble des molécules d'un corps, est son poids : il est proportionnel à la masse du corps. La force qui le fait tomber dans l'air est la *différence entre son poids dans le vide et la résistance de l'air*. Pour une même forme extérieure et une même vitesse, cette résistance est la même ; elle est donc une fraction d'autant plus importante du poids que la masse du corps est plus petite. Lorsque le corps qui tombe n'a pas une grande densité et offre une surface étendue, la résistance de l'air n'est pas négligeable et la loi de la chute devient très complexe. La résistance de l'air permet le vol des oiseaux, la descente lente des parachutes utilisés autrefois par les aéronautes.

Soit M la bille. D'après la règle du parallélogramme des forces, le poids MP peut être décomposé en deux forces MH et ME , l'une perpendiculaire et l'autre parallèle au plan incliné.

L'effet de la composante MH est annulé par la résistance du plan, la composante ME agit seule sur la masse pour la faire descendre.

Les triangles MPE , BAC ayant leurs angles égaux sont semblables ; on a donc

$$\frac{ME}{MP} = \frac{BC}{BA} \quad \text{d'où} \quad ME = MP \frac{h}{l};$$

h représentant la hauteur et l la longueur du plan.

[α] ME est constant comme MP , le mouvement n'est donc pas modifié dans sa nature. Le mouvement est d'autant plus ralenti que ME est plus petit, or ME est une fraction de MP d'autant plus petite que la hauteur est plus faible pour une même longueur du plan ou que l'angle BAC est plus faible ($\frac{h}{l} = \sin \alpha$).

On constate que les espaces parcourus sont 1, 4, 9 pour des temps 1, 2, 3 ; ils sont donc proportionnels aux carrés des temps.

102. Machine d'Atwood. — En chute libre, la force qui entraîne la

masse d'un corps est le poids de ce corps. Dans la machine d'Atwood, on réduit la force agissante *en employant le poids du corps à entraîner, outre sa masse, une masse beaucoup plus considérable que la sienne*. On conçoit que la nature du mouvement ne change pas, puisque la force est encore la pesanteur, la masse mise en mouvement est seule différente.

La machine d'Atwood se compose d'une colonne au sommet de laquelle est disposée une poulie très légère R , à gorge creuse, mobile autour d'un axe horizontal. Sur la poulie s'enroule un fil de soie inextensible et très fin supportant à ses extrémités deux masses égales M (fig. 64). Le poids du fil étant négligeable, les poids des

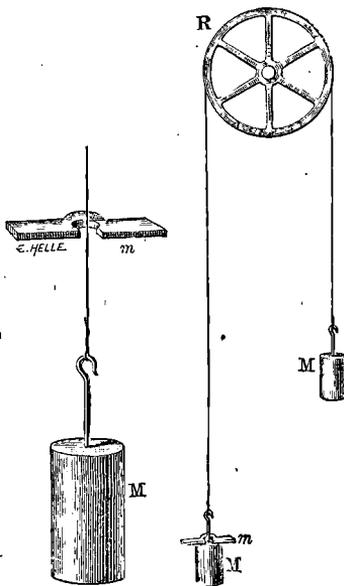


Fig. 64.

deux masses se font équilibre dans toutes les positions du fil. Mais

si l'on charge l'une des masses d'une masse additionnelle m , le poids de cette masse entraîne le système. En chute libre, ce poids n'entraînerait que sa propre masse m , ici il entraîne l'ensemble $2M + m$. Son mouvement est donc ralenti.

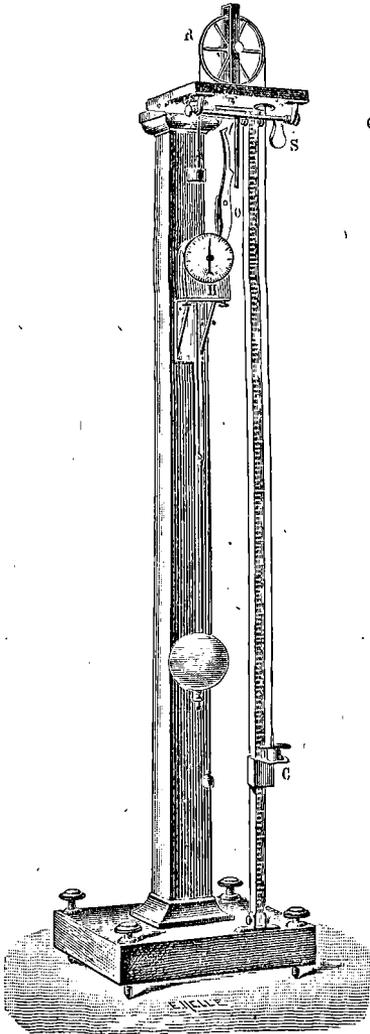


Fig. 66.



Fig. 65.

Marche des expériences. — La masse qui descend se meut parallèlement à une règle verticale divisée en centimètres, le long de laquelle on peut fixer à diverses hauteurs avec une vis de pression (fig. 65) un curseur métallique plein C. Une horloge à secondes H munie d'un cadran fait partie de l'appareil et sert à compter le temps (fig. 66).

Pour mesurer l'espace parcouru pendant un temps donné, on remonte la masse $M + m$ et on maintient sa base inférieure en face du zéro de la règle divisée. Par une disposition spéciale⁽¹⁾, le système

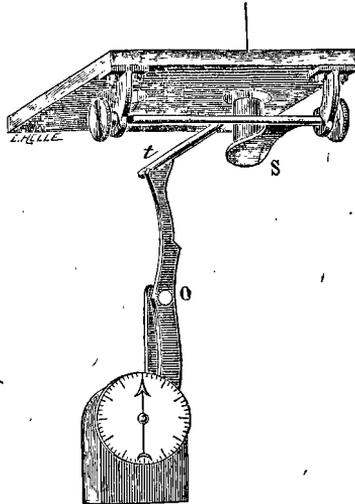


Fig. 67.

(1) L'axe qui soutient la plate-forme S (fig. 67) fait corps avec une tige t qui repose sur un butoir recourbé, mobile autour du point O. Par suite d'un léger mouvement de

$M + m$ cesse d'être soutenu au moment où le battement de l'horloge marque le commencement de la seconde du zéro du cadran. Après quelques tâtonnements, on parvient à placer le curseur en un point de la règle tel qu'on entende simultanément le battement de l'horloge commençant la deuxième seconde et le choc de la masse sur le curseur.

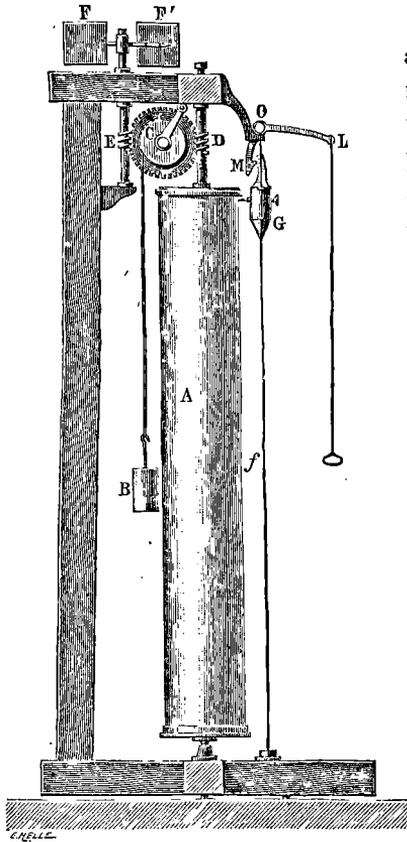


Fig. 68.

On ramène le système $M + m$ au zéro, on recommence l'expérience, et on cherche à quelle division il faut placer le curseur plein pour que le poids vienne le frapper après deux secondes de chute.

On mesure ainsi les espaces e_1, e_2, e_3, e_4 parcourus en 1, 2, 3, 4 secondes. Les espaces parcourus sont proportionnels aux carrés des temps.

Supposons l'espace parcouru après une seconde égal à 10 centimètres :

$$e_1 = 10, \quad e_2 = 10.4,$$

$$e_3 = 10.9, \quad e_4 = 10.16$$

103. Appareil Morin. — L'appareil du général Morin est un appareil à indications continues qui permet la vérification directe des lois de la chute libre (fig. 68).

Description. — Cet appareil se compose d'un cylindre de bois A

de 2 mètres environ de hauteur, rendu vertical à l'aide de vis calantes et pouvant recevoir d'un mécanisme d'horlogerie un mouvement de rotation uniforme autour de son axe, de manière qu'un point de la circonférence de sa base tourne d'arcs égaux dans des temps égaux.

rotation de ce butoir qui a lieu au moment où l'aiguille du cadran passe au zéro, la tige t cesse d'être soutenue et entraîne l'axe en tombant. Celui-ci tourne en faisant basculer la plate-forme.

En regard du cylindre tournant uniformément⁽¹⁾ on laisse tomber une masse cylindro-conique en fer G, portant un crayon horizontal H dont la pointe est pressée légèrement par un petit ressort contre la surface du cylindre recouverte d'une feuille de papier. Cette masse est munie d'oreilles o, o' glissant sur des fils d'acier verticaux f bien tendus qui la guident dans sa chute (fig. 69).

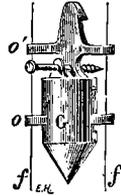


Fig. 69.

Courbe tracée sur le cylindre. — La masse étant maintenue immobile devant le cylindre tournant, le crayon trace sur la surface du cylindre une circonférence. Si la masse tombe devant le cylindre en repos, le crayon trace une ligne verticale suivant une arête du cylindre. Lorsque le cylindre tourne pendant la chute de la masse, le crayon rencontre les génératrices successives du cylindre en des points de plus en plus bas et trace sur sa surface une courbe dont l'étude fait connaître la nature du mouvement de chute.

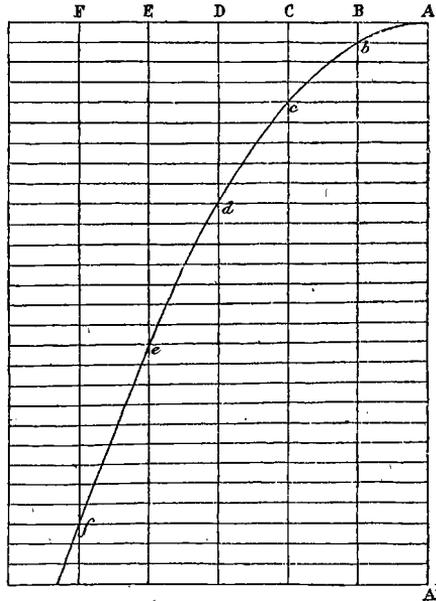


Fig. 70.

Supposons prises sur la circonférence de la base supérieure du cylindre des longueurs égales AB, BC, CD, DE; elles représentent des arcs égaux décrits dans des temps égaux entre eux pendant le mouvement uniforme du cylindre. Menons

(1) Dans les cours, la rotation du cylindre s'obtient par la chute d'un poids B suspendu à une corde enroulée sur un treuil C. La corde en se déroulant fait tourner une roue dentée qui engrène à la fois par des vis sans fin D et E avec l'axe du cylindre et avec un autre axe muni de quatre ailettes F. Les ailettes entraînées frappent l'air avec une vitesse croissante et éprouvent une résistance qui augmente rapidement avec cette vitesse. Le mouvement du cylindre est d'abord accéléré parce qu'il est produit par la chute d'un poids, mais à un certain moment la résistance opposée par l'air fait équilibre au poids qui est constant, alors le poids cesse d'accélérer le mouvement, et conformément au principe de l'inertie le cylindre garde la vitesse qu'il avait acquise et son mouvement est devenu uniforme. Ce résultat est obtenu quand le poids moteur a parcouru à peu près les trois quarts de sa course. C'est à ce moment qu'on fait tomber la masse cylindro-conique G à l'aide du levier LOM dont on abaisse la longue branche à l'aide d'un cordon.

par les points de division B, C, D, E des génératrices équidistantes : la courbe tracée par le crayon les rencontre à des distances de la circonférence de la base supérieure qui représentent les hauteurs de chute après des temps 1, 2, 3, 4...

On détache du cylindre la feuille de papier qui le recouvrait, après l'avoir coupée suivant la génératrice verticale AA' qui passe par le point de départ du crayon et on la déroule sur un plan (fig. 70). La droite AF perpendiculaire à AA' est le développement de la circonférence de base du cylindre, les longueurs Bb, Cc, Dd... hauteurs de chute après des temps 1, 2, 3... sont représentées par les nombres 1, 4, 9, 16...; $Cc = 4 Bb$, $Dd = 9 Bb$...

La longueur des verticales Bb, Cc... croît donc proportionnellement aux carrés des temps ou proportionnellement aux carrés des longueurs AB, AC. Cette propriété définit la courbe appelée *parabole*. La forme parabolique du tracé prouve donc la loi des espaces.

Le poids et la forme de la masse qui tombent rendent l'effet de la résistance de l'air entièrement négligeable, du moins pour cette petite hauteur de chute. Le poids qui tombe est assez fort pour que le faible frottement du crayon sur le papier n'apporte aucune perturbation.

104. TROISIÈME LOI. Loi des vitesses. — La loi des espaces étant vérifiée, il n'est pas besoin de nouvelles expériences pour vérifier la loi des vitesses, puisque l'une des deux lois est une conséquence de l'autre (5). Nous allons cependant indiquer comment on vérifie la loi des vitesses avec la machine d'Atwood.

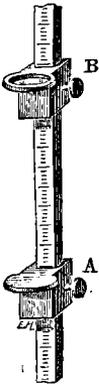


Fig. 71.

Conformément au principe de l'inertie, si la force qui agissait sur un mobile cesse d'agir, celui-ci continue à se mouvoir, mais uniformément, et la vitesse de ce mouvement uniforme est la vitesse du mouvement varié au moment où l'action de la force a été supprimée.

On obtient d'après cela les vitesses acquises par le système à différents instants en arrêtant par un curseur annulaire B, après 1, 2, 3 secondes de chute, la masse additionnelle m qui a une forme allongée; la masse M continue à descendre d'un mouvement uniforme; on l'arrête à son tour, à l'aide du curseur plein A, exactement une seconde après l'arrêt de la masse additionnelle par le curseur annulaire. La distance AB des deux curseurs (fig. 71) représente la vitesse du système mobile au moment où le poids additionnel a été supprimé.

On mesure ainsi les vitesses v_1, v_2, v_3, \dots du système mobile après 1, 2, 3 secondes de chute, et on constate que *les vitesses sont proportionnelles aux temps* : $v = \gamma t$.

105. Accélération dans la machine d'Atwood. — Les différences successives $v_2 - v_1, v_3 - v_2, v_4 - v_3$ sont les accroissements de vitesse pendant les secondes successives; ces accroissements sont égaux, ils représentent l'accélération γ .

Cette accélération γ est aussi, pour un même poids additionnel, le double de l'espace parcouru pendant la première seconde de chute.

Les deux lois du mouvement de chute dans la machine d'Atwood sont formulées par les équations : $e = \frac{1}{2} \gamma t^2, v = \gamma t$.

Si l'on fait *crotter la masse additionnelle*, la loi des espaces et la loi des vitesses restent les mêmes, γ augmente, mais le mouvement de chute reste un mouvement uniformément accéléré.

Dans la chute libre du poids p , γ prend la valeur g , d'où les deux équations : $e = \frac{1}{2} g t^2, v = g t$.

106. Calcul de g . — De l'accélération γ du mouvement ralenti dans la machine d'Atwood, on peut déduire l'accélération g relative à la chute libre.

La force p communique l'accélération γ à la masse $2M + m$; on a donc : $p = (2M + m) \gamma$ (35).

En tombant librement et seule, la masse m prendrait par l'action de son poids p une accélération g , par suite $p = mg$. On a donc $mg = (2M + m) \gamma$, d'où $g = \frac{2M + m}{m} \gamma = \frac{2P + p}{p} \gamma$, P et p étant les poids des masses M et m , d'après la proportionnalité des masses aux poids ⁽¹⁾.

L'appareil Morin donnerait la valeur de g en déterminant le nombre

(1) La poulie est également entraînée par la chute du poids p ; bien qu'elle soit légère, il n'est pas permis de n'en pas tenir compte. Dans un calcul approché négligeons la masse de l'axe et des rayons de la poulie, appelons μ et $\bar{\omega}$ la masse et le poids de sa circonférence, la masse μ s'ajoute directement à la masse entraînée; par suite

$$g = \frac{\mu + 2M + m}{m} \gamma = \frac{\bar{\omega} + 2P + p}{p} \gamma.$$

de tours du cylindre par seconde⁽¹⁾; on pourrait alors mesurer la hauteur de chute après une seconde : elle est égale à $\frac{g}{2}$.

Le nombre g se déterminera avec plus de précision à l'aide du pendule.

107. Vérification de la proportionnalité des forces aux accélérations au moyen de la machine d'Atwood. — On fait agir successivement sur une même masse différentes forces constantes; à cet effet, on dispose de plusieurs masses additionnelles de même poids p . Plaçons cinq de ces masses sur l'une des deux masses M ; les masses suspendues aux deux extrémités du fil seront :

$$M, \text{ et } M + 5m : \text{force motrice } 5p;$$

Changeons de côté une masse m , la masse totale à mouvoir restant la même, nous avons une nouvelle distribution des masses :

$$M + m, \text{ } M + 4m : \text{force motrice } 3p.$$

Après un nouveau transport d'une masse m , les masses seront :

$$M + 2m, \text{ } M + 3m : \text{force motrice } p.$$

L'expérience fait voir qu'aux forces $5p, 3p, p$ entraînant une masse constante $2M + 5m$, correspondent des accélérations $5\gamma', 3\gamma'$ et γ' .

$$\text{On a donc } \frac{F}{\gamma} = \frac{F'}{\gamma'}.$$

Applications. — 1° Soient deux points distants de 1 kilomètre à la surface de la Terre supposée parfaitement sphérique: quel sera l'angle ω des verticales en ces deux points? Le rayon de la Terre sera pris égal à 6000 kilomètres.

2° Mouvement d'un corps lancé de bas en haut: Hauteur à laquelle le corps s'arrête. Durée de la descente. Vitesse au bas de la chute.

3° Quel est le temps employé par un corps pour tomber d'une hauteur verticale de 25 mètres en suivant un plan incliné dont l'angle avec l'horizontale est de 30°?

4° Une pierre met 3 secondes à tomber au fonds d'un puits; quelle est la profondeur e de ce puits, et quelle est la vitesse v de la pierre au bas de sa chute?

5° Les deux masses d'une machine d'Atwood pèsent chacune 20 grammes; on charge l'une avec 1 gramme; quelle sera l'accélération de la chute en un lieu où $g = 981$?

(1) Ce nombre de tours pourrait être obtenu en faisant vibrer devant le cylindre un diapason dont le nombre n de vibrations simples par seconde est connu. Ce diapason est muni d'un style qui fait un tracé sur la circonférence de base du cylindre; d'après le nombre K de sinuosités comprises entre deux génératrices, on calcule la durée $\frac{K}{n}$ de la chute entre ces deux génératrices.

6° Au moyen d'une machine d'Atwood on fait agir un poids de 10 grammes pour entraîner une masse totale de 500 grammes, et on trouve une accélération de 19 centimètres par seconde. Quelle serait la valeur de g ?

7° Deux corps tombent d'une même hauteur de 50 mètres à une seconde d'intervalle. Quelle sera leur distance d quand le premier touchera le sol ?

8° Les deux masses égales dans une expérience faite avec la machine d'Atwood, sont de 100 grammes : quelle doit être la masse additionnelle x pour qu'après 4 secondes, la vitesse soit de 200 centimètres ?

9° De quelle hauteur h doit tomber une pierre pour avoir en arrivant au sol une vitesse de 100 mètres ?

10° Soit un plan incliné dont la hauteur est 10 mètres et dont la ligne de plus grande pente a 50 mètres ; calculer l'accélération dans la chute sur le plan incliné. On prendra $g = 981$.

PENDULE

108. Un pendule est un corps pesant mobile autour d'un axe fixe horizontal, appelé axe de suspension, qui ne passe pas par son centre de gravité. Un balancier d'horloge, un fléau de balance sont des pendules.

On appelle **pendule simple** un pendule idéal formé par un point matériel pesant A suspendu à l'une des extrémités d'un fil inextensible et sans poids ; l'autre extrémité du fil est soutenue par un point fixe. C'est un pendule *irréalisable*, mais sa conception est utilisée pour établir théoriquement les lois du mouvement pendulaire. Tout autre pendule est appelé **pendule composé**. On ne peut expérimenter que sur un pendule composé.

109. **Mouvement pendulaire.** — *Le mouvement d'un pendule est déterminé par son poids.* Considérons d'abord un pendule simple, oscillant dans le vide et n'exerçant aucun frottement contre son point d'appui. Lorsque le fil est vertical, le poids du point A agissant suivant la direction même du fil est détruit par la résistance du point d'appui O, et il y a équilibre.

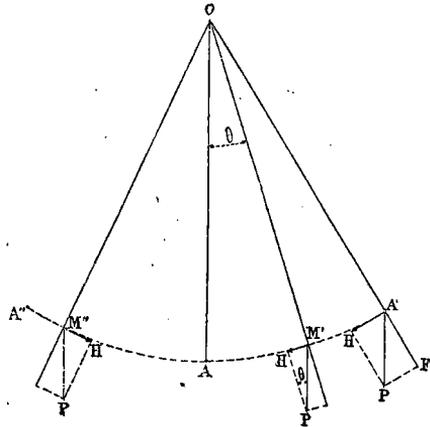


Fig. 72.

Écartons le pendule de sa position d'équilibre OA et amenons-le en

OA' (fig. 72) ; si on l'abandonne, il exécute des oscillations autour de OA dans un plan vertical invariable. En effet, le poids $A'P$ de la molécule se décompose, suivant la règle du parallélogramme, en deux composantes $A'F$ et $A'H$ dans le plan $PA'O$ ou $A'OA$. La composante $A'F$, dirigée suivant le prolongement du fil, a pour effet de le tendre ; la composante perpendiculaire $A'H$ produit le mouvement du point. La force $A'P$ et sa composante $A'F$ se trouvant dans le plan vertical AOA' , c'est dans ce plan AOA' que se trouve toujours la composante $A'H$, le point A' reste dans ce plan et y décrit une circonférence de centre O ⁽¹⁾.

Supposons le poids descendu en M' , et soit θ l'angle d'écart AOM' ; $M'P$ étant égal à mg , on a $M'H = mg \sin \theta$: cette composante décroît avec l'angle d'écart. Quand le point matériel est arrivé en A , la force qui agit sur lui est devenue nulle, mais il ne s'arrête pas, car il a une vitesse acquise, égale à la somme des vitesses qui lui ont été communiquées par la composante efficace $M'H$ dans sa chute de A' en A . En vertu de sa vitesse acquise, le point matériel s'élèvera de l'autre côté, mais, de ce côté, la composante tangentielle agit en sens contraire du mouvement et dans une position quelconque symétrique de M' , pendant un même intervalle de temps très petit, elle diminue la vitesse d'une quantité précisément égale à celle dont elle l'a augmentée en M' . La totalité de la vitesse imprimée par la pesanteur de A' en A sera annulée quand le point matériel se sera élevé jusqu'en A'' , point symétrique de A' par rapport à la verticale. En A'' la vitesse est nulle. De A'' la molécule redescendra jusqu'en A , remontera en A' et exécutera autour de la verticale OA une série indéfinie d'oscillations d'égale amplitude et par suite d'égale durée ⁽²⁾.

(1) Le mouvement est le même que si la rotation s'effectuait autour d'un axe fixe perpendiculaire au plan AOA' .

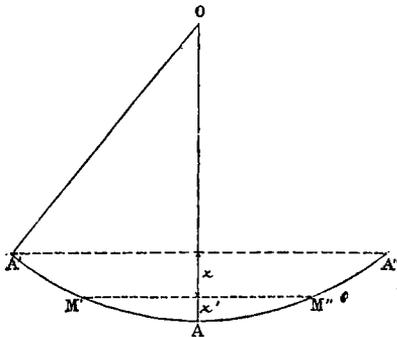


Fig. 73.

(2) Le mouvement pendulaire nous donne un exemple d'une transformation d'énergie potentielle en force vive ou énergie de mouvement (57), et inversement.

Ainsi, dans une position A' (fig. 73), le point matériel partant du repos a une énergie potentielle maximum et une force vive nulle ; à mesure qu'il descend, son énergie potentielle diminue et sa force vive augmente, mais la somme reste constante. En M' l'énergie potentielle a diminué de mgz et le mobile a acquis une force vive $\frac{1}{2}mv^2$ égale à mgz .

De A' en A la diminution d'énergie potentielle a été $mg(z + z')$ et la force

L'angle d'écart maximum $A''OA$ s'appelle l'*amplitude*. L'*oscillation simple* est le passage d'une position extrême A'' à une autre position extrême consécutive A' . L'*oscillation complète* comprend deux oscillations simples, de sens opposés, de A'' en A' , avec retour de A' en A'' .

110. Durée de l'oscillation simple. — L'étude mathématique du mouvement du pendule simple conduit pour la durée en secondes de l'oscillation simple, dans le cas des oscillations d'*amplitude très petite*, à la formule

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

indépendante de l'amplitude; l est la longueur OA du pendule, g est l'accélération de la pesanteur ou la vitesse acquise en une seconde par un corps qui tombe en chute libre dans le vide; l et g sont exprimés avec la même unité de longueur; π est le rapport de la circonférence au diamètre.

Si l'amplitude n'est plus très petite, la durée de l'oscillation croît avec l'amplitude; elle s'obtient en multipliant $\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$ par un facteur qui ne dépend que de l'amplitude.

Elle est donnée par la formule :

$$t = \pi \sqrt{\frac{l}{g}} \left[1 + \left(\frac{1}{2}\right)^2 \sin^2 \frac{\alpha}{2} + \left(\frac{1.3}{2.4}\right)^2 \sin^4 \frac{\alpha}{2} + \left(\frac{1.3.5}{2.4.6}\right)^2 \sin^6 \frac{\alpha}{2} + \dots \right]$$

qui se réduit, lorsque l'angle α est suffisamment petit, à :

$$\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \left(1 + \frac{\alpha^2}{16} \right)$$

La parenthèse est extrêmement petite si l'angle initial d'écart α ne dépasse pas 5° ou 6° ; si l'amplitude atteint 10° , l'erreur commise en négligeant la parenthèse n'est encore que $\frac{1}{2000}$ environ de la durée.

111. Le mouvement d'un pendule est un mouvement oscillatoire périodique. Pour obtenir sa courbe représentative (8), on convient

vive acquise a pris la même valeur. De A en M'' la force vive a diminué, mais l'énergie potentielle s'est accrue d'une quantité égale mgz' . En A'' l'énergie potentielle a repris la valeur qu'elle avait en A' et la force vive est nulle.

de porter les ordonnées au-dessus ou au-dessous de l'horizontale XX' , suivant que le mobile se trouve à droite ou à gauche de sa position moyenne. Les espaces AA' , AA'' (fig. 72) de la trajectoire sont égaux, parcourus dans le même temps; comme il en est de même pour des points symétriquement placés par rapport à la position d'équilibre A , la courbe représentative sera formée de parties égales situées au-dessus et au-dessous de XX' .

Aux époques b, c, d de la ligne des abscisses (fig. 74), le mobile passe par sa position d'équilibre. A partir de b sa distance augmente, elle est

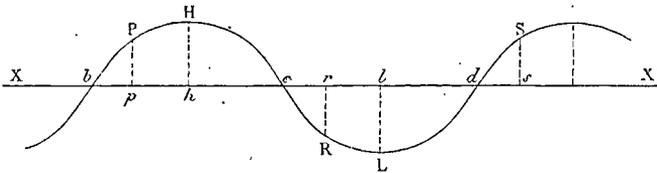


Fig. 74.

maximum en H , puis elle diminue pour redevenir nulle en c ; alors le mouvement change de sens, le maximum de distance à gauche correspond au point figuratif L , puis le mobile revient et l'ordonnée diminue en valeur absolue jusqu'en d .

La distance bd est égale à la période $2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$; la période est aussi la distance ps qui sépare deux ordonnées égales correspondant à deux positions identiques du mobile. A deux époques distantes d'une demi-période, les ordonnées Pp, Rr sont égales et de signes contraires.

La courbe représentative dans le cas d'un mouvement pendulaire s'appelle une **sinusoïde**.

112. Lois du pendule simple. — Les lois du pendule se déduisent de l'expression de la durée d'oscillation.

Première loi. — *Pour de très petites amplitudes et dans un même lieu, la durée des oscillations d'un même pendule est constante, malgré les variations de l'amplitude.* C'est la loi de l'**isochronisme** des petites oscillations pendulaires. En effet, l'expression de la durée de l'oscillation ne dépend pas de l'amplitude, puisque l'amplitude n'y entre pas.

Deuxième loi. — *Pour des pendules de même longueur, la durée de l'oscillation en un même lieu ne dépend ni de la substance du point matériel ni de sa masse.* L'expression de la durée de l'oscillation

$$t = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}} \quad \frac{t}{2} = \pi\sqrt{\frac{l}{g}}$$

en est en effet indépendante, car g a la même valeur pour tous les corps (100).

Troisième loi. — *En un même lieu, les durées des oscillations de pendules de longueurs différentes varient proportionnellement aux racines carrées des longueurs de ces pendules. On a en effet, puisque g est constant :*

$$\frac{t}{t'} = \frac{\sqrt{l}}{\sqrt{l'}}$$

Quatrième loi. — *Dans les localités différentes, les durées des oscillations de pendules de même longueur varient en raison inverse des racines carrées des accélérations de la pesanteur.*

$$\frac{t}{t'} = \frac{\sqrt{g}}{\sqrt{g'}}$$

113. Pendule composé. — Un pendule simple ne peut être réalisé, tout pendule est un pendule composé.

Soit un pendule composé (fig. 75), dont l'axe de suspension se projette en O, et dont le centre de gravité est en G. Ce pendule, abandonné à lui-même, prend une position d'équilibre stable quand la verticale OG menée par le centre de gravité rencontre l'axe de suspension. En effet, le poids du pendule peut être supposé appliqué au centre de gravité, et si la verticale menée par le centre de gravité rencontre l'axe, la résistance de cet axe détruit l'action du poids. Écartons le pendule de sa position d'équilibre et supposons le centre de gravité en G'; le poids du pendule peut être décomposé en deux composantes dans le plan vertical PG'O perpendiculaire à l'axe : la composante G'F dont le prolongement rencontre l'axe est sans effet, la composante perpendiculaire G'H produit le mouvement ; le centre de gravité décrit une circonférence dans le plan vertical PG'O. La composante G'H va en décroissant à mesure que l'angle d'écart diminue, elle est nulle quand la verticale qui passe par le centre de gravité passe en O, mais le pendule continue son mouvement en vertu de la vitesse acquise. Comme pour un pendule simple, le mouvement est un mouvement oscillatoire autour de la position d'équilibre OG.

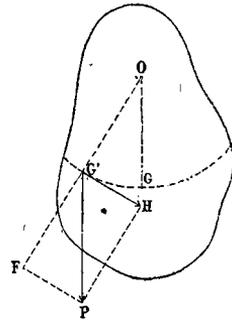


Fig. 75.

On démontre en mécanique que le mouvement oscillatoire d'un pendule composé est identique à celui d'un pendule simple de longueur déterminée. Il a donc la même durée d'oscillation que ce pendule simple qui est appelé **pendule synchrone** du pendule composé ⁽¹⁾.

La durée de l'oscillation simple d'un pendule quelconque dans le vide est donc représentée dans le cas des oscillations très petites par $\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$, où l désigne la longueur du pendule simple synchrone.

Les lois du pendule simple se vérifieront pour un pendule quelconque, mais il faut entendre par *longueur du pendule composé* la longueur du pendule simple synchrone.

VÉRIFICATION EXPÉRIMENTALE DES LOIS DU PENDULE

114. 1° Isochronisme des petites oscillations. — On fait osciller un pendule quelconque, et quand les oscillations n'ont plus qu'une amplitude de quelques degrés, on compte avec un chronomètre la durée de cent oscillations. On attend ensuite que par l'effet du frottement de l'axe sur son support et de la résistance de l'air, l'amplitude soit réduite environ à la moitié ou au tiers ⁽²⁾, et on mesure de nouveau la durée de cent oscillations : on trouve la même durée que précédemment. Cette loi de l'isochronisme se vérifie avec une perfection d'autant plus grande que les oscillations sont plus petites.

2° Loi de la matière du pendule. — Pour des pendules synchrones de même longueur, la durée de l'oscillation ne dépend pas de la matière du pendule. On vérifierait cette loi avec précision en

(1) Nous pouvons concevoir l'existence d'un pendule synchrone. Considérons en effet les différentes molécules d'un pendule composé, et examinons comment elles devraient osciller si elles formaient séparément des pendules simples reliés à l'axe de suspension. Les molécules plus voisines de l'axe forment des pendules plus courts oscillant plus vite que les molécules éloignées qui forment des pendules plus longs ; tous les points étant solidaires les uns des autres, la durée commune de l'oscillation de l'ensemble sera une durée intermédiaire entre la plus courte et la plus longue. Entre les points voisins de l'axe dont la durée d'oscillation se trouve ainsi accrue et les points éloignés dont la durée d'oscillation se trouve diminuée, il y a des points qui oscilleront comme s'ils étaient isolés ; ces points sont situés sur une droite parallèle à l'axe de suspension et appelée *axe d'oscillation*. On démontre que la distance de l'axe de suspension et de l'axe d'oscillation est la *longueur du pendule simple synchrone*.

(2) Si le pendule n'était soumis qu'à l'action de son poids, l'amplitude des oscillations resterait indéfiniment la même, mais à cause de la résistance de l'air et du frottement de l'axe de suspension sur son support, l'amplitude diminue en réalité peu à peu et le pendule finit par devenir immobile. On constate que l'amplitude des petites oscillations décroît en progression géométrique quand le temps croît en progression arithmétique.

faisant osciller *dans le vide* des pendules homogènes de même forme B, C, D et de mêmes dimensions ; la longueur de leurs pendules synchrones est la même. On prend ordinairement des fils de même longueur soutenant des boules de même diamètre et de diverses substances : plomb, ivoire, etc. *Dans l'air*, la durée de l'oscillation est sensiblement la même si les poids de ces boules sont assez forts pour que l'effet de la résistance de l'air sur leur chute soit négligeable (fig. 76).

3° Loi des longueurs. —

Les durées des oscillations de deux pendules de longueurs différentes sont proportionnelles aux racines carrées des longueurs. L'expression théorique de la longueur du pendule synchrone fait voir que si le pendule est formé d'une sphère pesante de très petit diamètre par rapport à la longueur du fil, la longueur du pendule synchrone est très approximativement la distance du centre de la sphère au point de suspension. On fait d'après cela osciller des pendules constitués par de petites sphères métalliques de même diamètre et dont les longueurs comptées du point de

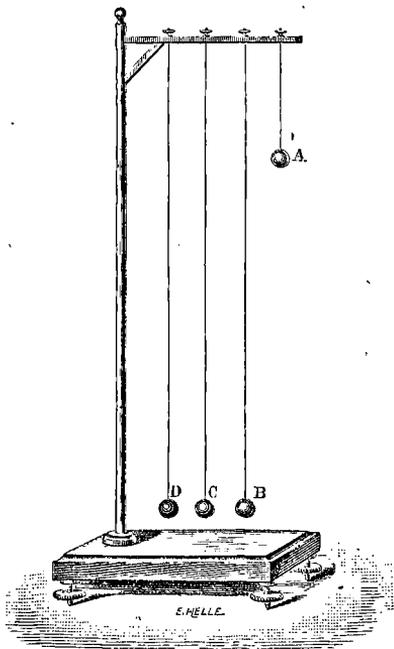


Fig. 76.

suspension au centre des sphères sont entre elles comme les nombres 1, 4, 9... : on constate que les durées d'oscillation croissent comme les nombres 1, 2, 3 ; ainsi, deux pendules B et A (fig. 76) ayant pour longueurs 1 mètre et 25 centimètres, le premier fait une oscillation pendant que le deuxième en fait deux.

4° Loi des accélérations. — La durée d'oscillation d'un même pendule varie en raison inverse de la racine carrée de l'accélération de la pesanteur. Cette loi conduit à la détermination la plus précise du nombre g ⁽¹⁾.

(1) D'après la formule complète (110), les trois dernières lois se vérifieraient avec une amplitude quelconque pourvu que, dans chaque vérification, l'amplitude fût la même

MESURE DE L'INTENSITÉ DE LA PESANTEUR

115. On se sert du pendule pour la mesure du temps (311). On l'emploie aussi à la détermination de l'intensité de la pesanteur.

D'après la relation $p = mg$, le nombre qui représente l'accélération de la pesanteur en un lieu déterminé représente aussi le poids de l'unité de masse ou l'intensité de la pesanteur. En effet, si l'on fait $m = 1$, on a $p = g$; le poids d'un gramme évalué en dynes est égal à l'accélération de la pesanteur mesurée en centimètres.

Pour déterminer g en un lieu donné, on mesure la durée t d'une oscillation d'un pendule composé et la longueur l du pendule simple synchrone.

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

g et l s'expriment avec la même unité de longueur et t en secondes.

116. Résultats. — 1° En un même lieu, l'accélération de la pesanteur est *inversement proportionnelle au carré de la distance des corps au centre de la Terre*.

Elle diminue si l'on s'élève dans l'atmosphère en un même lieu.

Soit R le rayon de la terre,

h l'altitude,

g' l'accélération à l'altitude h ,

g l'accélération au niveau de la mer,

$$\frac{g'}{g} = \frac{(R + h)^2}{R^2} = 1 + \frac{2h}{R} + \frac{h^2}{R^2} = \text{sensiblement } 1 + \frac{2h}{R}.$$

2° En des localités différentes, la valeur de l'accélération réduite au niveau de la mer dépend de la latitude : elle diminue des pôles à l'équateur ; cette diminution tient à la forme de la terre (ellipsoïde de révolution légèrement aplati aux pôles). La distance de la surface au centre augmente des pôles à l'équateur et surtout, le mouvement de rotation de la terre autour de la ligne de ses pôles produit une

pour les divers pendules que l'on compare. Ordinairement, on opère avec des amplitudes très petites ; d'après la formule $t = \pi \sqrt{\frac{l}{g}}$, la vérification a alors lieu, quelle que soit l'amplitude.

diminution de la pesanteur d'autant plus forte que le lieu considéré est plus éloigné de l'axe de rotation, c'est-à-dire plus voisin de l'équateur.

De l'équateur au pôle, g augmente d'environ $\frac{1}{200}$ de sa valeur. D'après la relation $p = mg$, le poids absolu d'un corps ou l'effort exercé par ce corps sur un dynamomètre varie proportionnellement à la valeur de g ; il est donc plus faible à l'équateur qu'au pôle. Le poids d'un centimètre cube d'eau augmente d'environ 5 dynes ($\frac{1}{200}$ de sa valeur) quand on passe de l'équateur au pôle. La valeur de g à Paris est sensiblement 981.

Valeurs de g réduites au niveau de la mer :

à la latitude 0° (équateur).....	978,10
à la latitude 45°	980,61
à la latitude $48^\circ 50' 11''$ (Paris).....	980,96
à la latitude 90° (pôle).....	983,11

117. Longueur du pendule battant la seconde. — En un lieu où l'accélération est g , la longueur du pendule dont la durée d'oscillation est une seconde est donnée par l'équation $1 = \pi\sqrt{\frac{l}{g}}$

$$\text{d'où } l = \frac{g}{\pi^2}.$$

$l = 99^{\text{c}},39$ à Paris au niveau de la mer. La longueur du pendule à secondes augmente d'environ 5 millimètres quand on passe de l'équateur au pôle.

Applications. — 1° Quelle serait l'intensité de la pesanteur en un lieu où la longueur du pendule qui bat la seconde est $99^{\text{cm}},5$?

2° Un pendule d'horloge retarde de 24 secondes par jour : de combien faut-il diminuer sa longueur pour qu'il batte la seconde?

3° Une masse de 2 kilogrammes formant la lentille d'un pendule est suspendue à l'extrémité d'une tige de 2 mètres de long. Calculer l'énergie de ce pendule, considéré comme un pendule simple, quand la tige fait un angle de 60° avec la verticale, en un lieu où $g = 981$.

ATTRACTION UNIVERSELLE

118. Des lois du mouvement des planètes autour du soleil, Newton a déduit l'existence entre deux corps quelconque d'une attraction *proportion-*

nelle aux masses de ces deux corps et en raison inverse du carré de la distance qui les sépare.

Soient deux points matériels de masse m et m' , distants de r (fig. 77),

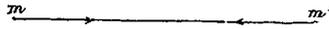


Fig. 77.

l'action de m sur m' et l'action de m' sur m sont deux actions égales et contraires (39) ayant pour expression :

$$f = G \frac{mm'}{r^2}$$

G est l'action qu'exercent l'une sur l'autre deux masses égales à l'unité et distantes de 1 centimètre.

119. La pesanteur est un cas particulier de l'attraction universelle. — La chute d'un corps résulte de l'attraction qu'exerce sur lui la sphère terrestre.

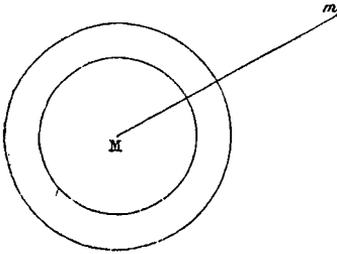


Fig. 78.

La symétrie exige que l'attraction d'une couche sphérique homogène sur un point extérieur soit dirigée suivant le rayon; on démontre d'autre part que l'action d'une couche sphérique homogène agissant sur un point extérieur m , proportionnellement aux masses et en raison inverse du carré des distances, est la même que si toute la masse M de la couche sphérique était concentrée en son centre (fig. 78).

Si l'on considère la terre comme constituée par des couches concentriques homogènes, elle devra exercer sur un point extérieur la même action que si toute sa masse était concentrée en son centre.

Soit M la masse de la Terre, R son rayon, m une masse extérieure située à une altitude h , l'attraction exercée par la terre sur ce corps ou le poids du corps sera :

$$f = G \frac{Mm}{(R + h)^2}$$

ou sensiblement $G \frac{Mm}{R^2}$, c'est-à-dire en raison inverse du carré de la distance au centre de la Terre, si h est très petit par rapport à R .

D'après cette dernière expression, le poids d'un corps agit comme une force constante pendant toute la durée de la chute (pour des variations de h négligeables par rapport à R).

L'accélération $\frac{f}{m} = \frac{GM}{R^2}$ est indépendante de m , elle est donc la même pour tous les corps.

L'observation a confirmé les résultats précédents; elle a démontré en effet que le poids d'un corps est une force dirigée vers le centre de la Terre puis-

qu'elle est perpendiculaire à la surface des eaux tranquilles, que cette force diminue quand on s'éloigne du centre de la Terre (influence de la latitude, de l'altitude), qu'elle est constante pendant toute la durée de la chute pour une chute de petite hauteur et que l'accélération est la même pour tous les corps dans le vide.

Applications. — 1° Quelle est l'accélération d'un corps qui tombe à la surface du Soleil? La masse du Soleil est égale à 324 439 M (M masse de la Terre).

2° Quelle est l'accélération d'un corps qui tombe à la surface de la Lune? $M' = 0,01255 M$.

3° Quelle serait la durée de l'oscillation d'un pendule de 1 mètre à la surface du Soleil?

4° La masse de la Terre étant $5,95 \cdot 10^{27}$ et son rayon $6,37 \cdot 10^8$, calculer la valeur de la constante G.

5° Supposons un poids de 1 kilogramme transporté du pied au sommet de la tour Eiffel : de combien son poids diminuera-t-il?

BALANCE

120. Mesure des masses et des poids relatifs. — La balance est l'instrument qui sert à *peser* les corps, c'est-à-dire à déterminer les rapports de leurs poids à l'unité de poids qui est le poids de l'unité de masse. Ces rapports s'appellent les *poids relatifs*; ce sont les nombres que l'on a d'ordinaire intérêt à connaître. Pour obtenir le poids relatif d'un corps, on compare son poids au poids de blocs de laiton ou de platine gradués en grammes (*poids marqués*) et contenus dans une *boîte de poids* ⁽¹⁾. La masse d'un corps évaluée en unités de masse étant représentée par le même nombre que son poids en grammes (36), le nombre de grammes lu sur les poids marqués exprime à la fois le poids du corps en grammes ou son poids relatif et sa masse en unités de masse ⁽²⁾.

Si deux corps exercent le même effort sur le plateau d'une balance, ils ont en tout lieu un même poids et une même masse, car d'après les relations

$$p = mg \quad p' = m'g$$

(1) Une boîte de poids se compose des masses suivantes :

1 2 2 5 10 10 20 50 100 100 200 500

On peut former avec ces douze masses l'une des masses entières comprises entre 0 et 1000.

(2) Dans le langage usuel, le mot *poids* signifie poids en grammes. Quand on dit qu'un corps pèse 10 grammes, on entend par là qu'il a le même poids que 10 centimètres cubes d'eau ou que le bloc de laiton marqué 10 grammes dans une boîte de poids. Il vaut donc aussi 10 unités de masse.

on a en même temps *en un même lieu* $p = p'$ et $m = m'$, quelle que soit la valeur de g .

121. Calcul du poids absolu d'un corps. — Le poids absolu d'un corps de masse m est donné par la relation $p = mg$; l'accélération g de la pesanteur étant variable avec la latitude et l'altitude, le poids d'une masse déterminée est également variable. En multipliant par g (g évalué en centimètres) le nombre qui représente le poids en grammes, on obtient le poids absolu en dynes. On obtiendrait encore le poids absolu par la flexion d'un dynamomètre gradué en dynes.

122. Description d'une balance. — Une balance (fig. 79) se compose d'un levier rigide AC appelé *fléau*, mobile en son milieu autour d'un axe horizontal.

Le fléau porte à ses extrémités deux *plateaux* égaux F et F', librement suspendus, destinés à recevoir le corps à peser et les poids marqués.

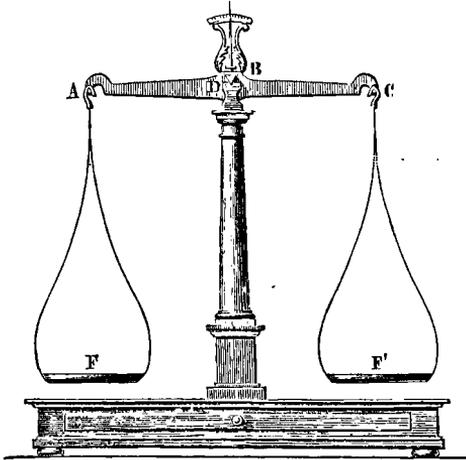


Fig. 79.

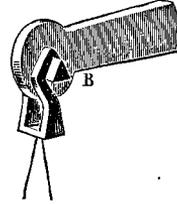


Fig. 81.

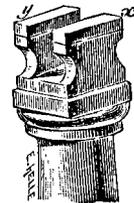
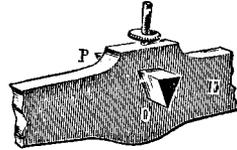


Fig. 80.

Suspension du fléau et des plateaux. — L'axe de rotation ou de suspension du fléau est formé par l'arête vive O d'un prisme triangulaire P en acier très dur appelé *couteau* qui traverse le milieu du fléau E (fig. 80). Cette arête s'appuie sur deux petits plans d'acier x et y situés dans un même plan horizontal, l'un en avant, l'autre en arrière du fléau et supportés par une colonne verticale.

Chacun des plateaux repose par un crochet sur un couteau horizontal en acier B, fixé à chaque extrémité du fléau. Les arêtes vives de ces couteaux, parallèles à l'arête du couteau central, sont tournées vers le haut (fig. 81). Par ce mode de suspension, les poids des plateaux et leurs charges constituent toujours, quelle que soit l'inclinaison du fléau et quelle que soit la position des corps sur les plateaux, *deux forces verticales appliquées sur les tranchants des couteaux extrêmes*, à une distance invariable de l'axe central.

Ligne du fléau, bras du fléau. — Soient a , O et b les intersections des arêtes des couteaux par un plan mené perpendiculairement à ces arêtes en leurs milieux (fig. 82), la ligne ab est la *ligne du fléau*. Les distances horizontales des points a et b à la verticale du point O sont les *bras du fléau*.

Nous supposons dans ce qui suit les trois points d'appui a , O et b en ligne droite et les bras du fléau égaux. Dans ces conditions, les poids égaux P des plateaux ont une résultante qui passe toujours

en O et ne fait qu'appuyer le fléau sur son support, quelle que soit l'inclinaison du fléau.

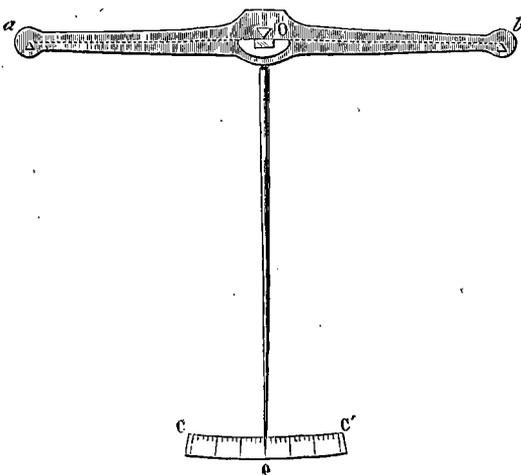


Fig. 82.

123. Stabilité de la balance. — La condition la plus essentielle à remplir par une balance est la stabilité de l'équilibre. Pour cela, le centre de gravité G du fléau doit être situé un peu au-dessous de l'axe de suspension. Quand il y a équilibre avec les plateaux vides, le centre de gravité G se place sur une verticale passant par l'axe de suspension, et le poids de l'appareil tout entier est détruit par la résistance du support.

Si l'on met une charge p dans l'un des plateaux, le fléau s'incline en $a'b'$, le centre de gravité G quitte la verticale de l'axe de suspension

et vient en G' , le poids du fléau qui lui est appliqué tend à le faire tourner pour le ramener dans sa position première; un nouvel équilibre s'établit quand la résultante de la charge p et du poids ϖ du fléau passe par l'axe de suspension (fig. 83).

Le centre de gravité du fléau ne peut être situé au-dessus de l'axe de suspension. Supposons en effet l'équilibre établi avec les plateaux vides, plaçons une charge p dans l'un des plateaux, le fléau s'incline

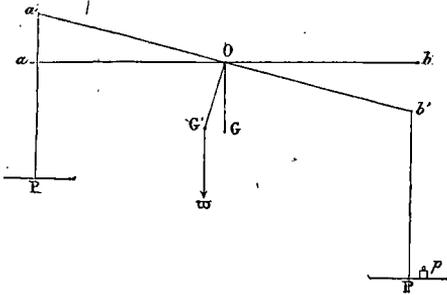


Fig. 83.

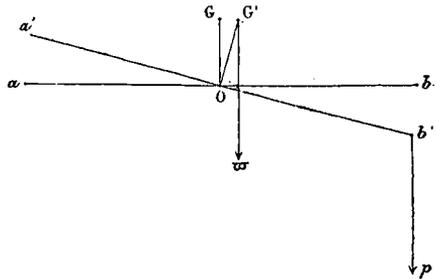


Fig. 84.

en $a'b'$, le centre de gravité vient en G' et le poids du fléau au lieu de contrarier l'action de la surcharge comme dans le cas précédent agit dans le même sens pour faire basculer complètement la balance (fig. 84). La balance est dite *folle*, elle ne peut être employée, la moindre trépidation fait incliner le fléau de 90° .

Si le centre de gravité est situé sur l'axe même de suspension, le poids du fléau est toujours annulé par la résistance de l'axe et ne joue plus aucun rôle. Dans ce cas la balance vide est en équilibre *indifférent* dans toutes les positions, et le fléau s'incline complètement pour tout excédant de poids.

124. Conditions de justesse d'une balance. — Pour faire une pesée, on met le corps à peser dans l'un des plateaux et des poids marqués dans l'autre plateau jusqu'à ce que la ligne du fléau se place en équilibre dans la position horizontale. La somme des poids marqués donne le poids du corps en grammes.

Pour que la pesée ainsi faite soit exacte ou *juste*, il faut : 1° que le fléau soit horizontal avant la pesée; 2° que le fléau soit horizontal quand on place des poids égaux sur les deux plateaux.

1° Une aiguille f fixée perpendiculairement à la ligne du fléau et dont l'extrémité se meut sur un petit arc de cercle divisé CC' est verticale quand la ligne du fléau est horizontale, elle pointe alors sur

le zéro de la graduation (fig. 82). Le fléau étant par construction symétrique par rapport au point O et les plateaux ayant le même poids, la ligne du fléau est horizontale quand les plateaux sont vides. Si l'horizontalité n'est pas à ce moment parfaite, une petite surcharge fixe placée d'un côté du fléau permet toujours de l'obtenir.

2° L'équilibre horizontal établi avec les plateaux vides subsistera en plaçant des poids égaux dans les deux plateaux si les plateaux sont suspendus rigoureusement à la même distance de l'axe, c'est-à-dire si *les bras de levier l et l' sont égaux*.

En effet, la résultante des deux poids p passe alors par l'axe de suspension, et on a d'après la règle de la composition des forces parallèles (21) $pl = p'l'$, c'est-à-dire $l = l'$.

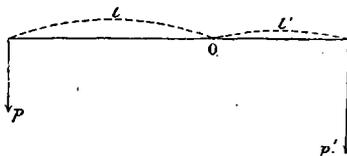


Fig. 85.

Si on ne dispose pas de deux poids égaux, on place un corps quelconque p dans l'un des plateaux et on lui fait équilibre dans l'autre plateau par un corps p' (fig. 85); si l'équilibre se maintient quand on change les deux corps de plateaux, le premier équilibre donne $pl = p'l'$, le second $p'l = p'l'$. En divisant, nous avons $p = p'$, et par suite $l = l'$. Si l'équilibre ne subsistait pas en changeant les corps de plateau, p serait différent de p' et l de l' .

125. Double pesée. — On ne peut compter sur la justesse d'une balance, car il est très difficile de réaliser rigoureusement l'égalité des bras du fléau; on peut toutefois obtenir des pesées très exactes par la méthode de la *double pesée* dite méthode de Borda. Elle consiste à placer le corps dans l'un des plateaux et à lui faire équilibre dans l'autre avec de la grenaille de plomb, c'est ce qu'on appelle *faire la tare*; sans toucher à la tare, on remplace ensuite le corps par les poids marqués nécessaires pour obtenir l'équilibre. Les poids et le corps font successivement équilibre dans le même plateau à la même tare, ils exercent exactement le même effort et ont par conséquent le même poids et la même masse.

126. Conditions de sensibilité d'une balance. — Puisque la méthode de la double pesée dispense de rechercher une justesse absolue, la qualité la plus importante d'une balance est la *sensibilité*. On dit qu'une balance est *sensible au milligramme* quand une

surcharge d'un milligramme dans un plateau fait incliner le fléau d'une façon appréciable.

Considérons une balance où *les trois points de suspension du fléau et des plateaux sont en ligne droite*.

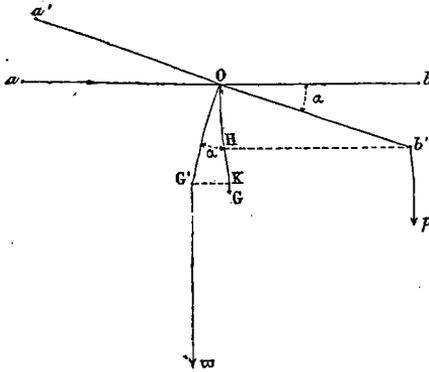


Fig. 86.

L'équilibre horizontal étant établi, les plateaux et les poids qui les chargent ont une résultante qui passe en O et est détruite par la résistance du support (*avant et après l'inclinaison du fléau*), ce qui fait que *la sensibilité ne dépend pas de la charge*⁽¹⁾. On pose dans l'un des plateaux une *surcharge p*, le fléau s'incline en *a'b'*, le centre de gravité G du fléau vient en G'. Les deux seules

forces qui agissent sont le poids *p* appliqué en *b'* et le poids ϖ du fléau appliqué en G'. Quand un nouvel équilibre est établi, pour un angle d'inclinaison α , ces deux forces ont une résultante qui passe par l'axe de suspension O (fig. 86).

Désignons par *d* la distance $OG = OG'$, par *l* la distance Ob' .

Abaissons de G' et b' des perpendiculaires sur la verticale qui passe en O :

$$G'K = d \sin \alpha$$

$$b'H = l \cos \alpha.$$

La résultante des deux forces doit se trouver sur OG, et d'après la règle de la composition de deux forces parallèles (22) :

$$pl \cos \alpha = \varpi d \sin \alpha$$

$$\text{d'où } \operatorname{tg} \alpha = \frac{pl}{\varpi d}.$$

tg α est indépendant de la charge,

tg α augmente proportionnellement à la surcharge *p*,

tg α est proportionnel à *l* : la sensibilité est d'autant plus grande que les bras du fléau sont plus longs,

(1) La sensibilité n'est indépendante de la charge que si les trois points *a*, O, *b* sont en ligne droite. Cette condition n'étant jamais rigoureusement remplie, la sensibilité varie avec la charge (127).

$\operatorname{tg} \alpha$ varie en raison inverse de ϖ : la sensibilité est d'autant plus grande que le poids du fléau est plus petit,

$\operatorname{tg} \alpha$ varie en raison inverse de d , la sensibilité est d'autant plus grande que le centre de gravité du fléau est plus voisin de l'axe de suspension⁽¹⁾.

Pour diminuer le poids du fléau et accroître sa longueur, conditions qui paraissent incompatibles, on forme le fléau d'une lame métallique placée *de champ* et ayant la forme d'un losange *évidé*, ce qui augmente la légèreté en conservant la résistance à la flexion.

On fait varier la position du centre de gravité du fléau en faisant monter ou descendre un écrou taraudé mobile sur une tige filetée qui surmonte le fléau (fig. 80).

127. Positions relatives des trois points d'appui. — Quand les trois points d'appui sont en ligne droite, la sensibilité est indépendante de la charge. Nous avons vu que dans ce cas $\operatorname{tg} \alpha$ ne dépend pas de la charge.

Il n'en est plus de même si les points de suspension des plateaux sont au-dessus ou au-dessous du point O.

Supposons les deux points de suspension a et b *au-dessus* du point O (fig. 87). Quand deux poids égaux P sont appliqués en a et b , le fléau reste horizontal si la balance est juste, et la résultante de ces deux poids est appliquée en I milieu de ab . Quand la surcharge p fait incliner le fléau, la résultante des deux poids P est appliquée en I' milieu de $a'b'$ et agit dans le sens de la surcharge pour augmenter la déviation.

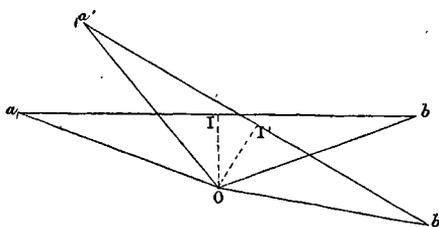


Fig. 87.

La sensibilité *augmente* donc dans ce cas avec la charge.

Si les points de suspension des plateaux sont *au-dessous* de O, une figure semblable montre que la charge agit en sens inverse de la surcharge et que la sensibilité diminue quand la charge augmente.

Les constructeurs cherchent à établir les trois points a , O et b en ligne droite; mais, même dans ce cas, la sensibilité dépend de la charge par suite de la flexion du fléau et des variations de frottement aux points de suspension. Si donc l'on veut faire une série de mesures avec une sensibilité constante, on devra opérer *sous charge fixe*. A cet effet, on met dans le plateau A un poids marqué égal au poids maximum à évaluer et on en fait la tare

(1) La sensibilité dépend aussi du frottement des arêtes de suspension contre les appuis. Dans les balances bien construites, ces frottements sont extrêmement faibles. La rotation du fléau s'exécute autour d'un axe très délié. D'autre part, dans les balances sensibles, les plateaux sont suspendus à des étriers qui reposent par un plan d'agate sur les couteaux horizontaux de chaque extrémité du fléau.

dans le plateau B. Si l'on place ensuite un des corps à peser dans le plateau A, les poids à enlever du même côté pour rétablir l'horizontalité représentent le poids du corps. Cette méthode réduit en outre au minimum le nombre des équilibres à établir.

En résumé, les conditions que l'on cherche à réaliser dans une bonne balance sont les suivantes :

Axes de suspension du fléau et des plateaux, parallèles et dans un même plan horizontal (pour avoir une sensibilité indépendante de la charge);

Bras du fléau rigoureusement égaux (pour la justesse);

Bras du fléau longs et légers, centre de gravité du fléau au-dessous de l'arête du couteau central, mais très voisin de cette arête (pour la sensibilité).

128. Balance de précision (fig. 88). — Une balance de précision

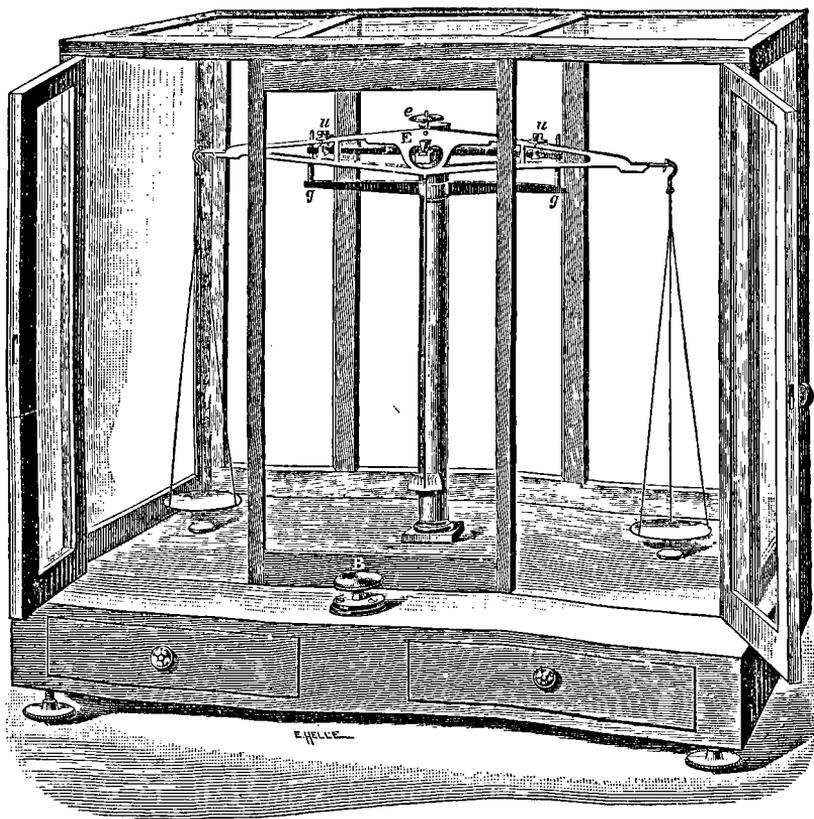


Fig. 88.

est renfermée dans une cage de verre qui la protège contre les poussières et contre l'agitation de l'air au moment de la pesée. Pour que les poids métalliques ne s'altèrent pas au contact de l'air humide, l'air intérieur de la cage est desséché avec de la chaux vive et on n'ouvre les portes de la cage que pour introduire des poids. Les poids sont manœuvrés avec une pince.

Un support r ayant la forme d'une fourche, mis en mouvement par un bouton B extérieur à la cage, permet de soulever les crochets des plateaux et le fléau quand la balance ne fonctionne pas, ce qui empêche l'usure des arêtes des couteaux et des plans sur lesquels ils reposent. On a soin de soulever aussi les étriers et le fléau toutes les fois que dans une pesée on met un poids sur un plateau ou qu'on l'ôte.

On construit couramment des balances de précision sensibles au milligramme pour une charge d'un kilogramme. On est arrivé à une sensibilité beaucoup plus grande.

129. Balance hydrostatique. — C'est une balance dans laquelle le plan d'acier qui supporte le couteau du fléau peut s'élever et s'abaisser à volonté, à l'aide d'une crémaillère logée dans la colonne qui porte la balance (fig. 109). Des crochets placés à la partie inférieure de chaque plateau permettent d'y suspendre un corps qu'on peut plonger dans un liquide.

Applications. 1° Un corps de masse x est placé dans le plateau A d'une balance; on lui fait équilibre avec p' grammes placés dans le plateau B; on porte le corps x dans le plateau B, et on l'équilibre avec p grammes dans le plateau A. Trouver x (Méthode de pesée due à Gauss).

2° Dans le plateau A d'une balance on place 100 grammes; l'équilibre s'établit en mettant 100^{sr}005 dans le plateau B; on porte les 100 grammes dans le plateau B, on équilibre par 99^{sr}997 dans le plateau A. Quel est le rapport des bras de levier?

3° Les deux bras du fléau d'une balance sont égaux en longueur, mais le centre de gravité n'est pas sur la verticale du point d'appui du fléau, il en est à une distance d . On pèse un corps en le plaçant successivement dans les deux plateaux et on lui fait équilibre par 24, puis par 26 grammes. Quel est le poids vrai?

4° Un dynamomètre est gradué en un lieu où $g = 982$. En un lieu où $g = 980$, il marque pour un corps 8 kilogrammes. Quelle est la masse de ce corps?

5° Quel est l'effort exercé sur le plateau d'une balance en un lieu où l'intensité de la pesanteur est 9,80 par un corps dont la masse est 12 grammes?

DENSITÉS

130. Densité; poids spécifique. — Tous les corps n'ont pas la même masse sous le même volume. La *densité* ou *masse spécifique*

d'une substance homogène est le quotient de sa masse par son volume ou la masse de l'unité de volume (poids en grammes d'un centimètre cube du corps).

Désignons par D la densité d'un corps, par V son volume, sa masse (ou son poids en grammes) sera exprimée par $M = VD$.

Le poids absolu d'un corps en un lieu déterminé est Mg ou VDg .

Il s'exprime en dynes. On appelle *poids spécifique* d'une substance le quotient du poids absolu de cette substance par son volume ou le poids absolu de l'unité de volume ou d'un centimètre cube de cette substance; le poids spécifique d'un corps de densité D est Dg . La densité de l'eau à 4^0 est 1, son poids spécifique à Paris est 981. Le poids spécifique à Paris du mercure à 0^0 est 981.13,59. La densité et le poids spécifique sont deux nombres bien distincts, mais en un même lieu, les *poids spécifiques sont proportionnels aux densités*.

Applications. 1° Quel est le côté d'un cube de cuivre dont la masse est 1000 grammes, la densité du cuivre étant 8,6?

2° Quel volume occupe à 0^0 une masse de mercure égale à 1 gramme? La densité du mercure à 0^0 est 13,6.

3° Calculer la masse de la Terre en prenant 5,5 pour sa densité moyenne et 6371 kilomètres pour son rayon moyen.

UNITÉS

131. Mesurer une grandeur, c'est la comparer à une grandeur fixe de même nature que l'on appelle *unité*; chaque espèce de grandeur a son unité particulière.

La mesure est représentée par un nombre suivi du nom de l'unité. C'est ainsi que la mesure d'une longueur sera par exemple représentée par 15 mètres.

Deux grandeurs de même nature sont dans le même rapport que leurs mesures. Soient, en effet, deux grandeurs mesurées avec une même unité l , leurs mesures sont n_1 et n_2 on a $L_1 = n_1 l$ pour l'une, $L_2 = n_2 l$ pour l'autre; d'où

$$\frac{L_1}{L_2} = \frac{n_1}{n_2}.$$

La mesure d'une même grandeur varie en raison inverse des unités qui servent à l'évaluer. Supposons une grandeur L_1 mesurée d'abord

avec une unité l , sa mesure est n_1 ; avec une autre unité l' de même nature, sa mesure est n'_1 , on a $L_1 = n_1 l = n'_1 l' \quad \frac{n}{n_1} = \frac{l'}{l}$.

132. Anciennes unités. — Les unités choisies pour les diverses grandeurs pourraient être complètement indépendantes les unes des autres. C'était le cas des anciennes unités où la *toise* était l'unité de longueur, la *perche* l'unité de mesure agraire, la *livre* l'unité de poids, le *setier* l'unité de capacité ⁽¹⁾.

133. Relations entre les unités. — Les grandeurs que l'on étudie en géométrie, en mécanique, ou en physique, ne sont pas indépendantes; il existe entre elles des relations qui permettent de définir toutes les unités avec trois unités irréductibles, seules arbitraires et dites **unités fondamentales**; les autres unités sont appelées unités dérivées.

SYSTÈME D'UNITÉS ADOPTÉ EN PHYSIQUE

134. Unités fondamentales. — Les trois unités fondamentales adoptées sont les unités de *longueur*, de *temps* et de *masse*.

Unité de longueur. — L'unité de longueur est le *centimètre*, centième partie du mètre. Le *mètre* est la distance qui sépare, à la température de la glace fondante, deux traits de repère tracés sur une règle en platine iridié (90 de platine et 10 d'iridium) conservée au Bureau international des Poids et Mesures de Sèvres. (Le mètre est très voisin de la quarante-millionième partie du méridien terrestre.)

Unité de temps. — L'unité de temps est la *seconde*. La seconde est la 86 400^e partie du jour solaire moyen ⁽²⁾.

Unité de masse. — C'est la masse d'un *gramme* ou la millième partie de la masse d'un bloc de platine conservé au Bureau international des Poids et Mesures (égal à la masse d'un décimètre cube

(1) A Paris la toise valait en mètres 1,949, la perche des eaux et forêts en mètres carrés 51,07, la livre en kilogrammes 0,489, le setier 156 litres. Ces unités variaient dans les différents pays et dans les provinces d'une même nation.

(2) La durée du *jour solaire vrai* ou du temps qui sépare deux passages consécutifs du soleil au méridien éprouve de petites variations qui sont périodiques. On a imaginé un soleil fictif passant au méridien à des intervalles de temps égaux à la moyenne de tous les jours solaires vrais de l'année. Cet intervalle est le *jour solaire moyen*.

d'eau distillée à 4°). Tous les corps qui en un même lieu pèsent un gramme ont une masse égale à l'unité (36).

En raison du choix qui a été fait pour les trois unités fondamentales, ce système d'unités a reçu le nom de **système centimètre, gramme, seconde** (par abréviation C. G. S.).

135. Unités dérivées. — Les diverses grandeurs géométriques, mécaniques, physiques, sont reliées entre elles par des définitions ou par des lois qui se traduisent par des équations; ces équations renferment des coefficients numériques dont la valeur dépend des unités adoptées. On choisit ces unités de manière que les relations qui existent entre les différentes grandeurs soient aussi simples que possible et on cherche à rendre les coefficients numériques égaux à l'unité.

L'unité de surface est le centimètre carré, carré ayant 1 centimètre de côté.

L'unité de volume est le centimètre cube, cube dont l'arête est égale à 1 centimètre.

L'unité d'angle est l'angle dont l'arc a une longueur d'un centimètre sur une circonférence dont le rayon est un centimètre.

Une vitesse est le quotient d'un espace par un temps. **L'unité de vitesse** est la vitesse d'un corps qui parcourt d'un mouvement uniforme un centimètre en une seconde.

Une accélération est le quotient d'une variation de vitesse par un temps. **L'unité d'accélération** est l'accélération d'un mouvement uniformément varié dont la vitesse s'accroît d'un centimètre en une seconde.

Unité de force. — Entre une masse M et la force qui lui communique une accélération γ , existe la relation $F = M\gamma$ (35).

D'après cette relation, on choisit pour unité de force la **dyne**; c'est une force qui communique à une masse de 1 gramme une accélération de 1 centimètre par seconde. On sait que le poids d'un gramme à Paris est une force qui communique en chute libre à la masse d'un gramme une accélération de 981 centimètres; il vaut 981 dynes. La dyne vaut donc $\frac{1}{981}$ du poids d'un gramme à Paris (un peu plus d'un milligramme). En un lieu où l'accélération de la pesanteur est égale à g centimètres, ce nombre g représente en dynes la valeur du poids d'un gramme.

Unité de travail. — D'après la relation $T = Fe$, on prend pour unité de travail ou d'énergie le travail effectué par l'unité de force lorsqu'elle déplace son point d'application de l'unité de longueur : c'est le travail d'une dyne déplaçant son point d'application d'un centimètre, le chemin étant estimé dans la direction de la force. Cette unité de travail s'appelle **erg** (43).

Unité de puissance. — L'unité de puissance serait la puissance d'une machine qui produit un travail d'un erg par seconde.

Unité de pression. — Imaginons une surface S (en centimètres carrés) sur laquelle s'exerce une pression uniforme : désignons par P la pression totale en dynes ; comme cette pression est proportionnelle à la surface, on peut poser $P = pS$, p étant la pression par unité de surface. On a donc $p = \frac{P}{S}$; on prend pour unité de pression la pression d'une dyne par centimètre carré.

Unité de densité. — D'après la relation $M = VD$, on définit l'unité de densité la densité d'un corps dont la masse par centimètre cube est la masse d'un gramme. C'est la densité de l'eau à 4°.

Nous définirons plus tard les autres unités dérivées à propos des grandeurs qu'elles servent à mesurer.

136. Unités pratiques. — En adoptant un même système d'unités pour toutes les grandeurs, on est souvent conduit dans la pratique à des mesures représentées par des nombres extrêmement grands ou extrêmement petits. Pour cette raison, on a adopté des unités dites *pratiques* ; ce sont des unités secondaires, multiples ou sous-multiples des unités fondamentales et des unités dérivées.

Le mètre, le décimètre, l'hectomètre, le kilomètre, sont des multiples de l'unité de longueur.

En raison de l'extrême petitesse de l'erg, on prend habituellement pour unité de travail le joule. Le joule est un multiple de l'unité de travail. Il vaut 10 millions d'ergs (10^7).

L'unité pratique de puissance est le **watt**, puissance d'une machine qui débite un travail d'un joule par seconde.

En électricité, on fait un grand usage de multiples et de sous-multiples des unités.

UNITÉS DE LA MÉCANIQUE INDUSTRIELLE

137. Unités fondamentales. — En mécanique, on prend souvent pour unités fondamentales une unité de *longueur*, une unité de *temps* et une unité de *force*.

Unité de longueur. — On adopte le mètre.

Unité de temps. — On prend la seconde du jour solaire moyen.

Unité de force. — On prend pour unité de force le *kilogramme* ou le *poids* du bloc de platine qui a servi à définir l'unité de masse dans le système d'unités adopté en Physique (36). C'est aussi le poids d'un décimètre cube d'eau distillée à 4°. L'effort exercé sur un dynamomètre par cette unité de force varie avec le lieu de l'observation, puisque d'après la relation $p = mg$, le poids d'un corps varie avec l'altitude et la latitude.

138. Unités dérivées. — L'unité de *surface* est le mètre carré, l'unité de *volume* est le mètre cube, l'unité de *vitesse* est la vitesse d'un corps qui parcourt d'un mouvement uniforme 1 mètre en une seconde; l'unité d'*accélération* est l'accélération d'un mouvement uniformément varié dont la vitesse varie de 1 mètre en une seconde.

Unité de masse. — D'après la relation $F = M\gamma$, on choisit pour unité de masse la masse d'un corps qui prend une accélération d'un mètre sous l'action de l'unité de force. Le poids d'un corps qui a l'unité de masse est donné par l'équation $F = M\gamma$, où $M = 1$ et $\gamma = 9^m81$, accélération de la chute libre à Paris; on a ainsi: $F = 9^m81$. Puisque l'unité de masse pèse 9,81 kilogrammes, l'unité de masse est la masse de 9,81 décimètres cubes d'eau: cette masse prendra à Paris sous l'action d'un kilogramme seulement une accélération 9,81 fois plus petite que sous l'action de son poids ou une accélération d'un mètre.

Unité de travail. — D'après la relation $T = Fe$, on choisit pour unité de travail le *kilogrammètre*, ou travail effectué par une force d'un kilogramme déplaçant son point d'application d'un mètre.

Comme l'unité de force, l'unité de masse et l'unité de travail varient un peu avec le lieu de l'observation. Ces variations sont trop petites pour qu'on s'en préoccupe dans les mesures industrielles.

D'ailleurs, ces unités deviennent bien déterminées si l'on prend pour unité de force la *valeur du kilogramme à Paris*. L'unité de masse devient alors en tout lieu la masse de 9,81 décimètres cubes d'eau et l'unité de travail est le kilogrammètre de Paris. Il vaut $1000 \cdot 981 \cdot 100 = 9,81 \cdot 10^7$ ergs ou 9,81 joules.

Unité de puissance. — L'unité de puissance industrielle est habituellement le *cheval-vapeur*, puissance d'une machine qui produit 75 kilogrammètres par seconde.

Remarques sur les systèmes d'unités. — Les deux systèmes d'unités que nous avons définis ont eu pour point de départ commun le *système métrique*.

Dans le système métrique, établi en France en 1795, à part l'unité de temps, il n'y avait en apparence qu'une unité indépendante, l'*unité de longueur*, le *mètre*. Les autres unités s'en déduisaient :

1° par des définitions géométriques (unité de surface, de volume).

2° par une définition *arbitraire* (unité de force : poids à Paris d'un décimètre cube d'eau à 4° dans le vide).

L'*unité de force* jouait le rôle de seconde unité fondamentale; elle est définie comme le poids d'un volume d'eau déterminé, mais le lien qui existe entre ses dimensions et l'unité de longueur n'est pas nécessaire.

En y joignant la *seconde* comme *unité de temps*, on a les trois unités fondamentales de la mécanique industrielle.

Dans le système d'unités actuellement usité en physique, l'*unité de longueur* est le centimètre, déduit du mètre.

L'*unité de masse* a été choisie comme seconde unité fondamentale; c'est la masse d'un centimètre cube d'eau à 4° et à ce titre elle est liée à l'unité de longueur, mais elle peut être regardée comme indépendante, car ce lien est arbitraire.

L'*unité de temps* est la troisième unité fondamentale.

Ce dernier système d'unités, indépendant de la pesanteur, avait été employé par *Gauss*; il a été adopté par le Congrès international des électriciens en 1881.

139. Mesure d'une force avec une balance ou un dynamomètre. — Supposons qu'une force ait été mesurée à l'aide d'une balance ou d'un dynamomètre et trouvée égale à P' grammes dans une localité où l'accélération de la pesanteur est g' . Sa valeur en dynes sera $P'g'$.

Mesurée à Paris où l'accélération est g , la même force serait trouvée égale à P grammes ou Pg dynes. On doit avoir $Pg = P'g'$.

La valeur de cette force en grammes de Paris est donc $P = P' \frac{g'}{g}$.

Il serait inutile de connaître les accélérations si l'on employait pour la mesure un dynamomètre gradué à Paris.

Dans l'industrie mécanique, on exprime les forces en kilogrammes sans se préoccuper des faibles variations de g à la surface du globe.

HYDROSTATIQUE

140. Fluides. — Un fluide est un corps dont les particules ont très peu de cohésion et *se déplacent très facilement les unes par rapport aux autres*. Un fluide prend la forme du vase qui le renferme. Son centre de gravité n'a donc pas une position invariable comme celui d'un solide. Un fluide est un corps parfaitement élastique qui diminue plus ou moins de volume quand on le comprime, mais qui reprend son volume primitif quand la compression cesse.

L'**hydrostatique** a pour objet l'étude des conditions d'équilibre des fluides. Nous nous occuperons d'abord des liquides.

141. Liquides. — Un liquide est un fluide très peu compressible qui se termine par une surface libre. Le nom de *fluides incompressibles* est souvent donné aux liquides, par opposition au nom de fluides compressibles attribué aux gaz.

Pression. — Sur une surface plane de surface S , uniformément pressée, la pression P ou l'effort exercé est proportionnel à la surface; $P = pS$, cette pression s'exprime en dynes; la pression *par unité de surface* est $p = \frac{P}{S}$; elle s'exprime en dynes par centimètre carré.

142. Transmission d'une pression dans un solide. — Une pression exercée sur une portion de surface d'un corps solide se transmet inégalement sur des surfaces égales du solide prises dans diverses directions, à cause des liaisons qui donnent au solide sa rigidité.

143. Principe de la transmission des pressions dans un liquide. — Dans un liquide, en raison de la mobilité des molécules,

une pression se transmet également dans tous les sens. L'hydrostatique repose sur ce principe de la transmission des pressions ou **principe de Pascal**. Voici comment on peut l'énoncer :

Si, sur une portion plane de la surface d'un liquide enfermé de tous côtés, on exerce une pression, cette pression se transmet intégralement à toute portion plane de même surface prise sur la paroi ou dans l'intérieur du liquide, quelle que soit son orientation.

Imaginons un vase de forme quelconque rempli d'un liquide et portant 5 tubulures identiques fermées par des pistons de même diamètre (fig. 89). Une pression exercée du dehors sur l'un des pistons se transmet à travers le liquide, et l'équilibre n'a lieu que si on exerce du dehors sur les quatre autres pistons des pressions égales à la première.

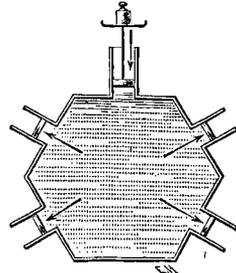


Fig. 89.

Supposons les surfaces des pistons inégales : une pression p exercée normalement sur une unité de surface d'un piston de surface s se transmettra intégralement sur chaque unité de surface. Sur un piston de surface S , il faudra exercer du dehors une pression pS pour maintenir l'équilibre. Les pressions qui se font équilibre sur les surfaces s et S , sont donc ps et pS , elles sont *proportionnelles aux surfaces* ; c'est le principe de la presse hydraulique.

144. Presse hydraulique. — La presse hydraulique est formée de deux corps de pompe verticaux de sections très inégales s et S réunis par un tube (fig. 90).

Dans chacun des corps de pompe glisse un piston. Un petit effort $ps = \varpi$ appliqué sur s permet d'exercer un effort considérable sur S si le rapport $\frac{S}{s}$

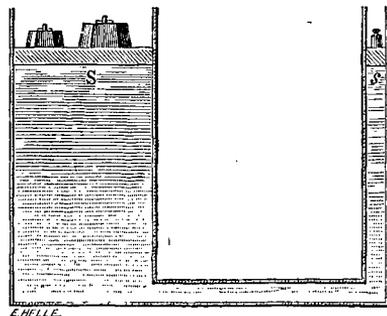


Fig. 90.

est grand, car $pS = \varpi \frac{S}{s}$.

Le principe de la transmission des pressions résulte de la constitution des liquides et s'appliquerait à un liquide soustrait à l'action de la pesanteur.

LIQUIDES PESANTS

145. Un liquide pesant renfermé dans un vase se place au fond du vase de manière à offrir à la partie supérieure une **surface libre** en contact avec l'atmosphère.

Horizontalité de la surface libre. — La surface libre d'un liquide pesant en équilibre est *plane*, car elle réfléchit la lumière comme un miroir plan en donnant des images symétriques des objets (613). Elle est de plus *horizontale* ou perpendiculaire en chaque lieu à la direction de la pesanteur. Nous avons vu antérieurement la démonstration expérimentale (88). Voici une démonstration théorique.

Supposons que la surface libre d'un liquide ne soit pas perpendiculaire à la force qui agit sur lui et décomposons le poids d'une molécule telle que M (fig. 91) en deux composantes, l'une perpendiculaire et l'autre

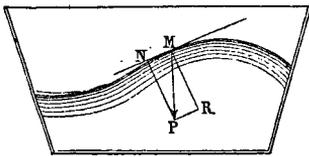


Fig. 91.

parallèle à la surface libre; la composante MR perpendiculaire à la surface n'a d'autre effet que de presser les molécules sous-jacentes sans les déplacer, puisque le liquide est incompressible; la composante parallèle MN ferait glisser la molécule le long de la surface et l'équilibre n'existerait pas.

Il faut donc pour l'équilibre qu'il n'y ait pas de composante de la force parallèle à la surface ou que la force soit *normale à la surface libre*.

146. Pressions intérieures. — Dans un liquide pesant, le poids des couches supérieures se transmet, comme toute pression, aux couches inférieures, et des surfaces égales, prises dans le liquide, à des hauteurs différentes, supportent des pressions inégales.

On appelle **surface de niveau** d'un liquide en équilibre une surface sur laquelle des éléments égaux supportent partout une même pression.

147. Un plan horizontal est une surface de niveau. — Nous admettrons que, dans un liquide pesant en équilibre, la pression est la même sur des portions de surface égales, dans toute l'étendue d'une tranche horizontale, quelle que soit la forme du vase.

La surface libre est une surface de niveau. — La surface libre d'un liquide enfermé dans un vase étant horizontale, la pression y est

uniforme. C'est la pression exercée par l'atmosphère. Cette pression est nulle si le vase est placé dans le vide.

148. Pression sur un élément plan horizontal à l'intérieur d'un liquide. — 1° Considérons un vase *cylindrique* renfermant un liquide (fig. 92). La pression sur une tranche horizontale AB de surface S et de profondeur h est égale au poids de la colonne liquide comprise entre la surface libre et cette tranche : c'est $ShDg$ ou $Sh\delta$ ⁽¹⁾ (en dynes). En effet, les parois du vase se tapissent d'une couche liquide *extrêmement mince* qui y reste fixée et contre laquelle le reste du liquide glisse sans frottement : il n'y a par suite entre la masse du liquide et le vase aucune adhérence qui puisse soutenir une partie du liquide.

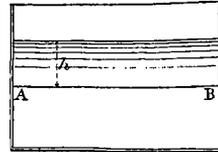


Fig. 92.

Puisque la pression est la même sur des surfaces égales de la tranche horizontale, comme nous l'avons admis (147), la pression sur l'unité de surface sera $h\delta$ et sur un élément de surface σ elle sera $\sigma h\delta$.

La pression sur un élément de surface d'une tranche horizontale dans l'intérieur d'un liquide est donc égale au poids d'une colonne liquide ayant pour base l'élément et pour hauteur sa distance au niveau libre. Cette pression est la même que si le filet cylindrique qui a σ pour base et h pour hauteur était isolé du reste du liquide⁽²⁾.

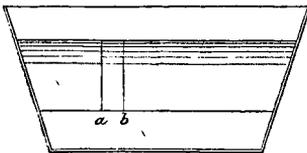


Fig. 93.

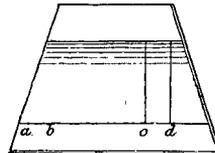


Fig. 94.

2° Quelle que soit la forme du vase, la pression sur un élément horizontal σ situé à une profondeur h est la même. Dans un vase de

(1) Dg ou δ , poids spécifique du liquide.

(2) On peut s'en rendre compte exactement. Décomposons le filet par des plans horizontaux en couches de très petite épaisseur (fig. 95), les masses élémentaires obtenues n'ont pas d'adhérence avec le liquide qui les entoure et ne sont pas soutenues, elles exercent donc séparément sur σ un effort égal à leur poids, et ces efforts s'ajoutent. Quant aux pressions latérales, elles n'ont pas d'effet vertical, puisqu'elles sont dirigées horizontalement ; d'ailleurs, elles se détruisent puisqu'elles ne produisent pas de glissement latéral.

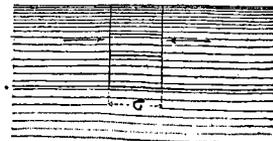


Fig. 95.

forme évasée par le haut (fig. 93), la pression sur l'élément ab est exercée directement par le filet qui s'appuie sur l'élément. Dans un vase rétréci à la partie supérieure (fig. 94), la pression est la même, comme nous l'avons admis (147), sur deux éléments ab et cd de même surface et de même niveau, et en cd la pression est exercée directement par un filet de poids $\sigma h\delta$.

149. Différence des pressions sur deux éléments égaux à des niveaux différents. — Dans un liquide pesant en équilibre, la pression croît avec la profondeur.

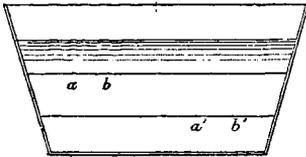


Fig. 96.

La pression que supporte un élément ab (fig. 96) dans un vase quelconque à la profondeur h est $\sigma h\delta$, la pression que supporte l'élément égal $a'b'$ dans le même vase à la profondeur h' est $\sigma h'\delta$; la différence des pressions sera $\sigma\delta (h' - h)$ ou le poids d'une colonne cylindrique du liquide

ayant l'élément pour base et la distance des deux plans horizontaux pour hauteur.

150. Pression de bas en haut. — Si une surface liquide située dans un plan horizontal supporte de haut en bas une pression égale au poids d'une colonne ayant pour base la surface et pour hauteur la distance au niveau, elle doit, en vertu de l'équilibre, supporter de bas en haut une pression égale et contraire, sans quoi elle se déplacerait.

151. Pression sur une surface solide. — Une surface solide occupant la position d'une surface liquide dans

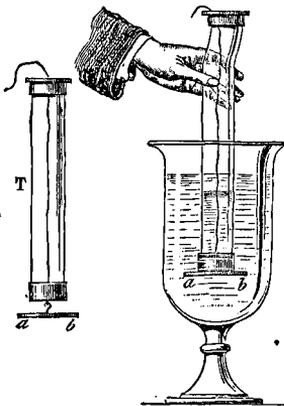


Fig. 97.

une masse liquide doit éprouver les mêmes pressions puisque ces pressions ne proviennent que du liquide qui appuie sur la surface. Voici d'ailleurs comment on le vérifie.

Un disque de verre poli, très léger, ab , appelé *obturateur*, est tenu par un fil et appliqué contre un cylindre de verre T dont la base est rodée à l'émeri (fig. 97); le cylindre étant plongé dans l'eau, le disque de verre se trouve maintenu contre le cylindre sans qu'il soit nécessaire de tendre le fil. On verse alors de l'eau légè-

rement teintée dans le cylindre, le disque se détache par son propre poids, comme il se détacherait dans l'air, quand il éprouve une même pression de la part du liquide à l'intérieur et à l'extérieur; ceci arrive quand le niveau de l'eau à l'intérieur du vase est le même qu'à l'extérieur.

152. Pressions sur les parois des vases. — Un liquide pesant exerce des pressions sur le fond et sur les parois latérales du vase qui le contient.

153. Pression sur le fond. — La pression d'un liquide de poids spécifique δ sur le fond plan et horizontal d'un vase est égale au poids $Sh\delta$ d'une colonne de ce liquide ayant pour base le fond S du vase et pour hauteur la distance verticale h du fond au niveau libre. Cela résulte des propositions établies précédemment.

En effet, le fond du vase est une surface horizontale et par conséquent une surface de niveau sur laquelle la pression a la même valeur en tous les points.

Si nous considérons un élément sur le fond, la pression qu'il supporte est égale au poids d'une colonne liquide ayant pour base la surface de cet élément, et pour hauteur la distance du fond à la surface libre. Il en est de même pour tous les éléments, et la somme des pressions ou la résultante est égale au poids d'une colonne liquide ayant pour base la surface du fond et pour hauteur la distance au niveau libre, et cela, *quelle que soit la forme du vase.*

Il faut ajouter à cette pression la pression exercée par le milieu extérieur sur une portion de la surface libre égale à la surface du fond : p étant la pression du milieu extérieur par unité de surface de la surface libre, cette pression est Sp . La pression totale sur le fond sera $Sp + Sh\delta$.

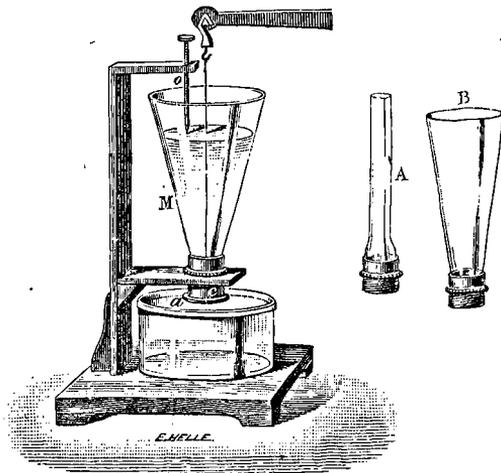


Fig. 98.

Démonstration expérimentale (fig. 98). — Un support est garni

d'un anneau dont le bord inférieur bien dressé peut être fermé par un obturateur de verre a suspendu au moyen d'un fil à l'un des bras d'une balance hydrostatique. On fait équilibre avec une tare placée dans l'autre plateau de la balance. La hauteur de la balance est réglée pour que l'obturateur ferme exactement l'ouverture de l'anneau quand le fléau est horizontal. On met un poids à côté de la tare de l'obturateur et on visse dans l'anneau des vases de formes diverses, M, A, B, qui ont tous l'obturateur pour fond. En versant lentement et graduellement de l'eau dans le vase, le fond mobile se détache toujours quand le liquide a atteint une même hauteur h , marquée par une pointe o disposée latéralement.

La pression exercée sur le fond du vase est la pression qui détache l'obturateur; elle est indépendante de la forme du vase, elle ne dépend que de la surface du fond et de sa distance au niveau libre. On constate de plus, autant que le permet la précision de l'expérience, que cette pression équivaut au poids d'une colonne cylindrique ayant pour base le fond et pour hauteur la hauteur commune dans les différents vases.

Appareil de Haldat (fig. 99). — On démontre encore avec un autre appareil que la pression sur le fond d'un vase ne dépend pas de la

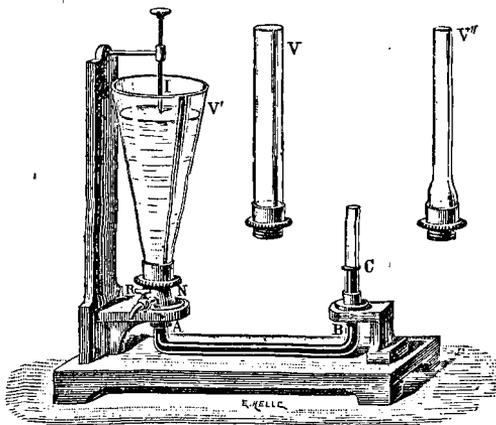


Fig. 99.

forme du vase. On verse du mercure dans un tube de fer recourbé AB, terminé d'un côté par un tube de verre solidement mastiqué et de l'autre par une monture N sur laquelle on peut visser trois vases de verre, l'un cylindrique, le deuxième élargi et le troisième rétréci vers le haut. On visse l'un des vases et l'on y verse de l'eau jusqu'à ce que le mercure

monte au niveau d'un repère C tracé sur le tube. On descend alors une pointe I jusqu'à la surface du liquide dans le vase. En opérant avec les autres vases remplis jusqu'au niveau de la pointe, le mercure s'élève toujours jusqu'au même repère C. La pression trans-

mise au fond mobile de mercure est donc dans tous les cas équilibrée par *la même colonne de mercure*, bien que le poids total de liquide contenu dans les différents vases soit très différent.

154. Pressions sur les parois latérales. — Par suite de la transmission des pressions dans un liquide, les parois latérales éprouvent aussi des pressions.

L'existence de ces pressions est démontrée par l'écoulement qui se produit quand on pratique une ouverture dans une paroi latérale d'un vase plein d'eau : le liquide jaillit, ce qui prouve la pression ; en outre, la direction du jet est *normale*, ce qui fait voir que la pression est normale à la paroi. Le jet s'infléchit ensuite sous l'action de la pesanteur. Si l'on cherche à empêcher l'écoulement en appliquant le doigt contre l'orifice, on éprouve une pression qui va en augmentant avec la distance au niveau.

La pression normale que supporte un *très petit élément* plan d'une paroi latérale est égale au *poids d'une colonne qui a pour base cette paroi et pour hauteur la distance verticale de cet élément au niveau du liquide* dans le vase ; en effet, en raison de ce que les pressions se transmettent avec une égale intensité dans tous les sens, c'est la pression que supporterait le même élément si on le faisait tourner autour de son centre de manière à le rendre horizontal.

Sur une petite portion S de la paroi dont la distance au niveau supérieur dans le tube est h , la pression est $Sh\delta$.

Cette pression peut devenir très grande même avec une petite quantité de liquide. Citons comme exemple l'expérience du *tonneau de Pascal*. Un tonneau dressé sur une de ses bases, est surmonté d'un long tube de petit diamètre fixé perpendiculairement à la base supérieure. Le tonneau et le tube sont remplis d'eau. Si le tube est assez long, la pression sur les parois latérales peut être assez forte pour les disjoindre (fig. 100).

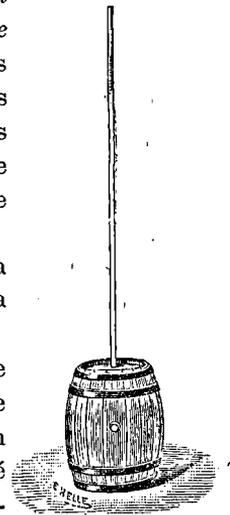


Fig. 100.

Pour une *portion étendue* d'une paroi plane, on décompose la surface de la paroi en éléments très petits ; la pression totale est la somme des poids des filets liquides qui ont pour bases les éléments plans et pour hauteurs les distances verticales de chacun d'eux au

niveau. On démontre que *cette somme*, c'est-à-dire la pression sur une portion plane quelconque de la paroi latérale est *égale au poids d'un prisme liquide ayant pour base la surface considérée et ayant pour hauteur la distance verticale entre le niveau et le centre de gravité de la surface*⁽¹⁾. Le point d'application de la pression du liquide est appelé **centre de pression**, il est situé *plus bas que le centre de gravité*. En effet, le centre de gravité est le point d'application de la résultante des poids, forces parallèles réparties uniformément sur la surface; le centre de pression est le point d'application de forces parallèles qui vont en croissant avec la profondeur. Pour chercher le point d'application de la résultante, on peut supposer ces forces dirigées parallèlement aux poids, puisque la position du point d'application ne dépend pas de la direction des forces. Ce point d'application, plus rapproché des plus grandes forces, sera plus bas que le centre de gravité.

On peut faire tourner une surface plane autour de son centre de gravité sans changer la valeur de la pression du liquide sur la surface, mais on déplace le centre de pression. Si l'on rend la surface horizontale par une rotation autour de son centre de gravité, le prisme liquide qui repose sur la surface mesure alors la pression, et le centre de poussée coïncide dans ce cas avec le centre de gravité.

155. Paradoxe hydrostatique. — Il ne faut pas confondre la pression exercée sur le fond d'un vase et la pression sur le support qui soutient le vase. Des vases de même fond, mais de formes diverses, remplis jusqu'à la même hauteur, exercent sur le fond horizontal la même pression, mais ils n'ont pas le même poids (*paradoxe hydrostatique*). Si on les place sur le plateau d'une balance, les composantes verticales des pressions latérales se transmettent au plateau de la balance et s'ajoutent aux pressions supportées par le fond ou s'en retranchent suivant leur sens, de sorte que *l'effort exercé par le vase entier est égal au poids du liquide qu'il renferme, accru du poids du vase*.

Supposons trois vases différents A, B, C ayant la même base et dans lesquels un liquide s'élève à la même hauteur.

Dans le vase cylindrique A (fig. 101), sur chaque élément de paroi latérale la pression est normale à la paroi et par conséquent horizon-

(1) C'est visible pour une surface plane ayant un centre de figure; on peut la décomposer en éléments superficiels qu'on considérera par groupes de deux éléments égaux symétriquement placés par rapport au centre et pour lesquels les pressions sont $\sigma(h + h') = \sigma H$; H est la distance du centre de figure à la surface libre, h et h' sont les côtés parallèles d'un trapèze.

tale, elle n'a pas d'action sur une balance; dans ce cas, la pression sur le fond et le poids du liquide ont la même valeur.

Dans le vase C (fig. 102), évasé à sa partie supérieure, la pression sur un élément de la paroi latérale tel que ab de surface σ est normale à la paroi, égale à $\sigma h \delta$ et dirigée suivant Op , nous pouvons la décomposer en une composante horizontale Op_2 et une composante verti-

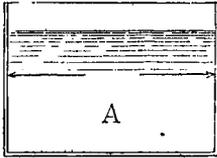


Fig. 101.

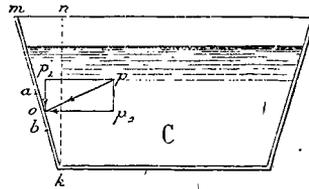


Fig. 102.

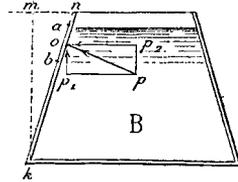


Fig. 103.

cale Op_1 ; la composante Op_2 n'a pas d'action sur la balance; la composante verticale Op_1 a pour valeur $\sigma h \delta \cos \varphi$ (fig. 102 bis); ou $\sigma' h \delta$, σ' désignant la projection $a'b$ de l'élément ab sur la surface du niveau libre, car $\sigma' = \sigma \cos \varphi$; $\sigma' h \delta$ est le poids d'un filet liquide vertical de base $a'b$ qui va du niveau libre au point considéré de la paroi. La somme des composantes verticales telles que Op_1 est égale au poids du liquide qui serait contenu dans l'espace triangulaire mnk . La pression sur le fond est inférieure au poids du liquide contenu dans le vase.

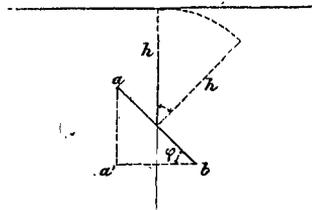


Fig. 102 bis.

Pour le vase B (fig. 103), rétréci à sa partie supérieure on peut répéter les mêmes décompositions, mais ici les composantes verticales tendent à soulever le vase, et leur résultante est encore égale au poids du liquide qui serait contenu dans l'espace triangulaire mnk . La pression sur le fond est supérieure au poids du liquide.

156. Recul dû à l'écoulement. — Chariot à réaction. — Les composantes horizontales des pressions exercées sur les parois latérales sont sans influence sur le plateau d'une balance, car elles sont égales et opposées. Pour prouver leur existence, on prend un vase en cuivre très mince porté sur des roulettes fort mobiles et rempli d'eau. Si on y pratique un orifice latéral, le liquide jaillit et la pression qui s'y exerçait est supprimée. La pression diamétralement opposée continue à agir et pousse l'équipage en sens inverse de l'écoulement.

Tourniquet hydraulique. — Le recul produit par l'écoulement se

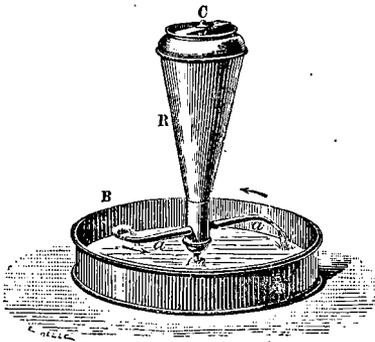


Fig. 104.

démontre encore par le tourniquet hydraulique. C'est un vase conique R portant à sa partie inférieure deux tubulures *a* en prolongement, dont les extrémités sont recourbées horizontalement en sens contraire et librement ouvertes. Le vase est rempli d'eau et mobile autour d'un axe vertical C (fig. 104). L'eau s'écoule à la fois par les deux ouvertures et l'appareil tourne en *sens inverse* de l'écoulement. Les portions

de tube opposées aux ouvertures sont en effet le siège de pressions horizontales qui sont contrebalancées si les ouvertures des tubes

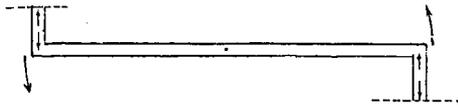


Fig. 105.

sont bouchées par des obturateurs (fig. 105), et qui produisent le mouvement dès qu'elles sont découvertes.

PRESSIONS SUR LES CORPS IMMERGÉS

157. PRINCIPE D'ARCHIMÈDE. — Un liquide agit sur un corps qui y est plongé comme il agirait sur les parois d'un vase. Ces pressions ont une résultante verticale dite **poussée**, dirigée de bas en haut et égale au poids du liquide déplacé par le corps.

Démonstration théorique. — Ce résultat peut être prévu par les considérations suivantes : Soit un prisme rectangle vertical plongé dans un liquide (fig. 106), S sa section droite, H sa hauteur. La pression du liquide sur la base inférieure du prisme est verticale, dirigée de bas en haut et égale à $Sh\delta$, h distance de la base inférieure au niveau libre du liquide; la pression sur la base supérieure est également verticale, elle est dirigée de haut en bas et égale à $Sh'\delta$, h' dis-

tance de la base supérieure au niveau du liquide. La différence entre ces deux pressions est verticale, dirigée de bas en haut et égale à $S(h - h')\delta$, ou $SH\delta$: elle est égale au poids du liquide déplacé par le prisme.

Les pressions latérales n'ont aucun effet; car sur deux éléments ω égaux (fig. 107), situés au

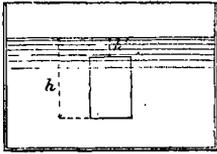


Fig. 106.

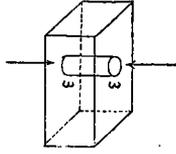


Fig. 107.

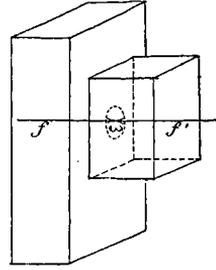


Fig. 108.

même niveau et sur des faces en regard, les pressions sont horizontales, égales et directement opposées.

On raisonne de la même façon sur un faisceau de prismes accolés, ayant leurs arêtes verticales (fig. 108). Chacun éprouve sur ses faces supérieure et inférieure des pressions dont la différence est une poussée verticale égale au poids du liquide déplacé. La poussée totale est la somme des poussées verticales exercées sur chacun des prismes ou au poids total du liquide déplacé. Quant aux poussées horizontales, elles se détruisent encore complètement : nous pouvons en effet considérer chacun des prismes comme subissant l'action du liquide sur tout son pourtour; cela revient à introduire sur chacun des éléments d'une face de contact de deux prismes cachée à l'action du liquide deux pressions égales et contraires, l'une f' attribuée au premier prisme, l'autre f attribuée au deuxième. L'introduction de ces pressions égales et contraires deux à deux ne change évidemment rien.

Un corps quelconque pouvant être supposé décomposé en un faisceau de prismes verticaux de section très petite, cette démonstration s'applique à un corps quelconque.

Démonstration expérimentale (fig. 109). — A l'un des plateaux d'une balance hydrostatique (balance dans laquelle le plan d'acier qui supporte le couteau du fléau peut s'élever et s'abaisser à volonté, à l'aide d'une crémaillère) on suspend un cylindre de laiton creux C et au-dessous un cylindre massif D qui peut entrer exactement dans l'intérieur du cylindre creux et dont le volume est par conséquent

égal au volume intérieur du cylindre creux⁽¹⁾. Le système étant équilibré sur l'autre plateau avec une tare B, on fait descendre le fléau de la balance hydrostatique et on plonge le cylindre plein dans un vase plein d'eau; l'équilibre est rompu et le fléau est soulevé comme si le cylindre plein *perdait une partie de son poids*. On rétablit l'équi-

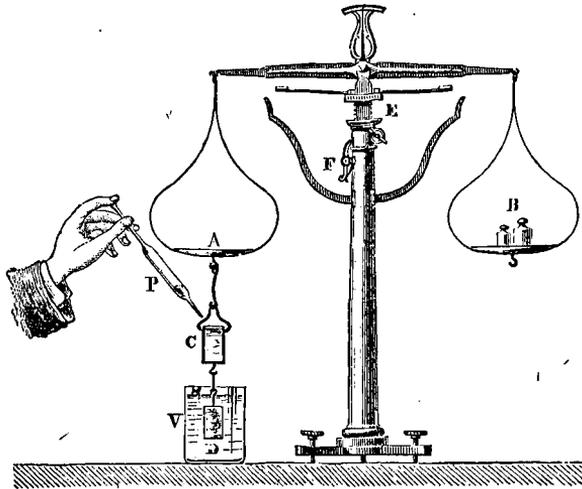


Fig. 109.

libre en remplissant d'eau le cylindre creux; le cylindre plein étant alors complètement plongé dans l'eau, le fléau de la balance est redevenu horizontal. La poussée est donc égale au poids de l'eau qui remplit le cylindre creux ou de l'eau que déplace le cylindre plein⁽²⁾.

Pour opérer avec un corps A de forme quelconque, on place sur un des plateaux de la balance un vase vide v' et on suspend au même plateau le corps A. On établit l'équilibre sur l'autre plateau avec une tare. On fait plonger le corps A dans un récipient contenant de l'eau jusqu'à un repère r (fig. 110). L'équilibre est rompu, le niveau monte en r' , le volume du liquide compris de r en r' est le volume du liquide déplacé. L'équilibre se rétablit si on verse dans le vase vide v' l'eau comprise entre les deux repères r et r' .

Il est plus commode de faire usage d'un récipient V muni d'une tubulure

(1) Quand on a emboîté le cylindre plein dans le cylindre creux et qu'on vient ensuite à le tirer brusquement, on entend un bruit causé par la rentrée de l'air dans le vide que l'adhérence complète des deux cylindres avait produit.

(2) L'expérience se fait plus commodément en renversant l'ordre des opérations. Ayant suspendu au plateau de la balance le cylindre creux et au-dessous le cylindre plein et établi l'équilibre au moyen d'une tare, on remplit d'eau le cylindre creux, l'équilibre est rompu, mais on le rétablit en plongeant complètement dans l'eau le cylindre plein.

recourbée v formant un *trop plein*; le récipient est d'abord exactement rempli d'eau jusqu'à la tubulure avant que le corps y soit plongé. Si l'on fait plonger

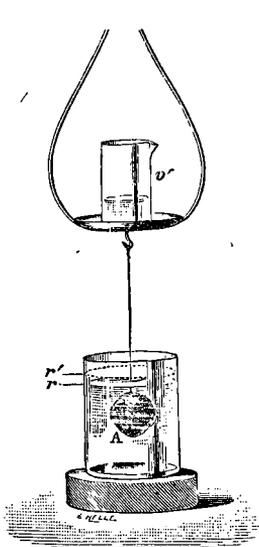


Fig. 110.

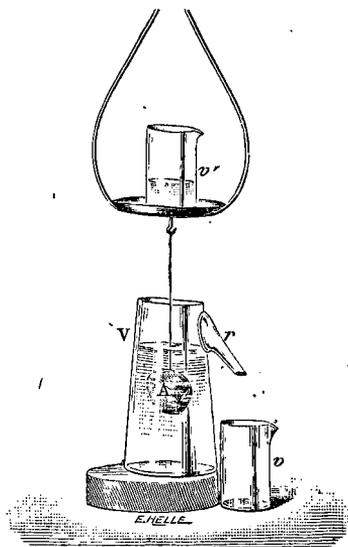


Fig. 111.

le corps A dans le récipient, le liquide qui monterait entre les deux repères s'écoule, on le recueille en v et on le verse dans le vase v' . L'équilibre est alors rétabli (fig. 111).

158. Réaction exercée par un corps sur le liquide dans lequel il est plongé. — Un corps plongé subit une poussée, de bas

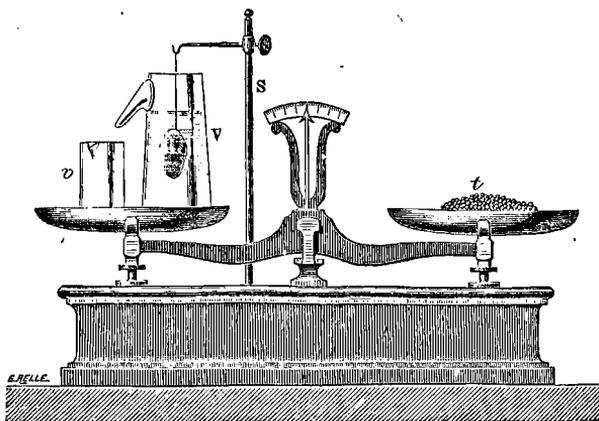


Fig. 112

en haut, de la part de l'eau, mais il exerce aussi une réaction égale sur l'eau, dirigée de haut en bas. C'est une application du principe général de l'égalité de l'action et de la réaction (39).

Sur un des plateaux d'une balance (fig. 112) on place un vase à trop plein V rempli d'eau jusqu'à la tubulure recourbée et venant déboucher au-dessus d'un vase vide v ; on équilibre le tout de l'autre côté par une tare t . Dans le vase V on plonge un corps quelconque soutenu par un support S indépendant afin que son poids n'agisse pas sur le plateau de la balance; le niveau monte et le liquide déplacé par le corps s'écoule dans le vase v . Le plateau de la balance s'incline, accusant une poussée exercée par le corps sur l'eau dans laquelle il est plongé. Pour rétablir l'équilibre, il suffit d'enlever l'eau du vase v . La poussée exercée sur l'eau par le corps de haut en bas est donc égale au poids du liquide déplacé⁽¹⁾, elle augmente le poids apparent du liquide.

159. Corps immergés et corps flottants. — Tout corps plongé dans un liquide est sollicité par deux forces verticales : 1° le poids P du corps dirigé de haut en bas et appliqué à son centre de gravité; 2° la poussée verticale π dirigée de bas en haut, égale au poids du liquide déplacé et appliquée au centre de poussée (centre de gravité du liquide déplacé)⁽²⁾.

La force qui fait tomber le corps est la différence $P - \pi$. Cette dif-

(1) Lorsque, après avoir fait la tare d'un vase plein d'eau et d'un corps placé à côté dans le plateau d'une balance, on vient à plonger le corps dans le vase, le corps plongé éprouve une poussée de bas en haut de la part du liquide, mais il réagit sur l'eau par une poussée de sens contraire, et comme ces deux efforts égaux se détruisent, l'équilibre établi subsiste.

(2) Voici comment on peut reconnaître théoriquement que le centre de poussée coïncide avec le centre de gravité. Nous avons vu (157) qu'un corps plongé peut être supposé décomposé en prismes verticaux de section infiniment petite subissant la pression du liquide sur toute leur surface. Ces prismes peuvent être partagés à leur tour en prismes de très petite hauteur par des plans horizontaux très rapprochés. Ces petits prismes peuvent être considérés comme subissant la pression du liquide sur toute leur surface, car on ne fait ainsi qu'introduire sur chacune des nouvelles surfaces horizontales de séparation telles que ab deux pressions égales et contraires (fig. 113).

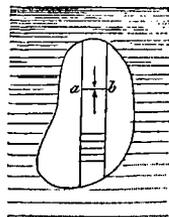


Fig. 113.

Le corps se trouve décomposé en éléments de volume subissant tous une poussée; toutes ces poussées partielles, égales respectivement au poids de l'élément déplacé, auront pour résultante le poids total du liquide déplacé; le point d'application de cette résultante sera le centre de gravité du liquide déplacé, car la décomposition qu'on ferait du liquide en éléments, pour trouver son centre de gravité est précisément la décomposition qui vient d'être faite pour trouver le centre de poussée.

férence entre le poids absolu du corps et la poussée est son **poids apparent**.

$P > \varpi$: le corps est plus lourd que le liquide déplacé et descend au fond du liquide, mais sa chute est moins rapide que dans l'air, car la force qui le fait tomber est inférieure à son poids dans l'air.

$P < \varpi$: le corps est, à volume égal, plus léger que le liquide déplacé, la poussée l'emporte sur son poids, il remonte vers la surface. Quand il est sorti en partie de l'eau, la poussée a diminué ; il arrive un moment où la *poussée devient égale au poids qui reste immergé*. A ce moment, le corps cesse de monter, il flotte et son poids est égal au poids du liquide déplacé.

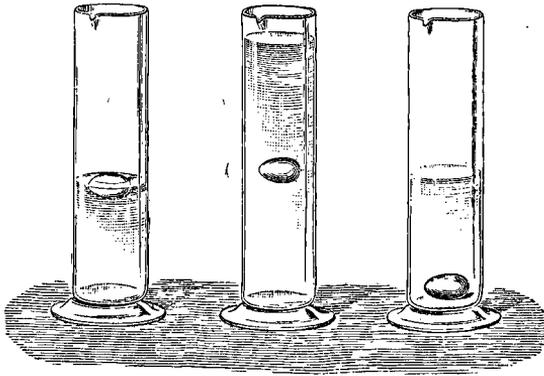


Fig. 114.

$P = \varpi$: le corps peut rester immergé où on le place dans le liquide sans monter ni descendre.

Voici comment on peut réaliser ces trois cas. Un œuf plongé dans l'eau pure tombe au fond, car sa densité moyenne est supérieure à celle de l'eau ; dans l'eau saturée de sel marin, il flotte ; dans un mélange en proportions convenables d'eau pure et d'eau saturée de sel, il reste où on le place dans le liquide (fig. 114).

160. Équilibre des corps flottants. — Le poids d'un corps flottant ou d'un corps immergé en équilibre à l'intérieur d'un liquide est égal au poids du liquide déplacé ; on peut le constater avec un vase à trop plein V. Le poids du liquide écoulé en v est égal au poids du corps flottant ou du corps immergé A (fig. 115).

Pour un corps immergé *homogène* en équilibre, le centre de gravité du corps coïncide avec le centre de gravité du liquide déplacé.

Les deux forces étant appliquées au même point, l'équilibre aura lieu quelle que soit la position du corps plongé dans le liquide.

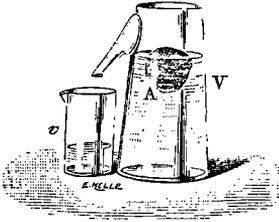


Fig. 115.

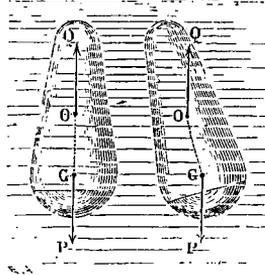


Fig. 116.

Pour un corps immergé *hétérogène* le centre de gravité du corps et le centre de gravité du liquide déplacé peuvent ne pas coïncider. Il faut pour l'équilibre que le centre de gravité G et le centre de poussée O soient *sur une même verticale*. Sans quoi les deux forces égales appliquées en G et en O formeraient un couple qui dirigerait le corps jusqu'à ce que les deux points fussent ramenés sur la même verticale (fig. 116). On rend au besoin l'équilibre *stable* en lestant le corps plongé avec un corps lourd, ce qui fait descendre le centre de gravité.

En résumé, pour qu'un corps flottant soit en équilibre, il faut : 1° que le poids du liquide déplacé soit égal au poids total du corps flottant; 2° que le centre de gravité du corps et le centre de gravité du liquide déplacé soient sur une même verticale.

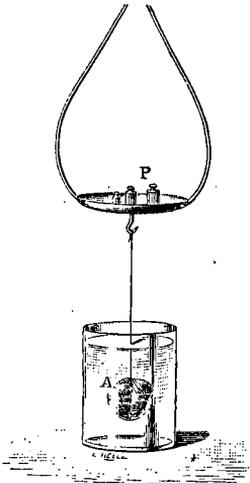


Fig. 117.

161. Détermination expérimentale du volume d'un corps solide. — On suspend le corps A au plateau d'une balance et on lui fait équilibre par une tare dans l'autre plateau. On plonge ensuite le corps dans l'eau distillée à t^0 , il éprouve une poussée. On rétablit l'équilibre avec M grammes placés sur le plateau auquel le corps est suspendu (fig. 117); ces M grammes font équilibre par leur poids Mg au poids VDg de l'eau déplacée; V volume du corps en centimètres cubes, D densité de l'eau à t^0

$$Mg = VDg; \quad V = \frac{M}{D}.$$

Comme D est très voisin de l'unité, le nombre V qui représente le volume du corps en centimètres cubes est sensiblement le même que le nombre M qui donne la masse de l'eau déplacée, en grammes.

Applications. — 1° La surface du petit piston d'une presse hydraulique est de 3 centimètres carrés et celle du large piston de 1 décimètre 8. Quel effort pourra exercer le large piston si l'on applique 4 kilogrammes sur le petit?

2° Pression exercée sur un centimètre carré par une colonne de mercure d'une hauteur de 1 mètre?

3° Un vase plein d'eau ayant la forme d'un cône droit est posé sur un plan horizontal, sa base a une surface de 1 décimètre carré, son volume est 1 décimètre cube. Quelle est la pression sur sa base?

4° Un vase cubique, de 20 centimètres de côté, est à moitié rempli de mercure; on achève de le remplir avec de l'eau. Quelle est la pression sur une des faces verticales du cube, la densité du mercure étant 13,6?

5° Calculer la pression sur un disque circulaire de 16 centimètres de diamètre plongé dans le mercure, le centre du cercle étant à une distance de 25 centimètres de la surface libre?

6° Un cylindre dont la base a une surface de 25 centimètres carrés repose sur un plan horizontal. Sur le couvercle supérieur est assujéti un tube vertical ayant 10 mètres de hauteur. Le cylindre et le tube sont pleins d'eau. Quelle est la pression P qui tend à soulever le couvercle supérieur? Quel est l'accroissement de pression δP qui résulte de l'introduction de 50 grammes d'eau si le tube a une section de 1 centimètre carré?

7° Deux sphères métalliques, dont les densités sont 5 et 10, ont un même poids P dans le vide. On les suspend aux extrémités d'un levier et on les fait plonger dans l'eau.

Quel doit être le rapport $\frac{l}{l'}$ des deux bras de levier pour qu'il y ait équilibre?

8° Un vase plein d'huile équilibré par une tare est placé sur l'un des plateaux d'une balance. On y enfonce un cube de plomb de 5 centimètres de côté tenu à la main à l'aide d'un fil métallique. Quel poids faut-il ajouter sur l'autre plateau pour rétablir l'équilibre? Densité de l'huile, 0,92.

9° Un objet en or, de densité 19,25, pèse 96^{gr}25; plongé dans l'eau il déplace 6 grammes. L'objet est-il creux? Quelle est la grandeur de la cavité?

10° Un corps reste en équilibre au milieu de l'eau; on le plonge dans l'acide sulfurique de densité 1,85; il faut ajouter un poids de 42^{gr}5 pour l'immerger. Trouver son volume v .

11° Une sphère de densité 0,95 et d'un volume de 100 centimètres cubes flotte sur l'eau. On verse de l'huile de densité 0,9 de manière à recouvrir entièrement la sphère. Quel est le volume immergé dans l'eau?

12° Une couronne massive formée d'or et d'argent et pesant 10 kilos perd 625 grammes dans l'eau. Combien contient-elle d'or? Densité de l'or 20, densité de l'argent 10.

DÉTERMINATION DES DENSITÉS

162. *La densité d'un corps à t^0 est la masse d'un centimètre cube de ce corps à t^0 .*

On obtient la densité d'un corps à t^0 en prenant le rapport de la masse du corps en grammes à son volume à t^0 en centimètres cubes. Comme le volume d'un corps en centimètres cubes est, d'après

notre choix d'unités, exprimé par le même nombre que la masse d'un volume d'eau (eau à 4°) égal au volume du corps, la densité d'un corps est encore le rapport des masses ou des poids de volumes égaux du corps à t^0 et d'eau à 4°.

Pour déterminer la densité d'un corps à t^0 , on mesure par la méthode des doubles pesées : 1° la masse du corps ou son poids en grammes ; 2° la masse ou le poids en grammes d'un volume d'eau à 4° égal au volume du corps à t^0 . Le quotient est la densité à t^0 .

Nous décrirons trois méthodes : la méthode du flacon par laquelle on détermine la densité d'un corps à 0°, et les méthodes moins précises de la balance hydrostatique et des aréomètres.

MÉTHODE DU FLACON

163. Corps liquides. — *Appareil.* — Le flacon employé est un réservoir A cylindrique ou sphérique en verre mince surmonté d'un tube capillaire et d'un entonnoir B fermé par un bouchon. Un trait de repère O est marqué sur le tube capillaire. On détermine successivement les masses de liquide et d'eau contenues dans le flacon à 0° jusqu'au trait (fig. 118).

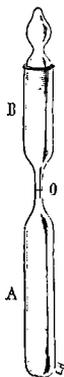


Fig. 118.

Expérience. — Le flacon plein de liquide est amené à la température de 0° dans la glace fondante ; quand le volume du liquide ne varie plus, on enlève l'excès de liquide au-dessus du trait avec du papier buvard. Le flacon est retiré de la glace ; quand il est revenu à la température ambiante et essuyé, on le porte sur le plateau d'une balance et on établit l'équilibre avec une tare placée dans l'autre plateau. On vide le flacon, on le dessèche intérieurement et on le reporte vide sur son plateau, on achève de faire équilibre à la tare avec M grammes de la boîte de poids. M représente la *masse du liquide* contenu dans le flacon à 0° jusqu'au trait de repère.

En répétant ces opérations avec de l'eau distillée, on obtient la masse d'eau M'' contenue dans le flacon à 0°. On a opéré à 0° parce qu'il est aisé de maintenir un corps à 0° au moyen de la glace fondante, tandis qu'il serait difficile de le maintenir à 4°.

Calcul. — M étant la masse du liquide à 0°, M' la masse d'un égal volume d'eau à 4°, la densité du liquide à 0° est $D_0 = \frac{M}{M'}$, mais ce

n'est pas M' que nous avons mesuré, c'est la masse M'' d'un égal volume d'eau à 0° . Or $M' = \frac{M''}{e_0}$ d'après la relation $e_0 = \frac{M''}{M'}$.

e_0 est la densité de l'eau à 0° , connue par des expériences spéciales.

$$\text{On aura donc } D_0 = \frac{M}{M'} = \frac{M}{M''} e_0$$

e_0 est un nombre très voisin de l'unité, 0,9998.

On aurait la densité du liquide à t° en plaçant le flacon successivement plein de liquide et plein d'eau dans un bain à t° , M_1 et M_1'' étant les masses de liquide et d'eau contenues jusqu'au trait

$$D_t = \frac{M_1}{M_1''} e_t$$

e_t est la densité de l'eau à t° .

164. Corps solides. — *Appareil.* — Le flacon A est fermé par un bouchon creux B terminé par un tube capillaire et un entonnoir. Un trait de repère O est marqué sur le tube capillaire (fig. 119).

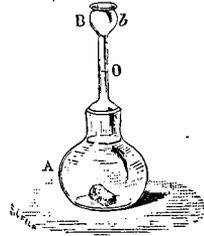


Fig. 119.

Expérience. — Le flacon plein d'eau distillée et privée d'air par ébullition est plongé dans la glace fondante; quand le niveau ne varie plus dans le tube, on enlève l'excès d'eau au-dessus du trait avec du papier buvard. Le flacon, retiré de la glace, essuyé et revenu à la température ambiante, est porté sur le plateau d'une balance à côté d'un fragment du solide dont on veut la densité. On fait la tare du flacon et du corps, on enlève ensuite le corps et on le remplace par M grammes, c'est la masse du corps, par double pesée.

Les poids marqués et le flacon étant enlevés, on introduit le corps dans le flacon en expulsant avec soin les bulles d'air adhérentes. Le flacon est placé dans la glace fondante; quand le niveau ne varie plus, on enlève l'excès d'eau qui dépasse le trait de repère. Le flacon essuyé et revenu à la température ambiante est reporté sur le plateau de la balance; il est maintenant trop léger, car il est sorti du flacon un volume d'eau égal au volume du corps à 0° ; les poids M'' qui rétablissent l'équilibre primitif représentent la masse d'un égal volume d'eau à 0° .

Calcul. — En appelant M' la masse d'un volume d'eau à 4^0 égal au volume du corps à 0^0 ,

$$\text{la densité du corps à } 0^0 \text{ sera } D_0 = \frac{M}{M'}$$

$$\text{ou } \frac{M}{M''} e_0^{(1)}.$$

MÉTHODE DE LA BALANCE HYDROSTATIQUE

165. Corps solides. — *Expérience.* — Un fragment du corps solide est suspendu par un fil fin de platine sous le plateau d'une balance ; on établit l'équilibre avec une tare. On immerge le corps complètement dans l'eau distillée, et on détache avec soin les bulles d'air adhérentes. L'équilibre est rompu, la balance s'incline du côté de la tare, les poids M'' placés du côté du corps pour rétablir l'équilibre (fig. 120) représentent, d'après le principe d'Archimède, la poussée subie par le corps plongé ou la masse d'un volume d'eau égal au volume du corps.

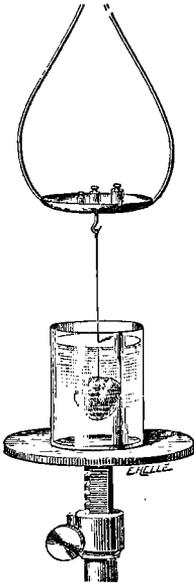


Fig. 120.

On enlève le corps en laissant sous le plateau le fil qui le supportait et on rétablit l'équilibre par un poids M , c'est la masse du corps.

Calcul. — Si l'eau dans laquelle le corps a été plongé était à la température de t^0 , la densité du corps à t^0 sera

$$D_t = \frac{M}{M''} e_t$$

e_t étant la densité de l'eau à t_0 . On pourra se contenter de $\frac{M}{M''}$, car la méthode ne comporte pas assez de précision pour qu'il soit utile de multiplier par e_t le quotient effectué.

(1) Lorsque la substance solide est altérable par l'eau (sucre, poudre de guerre, etc.) le remplissage du flacon se fait avec un liquide de densité δ_0 dans lequel la substance n'est ni dissoute ni attaquée; ce liquide auxiliaire à 0^0 joue le même rôle que l'eau à 0^0 des expériences précédentes. Désignons par M la masse du solide à 0^0 , par μ'' la masse d'un égal volume du liquide à 0^0 , par M' la masse d'un égal volume d'eau à 4^0 ,

$$D_0 = \frac{M}{M'} = \frac{M}{\mu''} \delta_0$$

$$\text{car } M' = \frac{\mu''}{\delta_0} \text{ d'après la relation } \delta_0 = \frac{\mu''}{M'}$$

166. Corps liquidés. — *Expérience.* — Au-dessous de l'un des plateaux d'une balance on suspend avec un fil de platine fin une boule de verre lestée avec du mercure et on lui fait équilibre avec une tare. La boule est immergée complètement dans le liquide dont on cherche la densité. L'équilibre est rompu, le nombre de grammes M qui rétablit l'équilibre représente la poussée du liquide ou la masse du liquide déplacé par la boule.

On détermine de la même façon la masse M'' de l'eau déplacée par la boule.

Calcul. — Si le liquide et l'eau ont été maintenus à t^0 , M et M'' sont les masses de volumes égaux de liquide et d'eau à t^0 ,

$$D_t = \frac{M}{M''} e_t \quad \text{ou simplement} \quad \frac{M}{M''}.$$

MÉTHODE DES ARÉOMÈTRES A VOLUME CONSTANT

Les aréomètres à volume constant sont des flotteurs qui servent à mesurer les densités d'une façon approchée, sans le secours de la balance.

167. Aréomètre de Nicholson. — *Appareil.* — L'aréomètre de Nicholson employé pour la détermination des densités des corps solides se

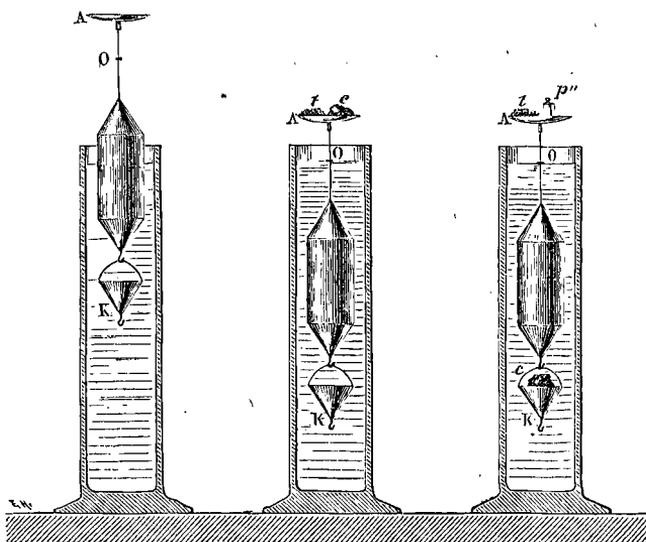


Fig. 121.

Fig. 122.

Fig. 123.

compose d'un cylindre métallique creux terminé de part et d'autre par deux cônes (fig. 121). Le cône supérieur porte sur le prolongement de son axe une tige déliée surmontée d'une petite coupe A; un *trait de repère* O est marqué sur cette tige; le cône inférieur, muni d'un crochet, supporte une corbeille K, lestée par du plomb.

Expérience. — Pour déterminer le poids d'un corps en grammes ou sa masse, on plonge l'aréomètre dans l'eau distillée où il flotte et sur la coupe supérieure on pose le corps *c*. On ajoute de la tare *t* pour produire l'affleurement au trait O (fig. 122). *Le poids total de l'instrument et de la tare est alors égal au poids de l'eau déplacée (159)*. On enlève le corps et on le remplace par des poids marqués *M* suffisants pour produire le même affleurement. Ces poids représentent par double pesée la *masse du corps*. L'aréomètre a fonctionné comme une balance.

On enlève les poids en laissant la tare et on place le corps sur la corbeille. Bien que le poids total de l'instrument n'ait pas varié, l'affleurement n'a plus lieu en O : cela provient de la poussée éprouvée par le corps immergé.

Les poids *M'* nécessaires pour reproduire l'affleurement primitif donnent en grammes le poids de l'eau déplacée par le corps ou la *masse de cette eau* (fig. 123).

Calcul. — Si la détermination est faite à t^0 ,

$$D_t = \frac{M}{M'} e_t$$

Vu le peu de sensibilité et de précision de l'instrument, on se contentera

de $\frac{M}{M'}$.

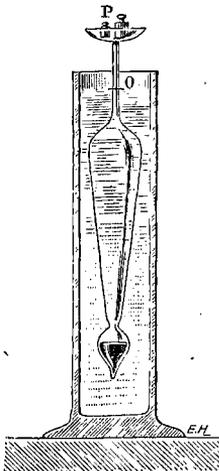


Fig. 124.

168. Aréomètre de Fahrenheit. — *Appareil.* —

Cet instrument, destiné à mesurer la densité des liquides, est un flotteur en verre terminé à la partie inférieure par une boule lestée avec du mercure et à la partie supérieure par une tige surmontée d'une coupe. Un *trait de repère* O est marqué sur la tige⁽¹⁾.

Expérience. — Le poids en grammes μ de l'instrument a été déterminé à l'avance. On le plonge dans le liquide dont on veut déterminer la densité et on ajoute sur la coupe des poids suffisants *M* pour produire l'affleurement jusqu'au trait O (fig. 124).

La masse totale du corps flottant ou la *masse du liquide déplacé* est $\mu + M$.

On produit ensuite l'affleurement dans l'eau distillée avec un poids *M'*; $\mu + M'$ est la *masse de l'eau déplacée* ou d'un volume d'eau égal au volume du liquide:

(1) L'aréomètre de Fahrenheit peut servir, comme l'aréomètre de Nicholson, à remplacer une balance pour déterminer la masse d'un corps solide.

Calcul. — Si le liquide et l'eau se trouvaient à t^0 ,

$$D_t = \frac{\mu + M}{\mu + M'} e_t \quad \text{ou sensiblement} \quad \frac{\mu + M}{\mu + M'}$$

ARÉOMÈTRES A POIDS CONSTANT

169. — Les aréomètres à poids constant sont des *flotteurs* formés d'un tube *cylindrique* en verre portant à la partie inférieure un renflement suivi d'une boule qui contient du mercure de façon à maintenir l'appareil verticalement en équilibre stable dans un liquide. Ces instruments *n'ont pas de repère fixe*. Comme la masse du liquide déplacé doit toujours être égale à la masse de l'instrument, le volume du liquide déplacé diminue quand la densité du liquide augmente et l'instrument s'enfonce moins.

Les aréomètres à poids constant servent à déterminer sans pesée, par une simple lecture, l'état de concentration de certains liquides industriels. Ils ne fournissent pas directement la densité des liquides ni la quantité d'eau qu'ils renferment.

Le *pèse-acides* ou *pèse-sels* de Baumé, destiné aux liquides plus denses que l'eau, est lesté de façon à s'enfoncer dans l'eau pure à peu près jusqu'au *haut de la tige*. On marque 0 au point d'affleurement, l'instrument est ensuite plongé dans une solution de 85 parties d'eau en poids et 15 de sel marin, il s'y enfonce moins que dans l'eau, puisque cette solution est plus dense que l'eau. On marque 15 au nouveau point d'affleurement. L'intervalle de 0 à 15 est divisé en 15 parties égales et la graduation est prolongée au-dessous. La tige doit être assez longue pour porter environ 70 divisions (fig. 125). L'instrument marque 66° dans l'acide sulfurique au maximum de concentration, 36° dans l'acide nitrique du commerce, etc.

Le *pèse-esprits* de Baumé, employé pour les liquides moins denses que l'eau, est lesté de façon à s'enfoncer jusqu'au *bas de la tige* dans une solution de 90 parties d'eau distillée en poids et 10 de sel marin.

On marque 0 au point d'affleurement. Dans l'eau pure, il s'enfonce davantage, on marque 10 au point d'affleurement. On divise l'intervalle des deux traits en 10 parties égales, et on prolonge les divisions

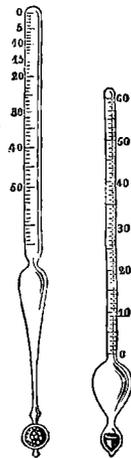


Fig. 125. Fig. 126.

jusqu'à l'extrémité supérieure du tube (fig. 126). L'instrument marque 36° dans l'éther ordinaire du commerce.

Le pèse-acides et le pèse-esprits sont gradués à $12^{\circ}5$ (10° Réaumur).

170. Alcoomètre centésimal de Gay-Lussac. — Cet instrument fait connaître le volume d'*alcool pur* ou *absolu* que contiennent 100 volumes d'un mélange d'alcool et d'eau. Sa forme est semblable à celle du pèse-esprits de Baumé, et il est lesté de manière que dans l'eau distillée l'affleurement ait lieu à la partie inférieure de sa tige (fig. 127).

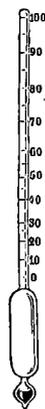


Fig. 127.

On prépare des mélanges d'alcool et d'eau dans des vases divisés où l'on verse 5, 10, 15... 50... 95 volumes d'alcool pur; on complète dans chaque vase le volume 100 avec de l'eau.

Pour graduer l'aréomètre, on le plonge successivement dans ces divers mélanges, on marque 0 au point d'affleurement dans l'eau pure, 5 dans la liqueur qui contient 5 centièmes de son volume d'alcool, 10 dans la liqueur suivante.... 100 dans l'alcool absolu, chaque intervalle est divisé en 5 parties égales. L'instrument s'enfoncera dans un liquide alcoolique jusqu'à la division 46, si ce liquide renferme 46 centièmes de son volume d'alcool pur (46 litres d'alcool pur par hectolitre de liquide alcoolique).

Un thermomètre doit être plongé dans le liquide alcoolique en même temps que l'alcoomètre, car la graduation se fait à 15° et pour un essai effectué à une température différente, une correction est indispensable. Une table de correction a été dressée à cet effet.

Les degrés de l'alcoomètre ne sont pas égaux. Les indications de l'instrument ne s'appliquent qu'à des mélanges contenant seulement de l'alcool et de l'eau. Pour le vin on distille un volume connu de liquide, puis à l'alcool obtenu on ajoute de l'eau pour reproduire le volume primitif et on plonge l'alcoomètre dans ce mélange d'alcool et d'eau. Les alcoomètres ont leurs divisions proportionnelles; on les gradue à l'aide d'un alcoomètre gradué directement; avec 2 points quelconques de l'échelle on obtient les autres.

171. Volumètres. Densimètres. — Pour construire un instrument qui fournisse par une simple lecture la densité elle-même, on peut employer un aréomètre semblable à un aréomètre de Baumé, à tige

bien cylindrique et gradué avec deux liquides de densités connues (fig. 128).

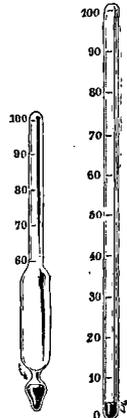
Pour mesurer des densités supérieures à celle de l'eau, on fait en sorte que l'instrument plongé dans l'eau distillée s'enfonce à peu près jusqu'au *haut de la tige*, on y marque 100. Dans un liquide de densité $\frac{4}{3}$ par exemple, le volume déplacé sera V' . La masse M de l'instrument étant toujours égale à la masse du liquide déplacé, on aura :

$$M = 100 \cdot 1 = V' \cdot \frac{4}{3}.$$

De là $V' = 75$; 75 centimètres cubes du liquide pèsent autant que 100 centimètres cubes d'eau. On marque 75 au point d'affleurement, et on divise l'intervalle de 100 à 75 en 25 parties égales ; on prolonge la graduation. Pour un liquide dans lequel l'instrument s'enfoncera jusqu'au degré 60, la densité x sera donnée par $100 = 60 \cdot x$.

100, 75, 60 sont les volumes occupés par des poids égaux des différents liquides.

L'appareil ainsi gradué a reçu le nom de *volumètre* parce qu'il fait connaître directement le volume occupé par un certain poids d'un liquide. Il prend le nom de *densimètre* si les densités sont marquées en face des points d'affleurement des différents liquides. La graduation reste la même.



On pourrait prendre un tube cylindrique dans toute sa longueur, lesté de manière à s'enfoncer dans l'eau pure jusqu'à un trait 100 marqué en haut de la tige. On divise ce tube depuis le trait 100 jusqu'en bas en 100 parties égales (fig. 129). Si l'appareil s'enfonce dans un liquide de densité d jusqu'à une division n ,

$$nd = 100 \cdot 1$$

De là $d = \frac{100}{n}$.

TABLE DE DENSITÉS

Aluminium	2,6	Verre (Crown)	2,6
Cuivre	8,8	Quartz	2,63
Fer	7,5	Alcool	0,816
Platine	21,2	Acide sulfurique	1,85
Argent	10,5	Mercure	13,59
Zinc	7	Huile d'olive	0,92

172. Calcul des poids spécifiques. — Le poids spécifique p d'un corps s'exprime en dynes ; il est égal au produit de sa densité D par l'intensité de la pesanteur g . Tandis que la densité d'un corps a une valeur invariable, son poids spécifique varie comme le nombre g avec le lieu de l'observation. La densité de l'eau à 4° est partout égale à 1 ; son poids spécifique est égal à 978,1 dynes à l'équateur et à 980,96 dynes à Paris. De même, la densité du mercure à 0° est partout égale à 13,59 ; son poids spécifique est égal à 13,59.978,1 dynes à l'équateur et à 13,59.980,96 dynes à Paris.

LIQUIDES SUPERPOSÉS

173. Si l'on verse dans un flacon plusieurs liquides de densités différentes sans action chimique les uns sur les autres, ces liquides se *superposent par ordre de densité*, le plus lourd au fond et les surfaces de séparation sont horizontales.

Fiole des quatre éléments. — On met dans un flacon du mercure, de l'eau, de l'huile et de l'air ; on agite, les liquides se mélangent, mais par le repos, ils se séparent de nouveau, le mercure gagne le fond, l'eau se place au-dessus, puis l'huile et enfin l'air (fig. 130).

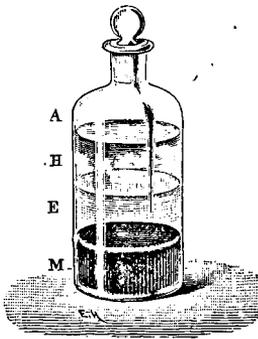


Fig. 130.

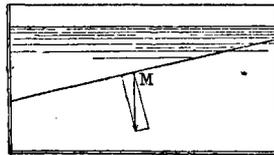


Fig. 131.

Ces faits résultent des propositions que nous avons déjà démontrées. En effet, un fluide plus lourd ne peut pas se maintenir au-dessus d'un fluide plus léger. Car si une molécule d'un liquide plus dense se trouve au milieu d'un liquide moins dense, elle tombe au fond du vase, son poids l'emportant sur la poussée qu'elle subit (159).

La surface libre du mélange est horizontale ; la démonstration qui

a été faite pour un liquide est en effet indépendante des portions liquides sous-jacentes (145).

Les surfaces de séparation sont horizontales. Car s'il n'en est pas ainsi, nous pouvons décomposer le poids d'une molécule M en deux composantes : une composante perpendiculaire à la surface qui est sans effet, et une composante parallèle à la surface qui la fait rouler sur la surface inclinée (fig. 131).

174. Niveau à bulle d'air. — C'est un tube de verre fermé aux deux bouts et légèrement courbé. Il contient un liquide très fluide qui ne le remplit pas complètement et une bulle de sa vapeur. La bulle se place toujours au point le plus élevé du tube. Le tube est logé dans une monture dont la *base* est rendue exactement parallèle à la surface

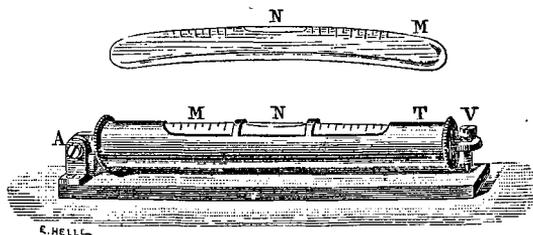


Fig. 132.

libre du liquide et par conséquent *horizontale*, quand la bulle N est comprise entre deux traits marqués sur la partie convexe du tube (fig. 132).

Quand on place la base du niveau suivant une droite horizontale, la bulle s'arrête entre les deux repères ; si la droite n'est pas horizontale, la surface libre du liquide qui est toujours horizontale n'est pas parallèle à la base et la bulle n'est plus comprise entre les repères.

Le niveau à bulle d'air permet de reconnaître si un plan est horizontal ; on place pour cela la base du niveau suivant deux droites du plan à peu près rectangulaires entre elles ; si ces deux droites sont horizontales, le plan est horizontal car il contient deux horizontales qui ne sont pas parallèles.

VASES COMMUNIQUANTS

175. I. Équilibre d'un liquide. — Quand un liquide est renfermé dans deux ou plusieurs vases qui communiquent entre eux, les sur-

faces libres dans chaque vase sont horizontales et toutes ces surfaces sont dans un même plan horizontal.

Démonstration. — Menons un plan horizontal dans le tube de communication (fig. 133). Sur deux surfaces égales ab et cd de ce plan, les pressions exercées sont égales (148); elles sont encore égales entre elles sur deux surfaces égales prises sur $A'B'$ et $C'D'$ dans les vases eux-mêmes dans un même plan horizontal situé à une hauteur h au-dessus du plan $abcd$. En effet, pour deux surfaces égales à σ prises sur $A'B'$ et ab ou pour deux surfaces égales à σ prises sur $C'D'$ et cd , la différence des pressions est la même σh .

Le plan où la pression exercée par le liquide sera nulle sera donc à la même hauteur dans les deux vases au-dessus d'un plan horizontal situé dans le tube de communication. Ce sera par conséquent un plan horizontal.

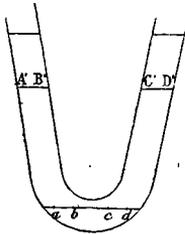


Fig. 133.

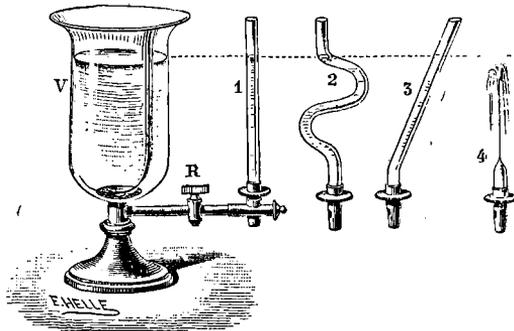


Fig. 134.

Vérification expérimentale. — On vérifie expérimentalement que les surfaces libres dans deux vases communicants sont situées dans un même plan horizontal en prenant un large vase V sur la paroi latérale duquel est mastiqué un tube métallique horizontal muni d'un robinet R et d'une tubulure dans laquelle on peut ajuster des tubes en verre 1, 2, 3, de formes diverses (fig. 134). Le vase étant rempli d'eau et le robinet R ouvert, on peut vérifier avec un cathétomètre que les surfaces libres sont sur un même plan horizontal.

176. Niveau d'eau. — C'est un tube métallique dont les deux extrémités sont recourbées et terminées par deux fioles cylindriques A et A' en verre (fig. 135). Si l'on verse de l'eau colorée dans le système de ces deux vases communicants, le plan qui passe par les surfaces

libres dans les deux fioles, est un plan horizontal. Dans les nivellements on rapporté à ce plan les différents points du sol.

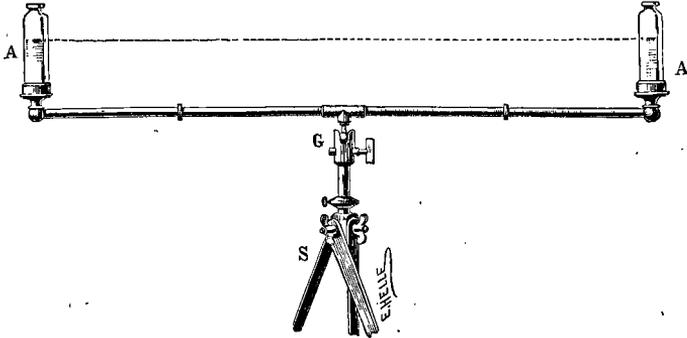


Fig. 135.

Pour trouver la différence de niveau entre deux points A et B (fig. 136), on fixe en A une règle verticale divisée le long de laquelle peut glisser une mire, on met l'œil près du niveau n' et on dirige le rayon visuel de façon que les deux niveaux en n' et en n paraissent coïncider. *Le rayon visuel est alors bien horizontal*, on fait mouvoir lentement la mire jusqu'à ce que son centre se trouve sur le rayon visuel. On lit sur la règle la distance de ce centre au point A. On transporte la règle verticale en B, on place l'œil en n et on s'aligne sur n' ;

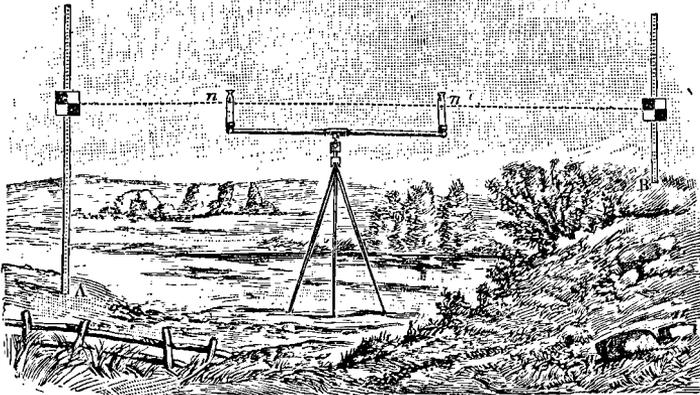


Fig. 136.

on voit à quelle division b aboutit le centre de la mire amené sur le rayon visuel. La différence de niveau cherchée est la différence des hauteurs lues sur la règle dans les deux cas.

L'explication des jets d'eau et des puits artésiens se déduit de la théorie des vases communicants. Si l'un des tubes est coupé au-dessous du niveau de la surface libre, le liquide s'élève en jet jusqu'à ce qu'il ait atteint ce niveau (fig. 134, tube 4).

La distribution de l'eau dans les villes se réalise d'après le même principe.

177. II. Équilibre de deux liquides. — Si les deux vases communicants renferment des liquides différents non miscibles, le liquide le plus lourd remplit le tube de communication et les hauteurs des surfaces libres des deux liquides au-dessus de la surface de séparation sont en raison inverse des densités ⁽¹⁾.

Versons d'abord du mercure, puis de l'eau au-dessus du mercure, et dans la branche la plus longue, de l'eau. La surface de séparation en E sera horizontale (fig. 137), comme nous l'avons démontré plus haut (173).

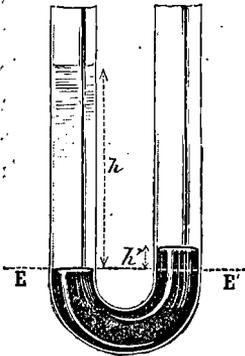


Fig. 137.

La colonne qui remplit le tube au-dessous du plan horizontal EE' mené par la surface de séparation est en équilibre, et resterait en équilibre si les colonnes qui surmontent E et E' étaient supprimées. Les pressions sur deux surfaces égales en E et E' doivent être égales, afin que la pression exercée en E' par le mercure et transmise de bas en haut en E fasse équilibre à la pression qui s'exerce directement sur E par la colonne d'eau. Soient h et h' les hauteurs des deux liquides, D et D' leurs densités, la pression exercée par le mercure sur une surface s en E' a pour valeur $sh'D'g$, la pression exercée par l'eau sur une surface s en E a pour valeur $shDg$; ces deux pressions doivent être égales.

On doit donc avoir $hD = h'D'$.

Nous avons supposé l'égalité des pressions exercées sur les surfaces libres des deux liquides.

(1) Lorsque les liquides sont *miscibles*, le liquide inférieur pénètre lentement dans le liquide supérieur malgré son poids. Ce phénomène est appelé *diffusion des liquides*. Si, au moyen d'une pipette, on fait passer une dissolution de sulfate de cuivre au fond d'un vase renfermant de l'eau, bien que la solution saline soit plus lourde que l'eau, on la voit, comme l'indique le changement de couleur, s'élever progressivement dans le vase.

Applications. — 1° Un flacon à densité, plein d'eau, pèse 44 grammes. On y introduit 10 grammes de fer en fragments et on enlève l'excès d'eau au-dessus du repère; le flacon pèse alors 52^r7. Quelle est la densité du fer?

2° Un flacon à densité pèse vide 14^r72, plein d'eau 30^r74, et plein d'une solution saline 44^r85. Quelle est la densité de cette solution?

3° Une barre de cuivre pèse 9000 grammes dans l'air et 7990 dans l'eau. Quelle est la densité du cuivre?

4° Une sphère de platine pèse 20^r86 dans l'air, 19,86 dans l'eau et 19,36 dans l'acide sulfurique. Quelles sont les densités du platine et de l'acide sulfurique?

5° Un corps pèse 24 grammes dans l'air, 20 grammes dans l'eau. Quel est son poids apparent dans un liquide de densité 0,75?

6° Un solide pèse 2^r25 dans l'air; dans un liquide de densité 1,33 il pèse 1^r50. Calculer la densité du solide.

7° Un aréomètre de Fahrenheit pèse 50 grammes; il faut le charger de 10 grammes pour le faire aller dans un liquide de densité 0,75. Quel poids x faut-il placer sur la coupe pour le faire aller dans l'eau pure?

8° Un pèse-esprits de Baumé marque 0 dans l'eau, 25 dans l'alcool de densité 0,8. Quelle est la densité d d'un liquide où l'aréomètre marque 40?

9° La densité de l'acide sulfurique du commerce est 1,84; il marque 66 au pèse-acides de Baumé. Quelle est la densité x de l'eau salée qui a servi à marquer le point 15?

10° Un litre de liquide de densité 1,56 est mélangé avec 3 litres de densité 0,8. Le liquide présente une contraction de $\frac{1}{10}$. Quelle est sa densité d ?

11° Un morceau de liège pesant 19 grammes est lié à un barreau d'argent de 63 grammes. L'ensemble se maintient en équilibre au milieu de l'eau. La densité de l'argent est 10,5. Quelle est la densité d du liège?

12° On verse de l'eau jusqu'au milieu de la hauteur dans un tube en U dont les branches égales ont une longueur de 42 centimètres. On remplit ensuite l'une des branches d'huile de densité 0,8. Quelle hauteur occupera cette huile?

13° L'acide sulfurique qui remplit un flacon de densité jusqu'au trait de repère pèse 1533 grammes, l'eau qui occupe le même volume dans le flacon pèse 830 grammes. Quelle est la densité de l'acide sulfurique?

14° Un fragment d'un sel insoluble dans l'essence de térébenthine pèse 0^r352; dans un flacon à densité il déplace 0^r13 d'essence de térébenthine. La densité de l'essence étant 0,872; quelle est la densité du sel?

CAPILLARITÉ

178. Au voisinage d'un corps solide la surface d'un liquide, au lieu de rester horizontale, se courbe; le liquide est *soulevé* par rapport au niveau général s'il *mouille* ⁽¹⁾ le solide, il est *déprimé* s'il ne le mouille pas.

L'action de la paroi sur le liquide ne s'exerce qu'à une très petite distance, c'est pourquoi dans un vase large, la surface reste plane et

(1) Un liquide mouille un solide si l'*adhésion* qui maintient le liquide en contact avec le solide est supérieure à la *cohésion* qui maintient chaque molécule liquide en contact avec les molécules liquides voisines.

horizontale au milieu du vase ; mais il n'en est plus de même dans un tube très étroit. Dans un tube très étroit (*capillaire*) la surface libre du liquide prend une forme concave (dite *ménisque concave*) si le

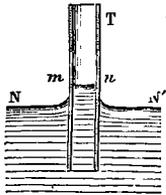


Fig. 138.

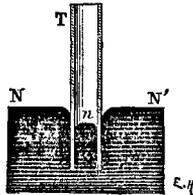


Fig. 139.

liquide intérieur mouille le tube et le liquide intérieur est soulevé au-dessus du niveau extérieur, en *mn*, contrairement aux lois de l'hydrostatique (175) (fig. 138). Si le liquide ne mouille pas le tube, sa surface libre prend une forme convexe (*ménisque convexe*) et le niveau intérieur est déprimé au-

dessous du niveau extérieur en *n* (fig. 139).

La différence de niveau à l'intérieur et à l'extérieur du tube est la même dans le vide, ce qui prouve que la pression de l'air n'a aucune influence sur le phénomène. *La différence de niveau varie en raison inverse du diamètre du tube*, ce diamètre étant mesuré au point où se forme le ménisque.

Quand le tube est mouillé par le liquide, la différence de niveau *ne dépend ni de l'épaisseur du tube ni de sa nature* ; elle dépend de la nature du liquide et de sa température.

Dans un tube de verre bien nettoyé de 1^{mm} de diamètre et à 8°, l'eau s'élève de 30^{mm}, l'alcool de 12, l'éther de 10. La hauteur soulevée diminue quand la température s'élève.

Les choses se passent comme si la production d'un ménisque dans un tube donnait lieu à une force verticale, inversement proportionnelle au diamètre du tube et agissant sur le liquide *de la convexité vers la concavité*. C'est une force soulevante dans le cas d'un ménisque concave, une force déprimante dans le cas d'un ménisque convexe. La réaction qui s'exerce du liquide sur le solide agit en sens contraire.

La capillarité explique un grand nombre de phénomènes journaliers. Quand un morceau de sucre est en contact par quelques points avec de l'eau, le liquide monte dans les petits tubes capillaires que forment les pores du sucre. L'eau mouille jusqu'au sommet un tas de sable dont elle baigne la base. De même, le suif fondu s'élève par capillarité entre les fils de la mèche d'une bougie et l'huile monte dans la mèche d'une lampe. Certains insectes peuvent marcher à la surface de l'eau parce que leurs pattes sont couvertes d'un enduit gras qui les empêche d'être mouillées et tout autour l'eau est déprimée.

179. Dépression barométrique. — Il faut tenir compte de la dépression capillaire quand on mesure la pression atmosphérique par une colonne de mercure soulevée dans un tube étroit : la dépression capillaire doit être *ajoutée* à la hauteur observée. Cette correction est négligeable avec des tubes ayant au moins 3 centimètres de diamètre (194).

Aréomètres. — Quand un aréomètre est plongé dans un liquide qui le mouille, celui-ci est soulevé autour de la tige solide. En raison de la forme concave de la surface du liquide, une force s'exerce sur la tige de l'aréomètre, dirigée de la concavité vers la convexité et tend à enfoncer l'instrument. Cette force est la réaction du liquide sur la tige qui est mobile ; elle s'ajoute au poids de l'instrument pour l'enfoncer.

180. Osmose. — Deux liquides séparés par une membrane se diffusent à travers la membrane. Prenons un tube de verre T fermé à son extrémité inférieure par un fragment d'une membrane végétale ou animale *m*, tel qu'un fragment de vessie, et versons dans le tube de l'alcool. Si l'on plonge le tube ainsi préparé dans un vase V renfermant de l'eau pure (fig. 140), de manière que l'alcool et l'eau se trouvent au même niveau, on voit après quelque temps le liquide monter progressivement dans le tube T. On constate en outre qu'il s'est rendu de l'alcool dans l'eau extérieure (exosmose) et qu'il est passé de l'eau du vase V dans le tube T (endosmose). La vitesse d'endosmose de l'eau est supérieure à la vitesse d'exosmose de l'alcool.

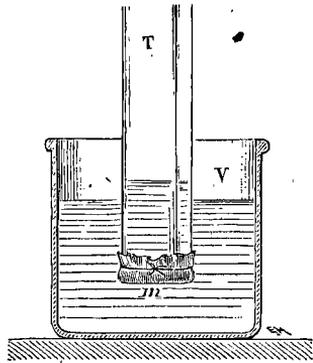


Fig. 140.

Ce phénomène rend compte du mécanisme de l'échange des liquides dans les êtres vivants et en particulier de l'absorption intestinale.

181. Dialyse. — La dialyse est une méthode d'analyse basée sur l'osmose.

Les corps qui traversent le plus vite une membrane sont les substances cristallisables ou *cristalloïdes*, telles que le chlorure de sodium. Les substances analogues à la colle ou *colloïdes* (albumine,

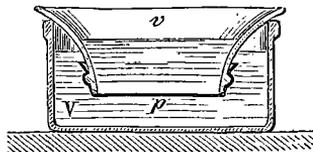


Fig. 141.

gélatine, caramel, etc.) ne passent que très lentement. On prend un vase en verre v (fig. 141) dont le fond p est en papier parcheminé, on y verse un mélange d'un cristalloïde et d'un colloïde et on dispose sous le premier vase un second vase V rempli d'eau. Le cristalloïde traverse le papier parcheminé et se rend dans l'eau du vase inférieur, tandis que le colloïde reste dans le vase supérieur qu'on appelle **dialyseur**.

STATIQUE DES GAZ

Un gaz est un fluide *expansible, compressible et élastique*.

182. Expansibilité. — Par suite de son expansibilité, un gaz prend la forme du vase qui le renferme et le remplit tout entier au lieu d'occuper seulement le fond comme le fait un liquide. *Un gaz ne présente pas de surface libre.*

On met en évidence l'expansibilité des gaz en plaçant sous une cloche une vessie fermée à l'aide d'un robinet et ne contenant qu'un peu de gaz. Si avec une machine pneumatique on raréfie l'air de la cloche, la vessie se gonfle de plus en plus à mesure que le degré de vide augmente (76).

Compressibilité et élasticité. — Les gaz sont *beaucoup plus compressibles que les liquides* et éprouvent une forte diminution de volume sous l'action de faibles forces. Les gaz sont *parfaitement élastiques* ; après avoir diminué de volume quand on les comprime, ils reprennent exactement leur volume primitif quand la compression cesse. Prenons un tube cylindrique fermé à une extrémité et enfonçons-y un piston garni de cuir et bien graissé (*briquet à air*), l'air intérieur est comprimé, mais il ramène le piston à sa position initiale quand on cesse d'agir sur la tige (fig. 36).

183. Transmission des pressions par les gaz. — Comme les liquides (143), en raison de la mobilité de leurs molécules, *les gaz transmettent intégralement dans tous les sens les pressions qu'on leur fait subir.*

Imaginons un récipient (fig. 142) muni en A d'un corps de pompe

où glisse un piston et en B, C, D de tubulures auxquelles sont adaptés des tubes recourbés contenant un liquide qui a le même niveau dans les deux branches. Si l'on enfonce le piston, la pression exercée se transmet en tous sens et fait monter d'une même quantité le liquide des tubes.

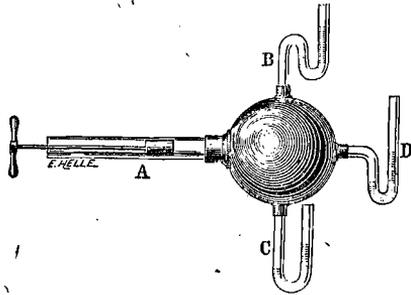


Fig. 142.

On réalise une expérience analogue à celle de la presse hydraulique en réunissant un sac de caoutchouc à un soufflet par un tube (fig. 143). Sur le sac sont posés une planche et un poids. On injecte de l'air avec le soufflet, le sac se gonfle et une petite pression exercée par le soufflet sur la section s du tube devient capable de soulever le poids

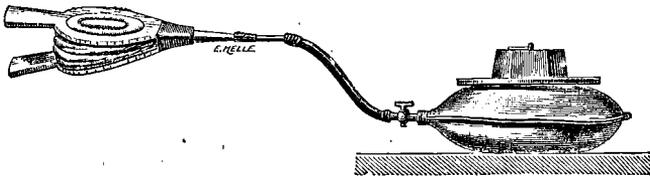


Fig. 143.

en se transmettant sur la surface S de contact de la planche et du sac qui est beaucoup plus grande. Si la surface de la planche qui se trouve ainsi pressée est égale à 500 fois la section du tube, il suffit d'exercer un effort de 10 grammes pour soulever 5 kilos posés sur la planche.

PESANTEUR ET PRESSION DES GAZ

184. Pesanteur des gaz. — Bien qu'on ne les voie pas tomber à la surface de la terre, comme les solides et les liquides, *l'air et les gaz sont pesants.*

Pour démontrer la pesanteur des gaz, on suspend au-dessous de l'un des plateaux d'une balance un ballon d'une dizaine de litres, plein de gaz et fermé par un robinet. On établit l'équilibre par une tare dans l'autre plateau (fig. 144).

On fait le vide dans le ballon, le fléau s'incline du côté de la tare.

On rétablit l'équilibre avec m grammes ajoutés du côté du ballon. Ces m grammes représentent la masse du gaz sorti (13 grammes environ pour 10 litres d'air à la pression ordinaire). Le poids du gaz en dynes est mg . Le poids d'un gaz est, à volume égal, beaucoup plus faible que celui d'un liquide ⁽¹⁾.

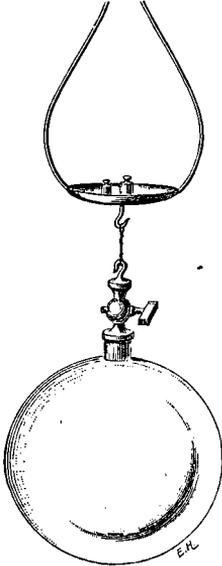


Fig. 144.

185. Pressions exercées par un gaz pesant. — Les gaz étant pesants, une couche gazeuse presse par son poids sur une couche placée au-dessous d'elle, et celle-ci transmet cette pression aux couches inférieures en l'accroissant de son propre poids.

La force élastique d'un gaz ou sa réaction est égale à la pression qu'il supporte (39).

Comme dans un liquide, tous les points d'un même plan horizontal dans un gaz en équilibre, supportent la même pression (147).

Dans un récipient de grande hauteur, la différence des pressions ou des forces élastiques à deux niveaux différents A et B est égale au poids d'un cylindre ayant pour base l'unité de surface et pour hauteur la distance verticale des deux points (149). Pour un liquide qui est peu compressible, l'accroissement de pression au niveau inférieur B n'accroît que d'une façon insensible la masse contenue dans l'unité de volume et la densité ne varie pas d'une façon appréciable. Pour un gaz dont la compressibilité est beaucoup plus grande, l'accroissement de densité est notablement plus important.

PRESSION ATMOSPHERIQUE

186. L'atmosphère est la couche d'air⁽²⁾ qui enveloppe le globe terrestre, elle le suit dans son mouvement de translation autour de son orbite et dans son mouvement de rotation autour de la ligne des

(1) Nous mesurerons plus loin avec précision par ce procédé la densité d'un gaz (334).

(2) L'air qui enveloppe notre globe est un mélange : pour 100 litres, il y a sensiblement 21 litres d'oxygène, 79 litres d'azote et en outre une très petite quantité d'argon et de quelques autres gaz, de vapeur d'eau, d'acide carbonique. L'air tient en outre en suspension d'innombrables poussières, minérales ou organiques.

pôles. Cette couche n'est pas homogène ; par suite du poids des couches supérieures, les couches inférieures sont comprimées et leur densité croît à mesure qu'on se rapproche du sol. La surface du globe supporte une *pression égale* au poids de la colonne d'air qui forme l'atmosphère. Cette pression ne peut être calculée directement puisque l'on ne connaît ni la hauteur de l'atmosphère, ni la loi exacte du décroissement de la densité quand on s'élève. La valeur en dynes de la pression exercée par l'atmosphère sur l'unité de surface est donnée par l'expérience du baromètre, due à Torricelli.

187. Expérience du baromètre. — On prend un tube de verre de 7 à 8 millimètres de diamètre intérieur et de 85 centimètres environ de longueur fermé par un bout ; on le remplit de mercure et après avoir bouché l'extrémité ouverte avec le pouce en ayant soin de n'emprisonner aucune bulle d'air, on le renverse dans une cuvette pleine de mercure. Si

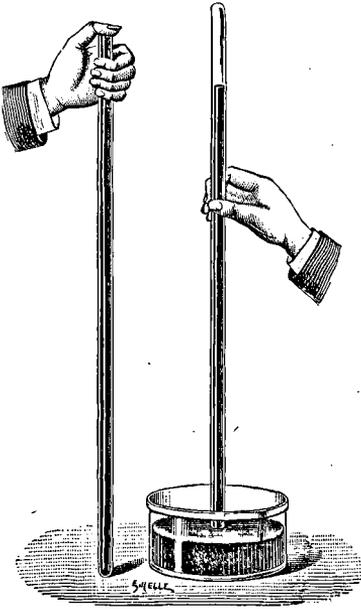


Fig. 145.

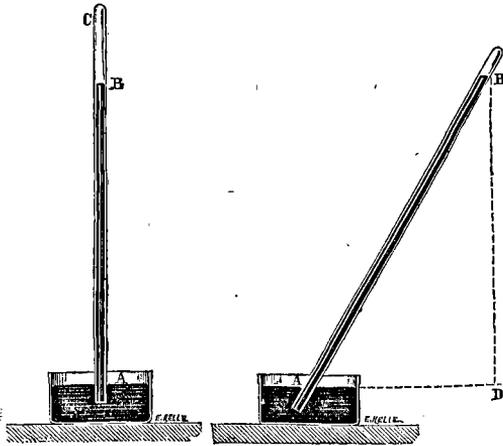


Fig. 146.

le pouce est alors retiré et ne soutient plus la colonne de mercure, on voit le liquide descendre dans le tube et se fixer à une hauteur voisine de 76 centimètres au-dessus du niveau du mercure dans la cuvette, laissant au-dessus de lui un espace vide que l'on appelle **chambre barométrique** (fig. 145).

La hauteur de la colonne de mercure soulevée est indépendante du diamètre et de la forme du tube. Si l'on *incline* le tube, la distance

verticale BD des niveaux dans le tube et dans la cuvette reste invariable (fig. 146).

188. Interprétation de l'expérience du baromètre. — Puisque la masse entière du mercure est en équilibre, dans le tube et dans la cuvette, la pression doit être la même sur deux surfaces égales du plan horizontal de la surface libre dans la cuvette (147). Dans le tube, la surface mn (fig. 147) supporte la pression due au poids de la colonne soulevée et cette pression seule, puisque la chambre barométrique est vide de toute matière pondérable. Au-dessus de $m'n'$, en dehors du tube, l'air extérieur agit seul, sa pression est donc égale à celle de la colonne soulevée dans le tube.

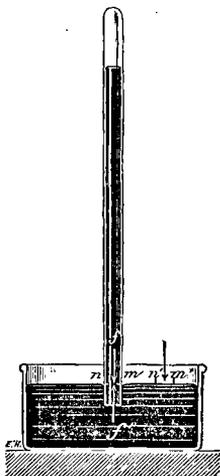


Fig. 147.

189. Valeur de la pression atmosphérique. — La pression exercée par l'atmosphère sur une surface de 1 centimètre carré est égale au poids d'une colonne de mercure ayant pour base 1 centimètre carré et pour hauteur la *différence verticale des niveaux dans le tube et dans la cuvette*. Cette pression éprouve continuellement de petites variations. En prenant 76 centimètres pour hauteur *moyenne* de la colonne soulevée, le poids de la colonne en grammes sera :

$$1 \cdot 76 \cdot 13,6 = 1033^{\text{gr}}6$$

et le poids en dynes à Paris :

$$1033,6 \cdot 981 ;$$

cette pression est dite de *une atmosphère*.

Les hauteurs de différents liquides qui exerceraient sur une même surface s une pression égale à la pression atmosphérique doivent être en *raison inverse de leurs densités* (177), d'après l'équation

$$shDg = sh'D'g$$

$$\text{ou } \frac{h'}{h} = \frac{D}{D'}$$

Par conséquent, la hauteur h' de la colonne d'eau qui mesurerait la

pression atmosphérique sera $h' = \frac{hD}{D'}$, où $D = 13,6$, et $D' = 1$; ce serait $76 \cdot 13,6 = 1033^{\text{m}},6$ ou $10^{\text{m}}33$. La vérification a été faite par Pascal avec un long tuyau de verre fermé par le haut où la colonne soulevée était supérieure à 10 mètres.

Si la hauteur du tube est inférieure à $10^{\text{m}}33$ dans le cas de l'eau (à 76 centimètres dans le cas du mercure), le liquide soulevé remplit complètement le tube et exerce contre le haut du tube une pression d'autant plus forte que la différence entre $10^{\text{m}}33$ et la hauteur du tube est plus grande.

190. Expérience du Puy-de-Dôme. — Si c'est bien le poids de l'air qui maintient soulevé le mercure dans le baromètre, la hauteur de la colonne doit être plus faible quand on s'élève dans l'atmosphère puisqu'on laisse au-dessous de soi des couches d'air qui ne pressent plus sur le mercure de la cuvette. Sur les indications de Pascal, l'expérience du tube de Torricelli fut faite en même temps au bas et au sommet du Puy-de-Dôme; la *colonne barométrique fut trouvée moindre en haut qu'en bas* et la différence de hauteur dépassa 8 centimètres.

Pascal avait constaté déjà qu'en haut de la tour Saint-Jacques la hauteur de la colonne de mercure était inférieure de $4^{\text{mm}}3$ à sa hauteur au bas de la tour. La densité du mercure étant égale à 13,59 et celle de l'air à 0,001293, il faut une variation d'environ 100 mètres dans l'altitude pour produire une variation de 1 centimètre dans la hauteur barométrique, d'après la proportion :

$$\frac{x}{1} = \frac{13,59}{0,001293}, \quad x = 105^{\text{m}}35.$$

Ces expériences de Pascal démontrent complètement que c'est bien à la pression de l'air qu'il faut attribuer les effets rapportés jusque-là à l'*horreur du vide*. Il n'y avait pas de raison en effet pour que la nature n'eût pas la même horreur du vide à différents degrés d'altitude.

191. Effets de la pression atmosphérique. — L'existence de la pression atmosphérique passe habituellement inaperçue parce que les pressions exercées sur un objet placé dans l'air s'équilibrent

sensiblement⁽¹⁾. On démontre l'importance de cette pression par diverses expériences.

Crève-vessie. — On applique sur la platine d'une machine pneumatique le bord bien dressé d'un cylindre de verre fermé à son ouverture supérieure par une vessie tendue et solidement fixée sur le pourtour (fig. 148). La membrane pressée par l'air intérieur et par l'air extérieur supporte la même pression sur les deux faces et reste plane. Si l'on fait le vide sous la membrane, l'air extérieur exerce sur la face externe une pression qui va en croissant et creuse la membrane jusqu'au moment où elle éclate avec bruit. On peut varier l'expérience en plaçant la membrane dans une direction verticale ou inclinée; on montre ainsi que la pression atmosphérique s'exerce sur toutes les surfaces, quelle que soit leur orientation.

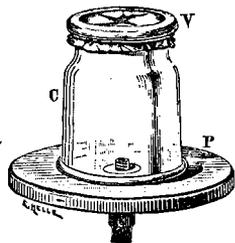


Fig. 148.

Hémisphères de Magdebourg. — Ce sont deux demi-sphères

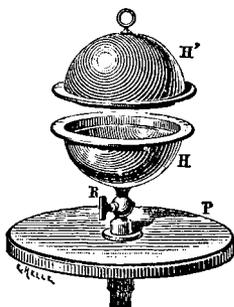


Fig. 149.

creuses en laiton de 10 centimètres de diamètre environ. Leurs rebords peuvent s'appliquer l'un contre l'autre et un cuir annulaire enduit de suif rend la fermeture hermétique. L'un des hémisphères porte un robinet qui permet de faire le vide dans l'appareil, l'autre porte un anneau. On sépare aisément les hémisphères tant qu'ils contiennent de l'air. Quand l'air extérieur a été extrait et que le robinet est fermé, il faut un effort considérable pour vaincre la pression atmosphérique qui les maintient appliqués l'un contre l'autre. Si l'on ouvre le robinet R, on entend un sifflement qui annonce la rentrée de l'air, et les hémisphères se séparent sans difficulté (fig. 149).

(1) Par la respiration, la pression atmosphérique est transmise aux liquides de nos tissus qui sont ainsi également pressés à l'intérieur et à l'extérieur. Les effets de la variation de la pression extérieure sont très marqués si ces variations ne se font sentir que sur une partie du corps.

BAROMÈTRES

192. L'expérience de Pascal a fait voir que la colonne de mercure soulevée dans le tube de Torricelli varie avec l'altitude. L'observation a montré en outre que la colonne subit journellement des variations en un même lieu ; le mercure monte ou descend et parfois d'une façon très appréciable, surtout au voisinage des changements de temps. Ces variations indiquent des pressions différentes. La mesure des pressions exercées par l'atmosphère en divers temps et en divers lieux est donc importante.

Un baromètre est un appareil destiné à mesurer avec précision la pression atmosphérique.

En un même lieu et à la même température, les pressions de l'atmosphère sont proportionnelles aux hauteurs barométriques ; de là vient l'usage de représenter, *pour la comparaison*, la pression atmosphérique par la hauteur barométrique correspondante.

193. Construction d'un baromètre. — L'appareil de Torricelli construit avec un soin spécial constitue le *baromètre à cuvette*. Il faut satisfaire à plusieurs conditions pour construire un bon baromètre.

1° Il convient d'employer du *mercure pur*, parce que le mercure impur adhère au verre et n'a pas une densité exactement connue.

2° Il faut *éviter dans la chambre barométrique toute force élastique* qui déprimerait la colonne mercurielle ; pour cela, il ne doit pas rester d'air interposé entre le mercure et le tube, car cet air gagnerait la partie supérieure du tube. De même, le mercure et le tube devront être parfaitement secs.

On prend un tube bien propre et bien sec de 7 à 8 millimètres de diamètre et de 85 centimètres environ de longueur ; on le ferme à la lampe à une extrémité et on soude une ampoule B à l'extrémité ouverte. On verse du mercure sur un tiers de la longueur et on chauffe avec précaution sur une grille de tôle inclinée le tube et le liquide à une température voisine de l'ébullition (fig. 150) ; de nombreuses bulles se forment et se dégagent ; on verse du mercure chaud dans le second tiers du tube et on entoure de charbon cette seconde partie de la colonne ; on opère enfin sur le troisième tiers et on achève de

remplir avec du mercure chaud. La surface du mercure doit paraître *continue et brillante* sur toute la longueur du tube. Quand tout est refroidi, on détache l'ampoule par un trait de lime, on bouche avec

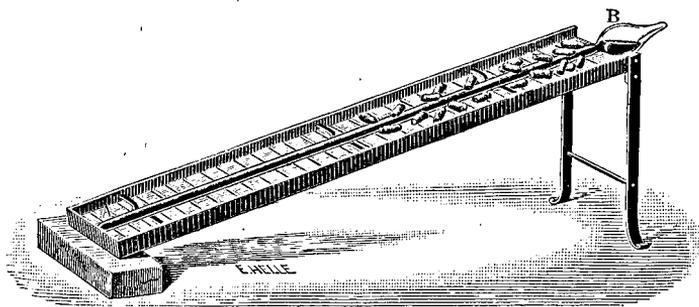


Fig. 150.

le pince l'extrémité ouverte du baromètre bien plein et on redresse le tube en le plongeant dans une cuvette à mercure. Si l'on incline un peu rapidement le tube de manière à amener son sommet à une distance verticale du niveau de la cuvette inférieure à la hauteur barométrique, le mercure doit venir frapper un *coup sec* contre l'extrémité supérieure, s'il n'existe plus dans la chambre barométrique de fluide élastique capable d'amortir le choc. D'autre part, en raison du vide de la chambre barométrique, si la profondeur de la cuvette permettait d'enfoncer le tube, la différence des niveaux du mercure dans le tube barométrique et dans la cuvette ne changerait pas (187).

194. Baromètre normal. — Le tube ainsi que la cuvette est fixé à une planche solidement assujettie contre un mur. Pour lire exactement la distance du sommet de la colonne mercurielle au niveau dans la cuvette, on adapte à l'une des parois de la cuvette une potence qui porte un écrou dans lequel monte ou descend une vis en fer *v* terminée par deux pointes dont la hauteur a été mesurée à l'avance avec un cathétomètre⁽¹⁾. En tournant la vis, on amène sa pointe inférieure exactement en contact avec le mercure de la cuvette; l'extrémité de la pointe et son image vue dans le mercure paraissent alors se toucher; on mesure ensuite au cathétomètre la distance de la pointe supérieure au sommet du mercure dans le tube. On ajoute

(1) Un cathétomètre se compose d'une règle verticale divisée le long de laquelle se déplace une lunette horizontale. La course de la lunette entre deux points visés fait connaître la distance verticale de ces deux points (84).

à cette hauteur la distance verticale des deux pointes de la vis. L'emploi du cathétomètre n'oblige pas à vérifier la verticalité du tube (fig. 151).

Dans un tube qui a moins de 3 centimètres de diamètre, le mercure affecte au sommet de la colonne soulevée la forme d'un ménisque convexe et se tient un peu plus bas que dans un tube plus large (179). La différence entre la hauteur observée dans un tube large de 3 centimètres et dans un tube plus étroit est appelée **dépression capillaire**. La hauteur barométrique s'obtiendra en ajoutant la dépression capillaire à la hauteur observée.

La hauteur obtenue doit subir des corrections que nous développerons à propos de l'étude des dilatations (313). La température du mercure est donnée par un thermomètre plongé dans un tube contenant du mercure et de même diamètre que le tube barométrique.

On emploie souvent comme baromètres d'appartement des baromètres dont la cuvette offre une partie cylindrique très large et un fond *plan et horizontal* (fig. 152). Le tube barométrique plonge dans une boule inférieure. Le niveau s'étale en une *large goutte* sur le fond plan de la partie cylindrique sans atteindre les bords verticaux et se maintient ainsi à une hauteur très sensiblement invariable. L'échelle est verticale et fixe, son zéro correspond au niveau supérieur de la goutte dans la cuvette.



Fig. 151.

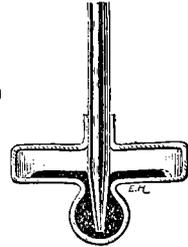


Fig. 152.

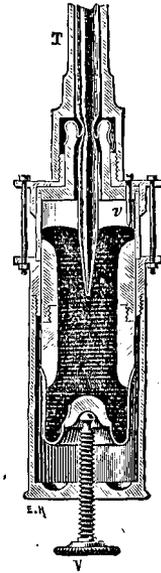


Fig. 153.

195. Baromètre de Fortin. — Le baromètre normal que nous venons de décrire n'est pas transportable ; le baromètre de Fortin joint à une grande précision l'avantage de ne pas exiger une installation fixe. Il se compose d'un tube de verre plongé dans une cuvette à fond mobile.

Cuvette (fig. 153). — La cuvette est un vase cylindrique de verre compris entre deux anneaux de bois, elle a pour fond un sac de peau de chamois dont le milieu est supporté par l'extrémité d'une vis. Cette vis V traverse un manchon métallique relié par des tiges minces au cylindre protecteur du tube barométrique T. En soulevant ou en abaissant avec la vis le fond de la cuvette, on amène la surface du mercure en contact avec une pointe en ivoire *v* qui pénètre par le couvercle de la cuvette et sert de point de départ à une graduation tracée sur le cylindre métallique qui renferme le tube. A chaque observation, on soulève le fond mobile jusqu'à ce que la pointe d'ivoire paraisse en contact immédiat avec son image, vue par réflexion sur le mercure.

Tube barométrique et curseur. — Le tube barométrique, effilé par le bas, passe à travers une tubulure que porte le couvercle de la cuvette ; il est fixé à cette tubulure par une peau de chamois dont la perméabilité laisse l'air extérieur exercer sa pression sur le mercure, sans que celui-ci puisse s'échapper au dehors.

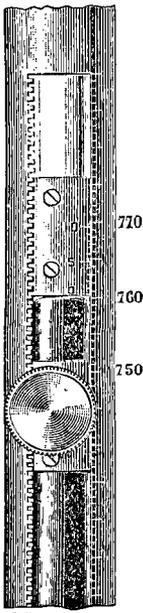


Fig. 154.

L'étui métallique qui entoure le tube est entaillé de deux fentes longitudinales parallèles, opposées l'une à l'autre, laissant voir le verre du tube et le ménisque du mercure. La graduation qui part de la pointe d'ivoire est tracée sur le bord de l'une des fentes. Un curseur se déplace par un pignon et une crémaillère le long de la gaine métallique et porte un vernier avec lequel on apprécie les fractions de millimètre. On fait en sorte que le plan de deux échancrures opposées du curseur dont les bords sont dans un même plan horizontal contienne le plan tangent au sommet du ménisque dans le tube. Le rayon visuel qui passe par les arêtes des deux bords paraît alors tangent au sommet du ménisque. Dans la figure 154, le zéro du vernier est compris entre la division 760 et la division 761, la première division du vernier qui coïncide avec une division de la règle est la 3^e. Le vernier étant au $\frac{1}{10}$, la lecture sera 760 mil-

limètres $\frac{3}{10}$ de millimètre.

Suspension du baromètre. — On peut simplement suspendre le

baromètre contre un mur comme un fil à plomb, par l'anneau qui surmonte sa gaine. La ligne qui joint le centre de gravité au point de suspension se place verticalement. Comme le centre de gravité de l'instrument se trouve sur l'axe du tube et de la gaine métallique, cet axe se trouve vertical et il en est de même de l'échelle divisée qui a le même axe. La longueur mesurée représente bien alors la hauteur de la colonne comprise entre les deux plans horizontaux qui passent par le niveau dans le tube et par le niveau dans la cuvette. En voyage, on fixe le baromètre à un trépied à l'aide d'une suspension dite à la Cardan, qui soutient la gaine du tube et lui permet de tourner librement autour de deux axes *croisés* *rectangulairement* *aa'* et *bb'* passant par le centre de la section du cylindre (fig. 155) et de prendre de lui-même une position rigoureusement verticale sous l'action de

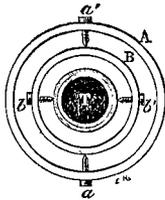


Fig. 155.

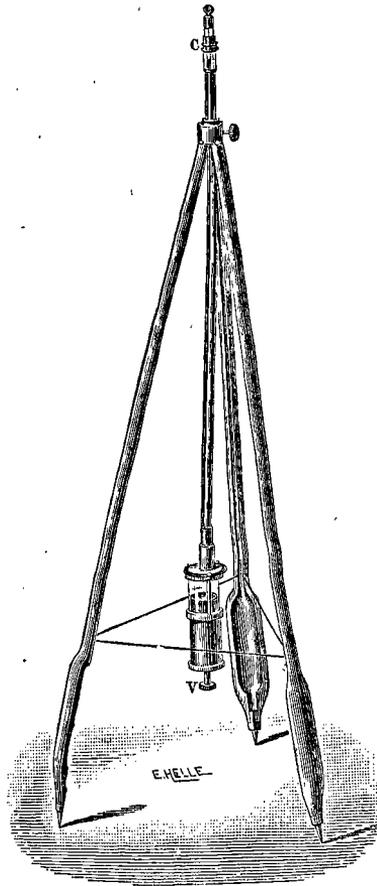


Fig. 156.

son poids. La suspension est portée par un trépied en bois dont les branches peuvent se rapprocher pour former une canne creuse qui sert d'étui pendant le transport du baromètre (fig. 156).

Transport de l'instrument. — On relève avec la vis le fond de la cuvette, l'air qui surmonte la cuvette est chassé à travers la peau de chamois qui fixe le tube à la cuvette : on fait remonter le mercure de la cuvette jusqu'à ce qu'on éprouve une légère résistance. Le tube est alors rempli jusqu'au sommet. On peut retourner le baromètre et le

déplacer sans que le mercure produise de choc capable de briser le tube et sans avoir à craindre de rentrée d'air.

196. Baromètre à siphon. — C'est un baromètre dont la cuvette n'est plus indépendante du tube. Il est formé d'un tube de verre recourbé à deux branches parallèles et inégales : la plus courte est ouverte, l'autre est fermée et sa longueur atteint environ 1 mètre. L'appareil étant horizontal, on remplit la grande branche de mercure

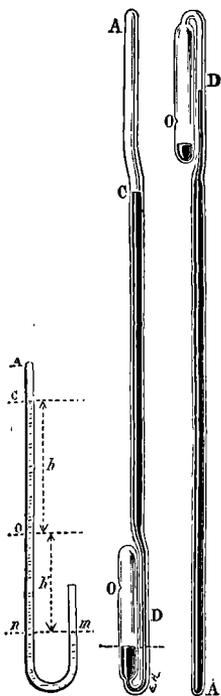


Fig. 157. Fig. 158.

pur et sec jusqu'à la courbure du tube, avec toutes les précautions indiquées dans la construction du baromètre à cuvette, on redresse ensuite lentement l'appareil sans laisser rentrer d'air, la petite branche en bas ; le mercure baisse dans la grande branche, monte dans la petite jusqu'à ce que la différence des niveaux du mercure dans les deux branches fasse équilibre à la pression atmosphérique qui agit en m . Une échelle divisée en millimètres, dont le zéro est placé vers le milieu du tube, porte une graduation ascendante vers C et une graduation descendante vers m . La somme des deux lectures $h + h'$ représente la pression atmosphérique ⁽¹⁾ (fig. 157)..

197. Baromètre de Gay-Lussac. — Les deux branches du baromètre à siphon sont ici réunies par un tube D de très petit diamètre intérieur. Ces deux branches, de même diamètre, sont fermées à leur partie supérieure, la plus courte est placée au-dessous de la plus longue, dans son prolongement, et elle offre une ouverture très étroite O , en forme d'entonnoir, la pointe en dedans, pour

(1) L'action capillaire s'exerce en m et en C ; si elle déprimait également m et C , la différence des niveaux serait indépendante de l'influence de la capillarité ; c'est ce que Gay-Lussac se proposait d'obtenir ; mais comme la dépression varie avec la convexité du ménisque et que les deux ménisques n'ont pas d'ordinaire la même convexité, bien que les deux tubes aient le même diamètre, car l'un des ménisques termine une colonne ascendante et l'autre une colonne descendante, il faudrait pour opérer avec précision effectuer deux corrections dans le baromètre à siphon au lieu d'une seule dans le baromètre de Fortin ; en outre, l'une des surfaces est dans le vide et reste nette, tandis que l'autre est exposée à l'air et s'oxyde.

permettre à l'air d'exercer sa pression (fig. 158). Les deux tubes sont entourés d'un même cylindre métallique, percé de deux rainures longitudinales opposées qui laissent voir le ménisque du mercure dans chaque branche. L'échelle est parallèle à l'axe du cylindre; afin que cet axe soit vertical dans le repos, on le suspend comme le baromètre de Fortin. On fait une première lecture au niveau supérieur, une deuxième lecture au niveau inférieur, et on les ajoute.

Pour transporter l'appareil, on l'incline lentement pour remplir complètement la grande branche, puis on le retourne de façon que la petite branche soit en haut. Quand ensuite, pour une observation, on remet l'appareil dans la position normale, le mercure retourne à la petite branche en chassant l'air devant lui, la branche capillaire étant trop étroite pour se laisser diviser. Pour plus de sûreté, le tube capillaire est entouré à sa partie inférieure d'un renflement oblong dans lequel il plonge par son extrémité effilée; une bulle qui franchirait la courbure glisserait le long des parois et se logerait en B sans monter dans la chambre barométrique et n'influera pas sur les mesures (fig. 159).



Fig. 159.

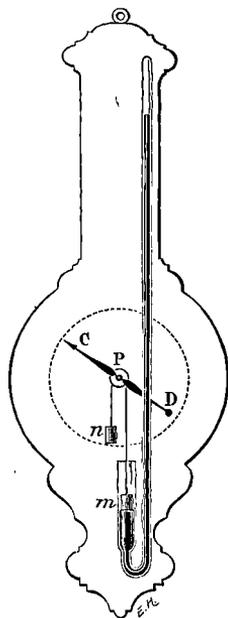


Fig. 160.

198. Baromètre à cadran. — C'est un baromètre à siphon dont les deux branches ont le même diamètre et dont les indications sont amplifiées.

Sur le mercure de la branche ouverte flotte une petite masse de fer *m* attachée à un fil qui s'enroule sur une poulie *P* et soutient à son extrémité un contrepoids *n*. Une aiguille équilibrée *CD* est fixée sur l'axe de la poulie et parcourt la circonférence d'un cadran divisé. Le flotteur suit le mouvement ascendant ou descendant du mercure et fait tourner la poulie et en même temps l'aiguille. L'axe de la poulie éprouvant des frottements qui diminuent la sensibilité, on donne un petit coup sur l'instrument au moment où on le consulte (fig. 160).

199. Baromètre métallique. — Le baromètre de Vidie est une boîte en laiton en forme de cylindre aplati, hermétiquement close et dans laquelle on a fait le vide. La surface supérieure est une lame

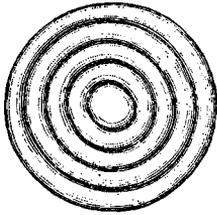


Fig. 161.

métallique mince et flexible, à surface ondulée ⁽¹⁾ (fig. 161), qui s'élève ou s'abaisse proportionnellement à la variation de la pression atmosphérique (analogie avec la membrane du crève-vessie). Ces mouvements se transmettent par une série de leviers à une aiguille mobile sur un cadran. La graduation a été faite par comparaison avec un baromètre à mercure. Comme l'élasticité du métal subit des modifications, la comparaison

doit être répétée de temps en temps. Ces baromètres mesurent les variations de pression, indépendamment de la gravité.

Ce baromètre a été transformé en *baromètre enregistreur*. Huit boîtes cannelées sont vissées l'une sur l'autre, la boîte inférieure reposant sur un plan fixe, le déplacement de la face supérieure de la boîte supérieure est la somme des déplacements de toutes les boîtes. Ce déplacement est transmis par une série d'articulations à un levier amplificateur des mouvements dont la longue branche se termine par une plume. Cette plume appuie sur un cylindre vertical tournant uniformément et dont la surface est partagée horizontalement par des lignes qui représentent les millimètres et verticalement par des arcs de cercle qui correspondent aux heures.

200. Mesure des hauteurs par le baromètre. — Soit h la différence des colonnes barométriques aux deux stations A et B; si la densité de l'air compris entre ces stations est supposée constante, ce qu'on peut admettre pour des hauteurs qui ne dépassent pas une centaine de mètres, les hauteurs de mercure et d'air h et H qui exercent une même pression sont en raison inverse des densités :

$$\frac{H}{h} = \frac{13,59}{0,001293}$$

0,001293 densité de l'air ou masse (poids en grammes) d'un centimètre cube d'air.

(1) Les reliefs et les creux de la surface augmentent la flexion en diminuant la réaction élastique aux déformations, ils n'ont pas pour objet d'accroître l'étendue de la surface pressée, car la pression de l'atmosphère ne dépend que de la projection horizontale de la surface pressée.

Quand les hauteurs à évaluer sont plus considérables, cette proportion ne peut plus être admise, car la densité de l'air décroît quand on s'élève; une formule spéciale, due à Laplace, exprime alors la distance verticale des deux stations en fonction de la différence des colonnes barométriques et des températures aux deux stations.

201. Variations barométriques. — Si l'on observe le baromètre entre les tropiques, on voit la hauteur de la colonne de mercure éprouver des variations régulières et présenter chaque jour deux maximums et deux minimums. Dans nos climats, l'écart entre le maximum et le minimum est faible (à peine 1 millimètre à Paris), les maximums ont lieu vers dix heures du matin et dix heures du soir, les minimums vers quatre heures du matin et quatre heures du soir:

Les variations diurnes régulières sont souvent masquées par des variations accidentelles liées aux circonstances atmosphériques. Habituellement le baromètre baisse brusquement à l'approche des tempêtes et se relève par les temps calmes et sereins. Dans nos régions, le plus souvent le temps se met au beau si le baromètre monte peu à peu et se met à la pluie si le baromètre baisse graduellement.

Applications. — 1° Calculer la pression exercée par l'atmosphère sur une surface de 1 centimètre carré, lorsque la hauteur barométrique est 75 centimètres, en un lieu où l'accélération est 980,68. Densité du mercure 13,596.

2° Quelle est la pression supportée par la membrane d'un crève-vessie de 4 centimètres de rayon, lorsque le vide a été fait à 2 centimètres? Hauteur barométrique 76.

3° Quelle est la hauteur x de la colonne d'air qui à 0° et à la pression 76 exerce la même pression qu'une colonne de 1 centimètre de mercure? La densité de l'air à 0° et à la pression 76 est 0,001293.

4° Quelle serait la hauteur de l'atmosphère en un lieu où le baromètre marque 76 si l'air avait une densité constante et si g ne variait pas avec l'altitude?

5° La hauteur barométrique est 76 au bas de la tour Eiffel : quelle sera-t-elle au sommet, à la hauteur de 300 mètres? Densité de l'air, 0,0013.

6° La hauteur barométrique étant de 76 centimètres, quelle est la pression exercée par l'atmosphère sur la surface du corps humain qu'on supposera exprimée en mètres carrés par 1,8?

7° Quelle est la densité d'une huile qui s'élève dans un tube barométrique à une hauteur de 11 mètres 68, lorsqu'un baromètre à mercure voisin marque 76?

8° Le diamètre d'un tube barométrique est de 2 centimètres; la cuvette est circulaire, son diamètre est de 4 centimètres? De quelle hauteur x s'élèvera le niveau dans la cuvette lorsque le baromètre baissera de 5 millimètres?

9° Dans des hémisphères de Magdebourg de 5 centimètres de rayon, on a fait le vide jusqu'à 1 centimètre. On a fixé au sol l'hémisphère inférieur, quel effort de traction faut-il exercer pour séparer l'hémisphère supérieur, la pression extérieure étant de 76 centimètres?

10° Quelle doit être la capacité d'un vase contenant 3^{es} d'air à 0°, pour que cet air exerce une pression de 500 grammes par centimètre carré? Densité de l'air, 0,0013.

COMPRESSIBILITÉ DES FLUIDES

COMPRESSIBILITÉ DES LIQUIDES

202. Un liquide, tel que le mercure, comprimé dans un vase clos, éprouve une très faible diminution de volume, proportionnelle à l'accroissement de pression.

On nomme *coefficient de compressibilité* la diminution de volume de l'unité de volume du liquide pour un accroissement de pression égal au poids d'une atmosphère. Ce coefficient est égal à :

$$\frac{5}{1\ 000\ 000} \text{ pour le mercure,}$$

$$\frac{50}{1\ 000\ 000} \text{ pour l'eau.}$$

La réaction d'un liquide ou sa force élastique résulte de l'état de compression où il se trouve, elle est égale à la pression à laquelle elle fait équilibre et se mesure comme elle par un poids (en dynes).

Supposons le liquide renfermé dans un cylindre AB; une pression étant exercée à la partie supérieure du cylindre, la force élastique en A est, à l'état d'équilibre, égale à la pression exercée directement sur le liquide; en B, la pression et la force élastique ont pour valeur la pression exercée en A augmentée du poids d'une colonne de liquide de hauteur AB (fig. 162).

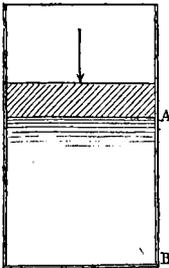


Fig. 162.

Quand on cesse la compression, le liquide revient à son volume primitif, il reprend en A une force élastique égale à la pression atmosphérique; en B, sa force élastique est égale à la pression atmosphérique accrue de la pression de la colonne liquide de hauteur AB.

La force élastique d'un liquide devient inférieure à la pression atmosphérique si l'on fait le vide au-dessus de lui.

La densité d'un liquide croît avec sa force élastique, mais dans de très faibles proportions, puisque la variation de volume est très petite.

COMPRESSIBILITÉ DES GAZ

203. L'expérience du briquet à air fait voir que les gaz sont facilement compressibles; elle démontre aussi que la force élastique exercée par le gaz sur le piston et par conséquent sur les parois du vase qu'il occupe, croît lorsque son volume diminue.

Un gaz éprouve par la compression une grande diminution de volume; un accroissement notable de densité accompagne cette diminution de volume.

Mariotte a fait connaître la relation simple qui existe à *température constante* entre la force élastique d'un gaz et son volume.

204. **Loi de Mariotte.** — *Les volumes que prend une même masse gazeuse, à température constante, sont inversement proportionnels aux pressions qu'elle supporte.*

D'après cette loi, si une masse déterminée de gaz occupe un volume V sous la pression p , elle occupera un volume $\frac{V}{2}$, $\frac{V}{3}$... quand la pression deviendra $2p$, $3p$... et un volume $2V$, $3V$... quand la pression deviendra $\frac{p}{2}$, $\frac{p}{3}$...

V et V' étant les volumes d'une masse de gaz, à une même température, sous des pressions p et p' , on aura :

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

$$\text{ou } pV = p'V'.$$

Sous cette dernière forme, la loi s'énonce : *Le produit du volume d'une masse donnée de gaz par la pression qu'elle supporte est constant; la valeur de ce produit constant représente le volume que prend la masse de gaz quand elle exerce l'unité de force élastique ou la force élastique correspondant à l'unité de volume.*

Le rapport des forces élastiques étant égal au rapport des colonnes de mercure H et H' qui leur font équilibre, la loi de Mariotte peut être formulée par la proportion :

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

$$\text{ou par le produit } HV = H'V'.$$

Désignons par M une masse de gaz, par V son volume et D sa densité, supposons que cette masse prenne un volume V' et une densité D' ,

$$M = VD = V'D'$$

puisque la masse est constante; par suite,

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

mais si la température reste invariable,

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

on a donc $\frac{D'}{D} = \frac{H'}{H}$; d'où cet énoncé :

la densité d'un gaz, à température constante, varie proportionnellement à sa force élastique.

205. Vérification de la loi de Mariotte. — I. Pressions peu supérieures à la pression atmosphérique. — La vérification se fait avec le *tube de Mariotte*. C'est un tube de verre recourbé, à branches inégales, dont la grande branche est ouverte et la courte branche fermée. Le long de chaque branche sont tracées des divisions : les unes, en regard de la longue branche, sont d'*égale longueur*; les autres, sur la petite branche, correspondent à des *capacités égales*.

A l'aide d'un entonnoir, on commence par verser du mercure sec dans la grande branche et, en inclinant légèrement le tube pour faire sortir un peu de gaz de la petite branche, on met le mercure de niveau dans les deux branches. Les niveaux étant à la même hauteur, le mercure éprouve des pressions égales sur le plan horizontal des surfaces libres (fig. 164), et *la force élastique de l'air emprisonné dans la petite branche fait équilibre à la pression atmosphérique*.

On ajoute alors dans la grande branché du mercure dont la pression fait décroître le volume du gaz, et l'on s'arrête quand ce volume est réduit à moitié. A cet instant, le plan CC' étant un plan horizontal mené *par le niveau libre du mercure dans la branche fermée*, on trouve que la hauteur $C'A$ dans le grand tube est égale à la colonne soulevée dans un baromètre voisin. La force élastique du gaz fait

équilibre à cette colonne de mercure accrue de la pression atmosphérique qui s'exerce librement en A, elle vaut donc deux atmosphères : elle est devenue double quand le volume a été réduit à moitié.

Si le tube ouvert a une longueur suffisante, on pourra réduire au tiers le volume initial du gaz dans la courte branche; la colonne soulevée dans le grand tube au-dessus du plan horizontal qui passe par la surface libre dans la branche fermée, sera alors égale à deux fois la colonne barométrique; en y ajoutant la pression atmosphérique qui s'exerce sur la surface libre dans le grand tube, on constate que la force élastique du gaz vaut trois atmosphères : elle est triple de sa valeur initiale, alors que le volume est réduit au tiers.

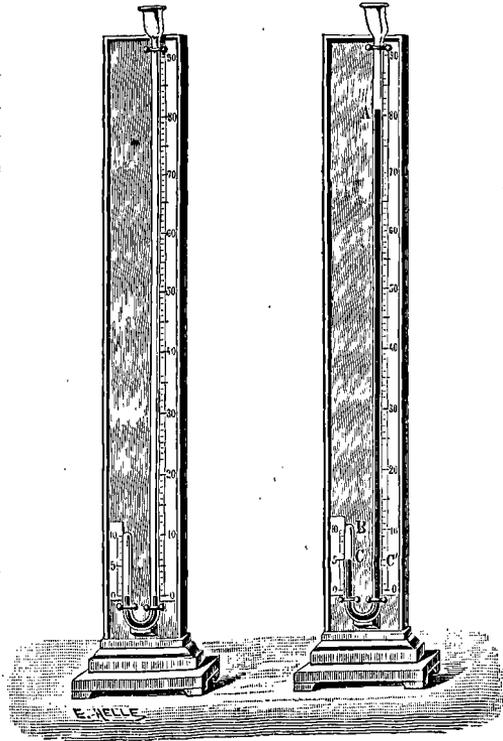


Fig. 164.

206. Pressions inférieures à la pression atmosphérique. — On prend un tube de verre B de 1 mètre environ, fermé à l'une de ses extrémités et divisé en parties d'égale capacité. On y verse du mercure et on y laisse une certaine quantité d'air; puis, après l'avoir fermé avec le doigt, on le retourne dans une *cuvette profonde* en verre C, dont le fond est formé d'un gros tube de fer (fig. 165). On enfonce le tube jusqu'à ce que le niveau soit le même dans le tube et dans la cuvette. L'air emprisonné, dont le volume est lu sur le tube, est à la pression atmosphérique H, puisque la surface du mercure est de niveau, à l'intérieur et au dehors du tube, comme si elle était partout en contact avec l'air extérieur. On soulève alors le tube; le volume du gaz augmente en même temps que le mercure monte au-dessus du niveau de la cuvette. La pression du gaz, augmentée de la

pression de la colonne de mercure soulevée, fait équilibre à la pression atmosphérique qui s'exerce sur la surface du mercure de la cuve (fig. 166). Lorsque le volume du gaz a doublé, la colonne soulevée

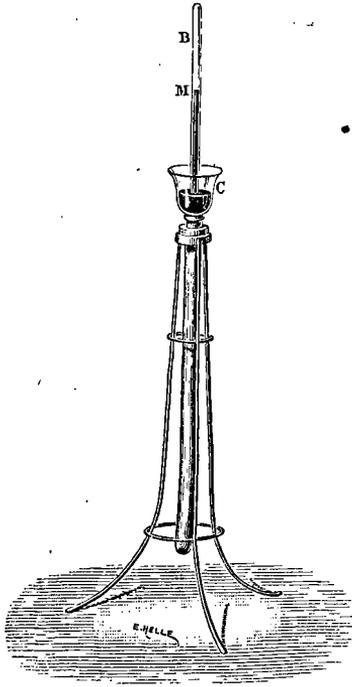


Fig. 165.

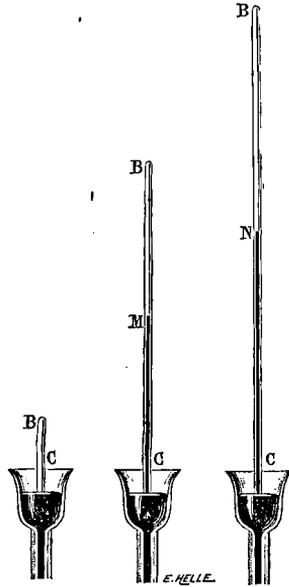


Fig. 166.

jusqu'au niveau M est égale à $\frac{H}{2}$; la pression qu'il faut y adjoindre, pour compléter la pression atmosphérique H, est $\frac{H}{2}$, c'est la force élastique du gaz.

On soulève le tube de manière à donner au gaz un volume triple de son volume primitif; la colonne soulevée jusqu'en N vaut $\frac{2H}{3}$; la pression qu'il faut y ajouter, pour compléter H, est $\frac{H}{3}$, c'est la force élastique du gaz (fig. 166).

Lorsque le volume du gaz est devenu double, triple, etc., sa force élastique a donc été réduite à la moitié et au tiers de sa force élastique initiale.

Le tube plongé dans la cuvette profonde doit être tenu avec une

pince en bois pour que la chaleur de la main n'élève pas la température du gaz; en outre, ici comme avec le tube de Mariotte, les brusques variations de volume du gaz sont accompagnées de variations de température (494), et il convient d'attendre le retour à la température ambiante pour faire la lecture.

207. III. Pressions notablement supérieures à la pression atmosphérique. — La loi de Mariotte, vérifiée pour l'air sous des pressions peu différentes de la pression atmosphérique, n'est pas l'expression rigoureuse de la loi générale de compressibilité de tous les gaz, sous toutes les pressions.

Elle est en défaut quand la pression s'élève notablement au-dessus de la pression atmosphérique.

Voici un moyen de le constater : on place deux tubes gradués semblables, l'un à côté de l'autre, sur une cuvette à mercure. Ils renferment des volumes égaux d'air et d'un gaz facilement liquéfiable, tel que l'acide sulfureux ou l'ammoniaque. Les tubes de la cuvette sont introduits dans un épais cylindre de verre AB plein d'eau et surmonté d'un corps de pompe où s'enfonce un piston à vis V. On comprime l'eau à l'aide du piston, la pression est transmise au mercure et à chacun des gaz. Des volumes égaux, sous une même pression initiale H, au lieu de subir la même diminution, comme s'ils étaient également compressibles, prennent des volumes différents sous une pression nH (fig. 167). *Les gaz facilement liquéfiables sont plus compressibles que l'air.*

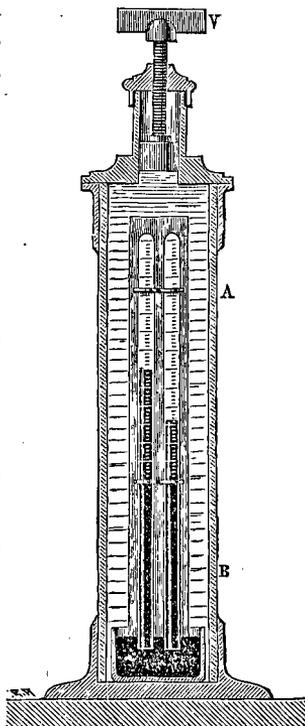


Fig. 167.

208. Expériences de Dulong et Arago. — Dulong et Arago soumièrent la loi de la compressibilité de l'air à des expériences de vérification qu'ils poussèrent jusqu'à 27 atmosphères.

Appareil. — Leur appareil, analogue à un tube de Mariotte de grandes dimensions et très résistant, comprenait : 1° un tube fermé BC contenant l'air comprimé; 2° une série de tubes formant un très long tube ouvert;

3° sur le canal de communication un réservoir à mercure R muni d'une pompe P qui permettait de refouler le mercure dans les deux tubes.

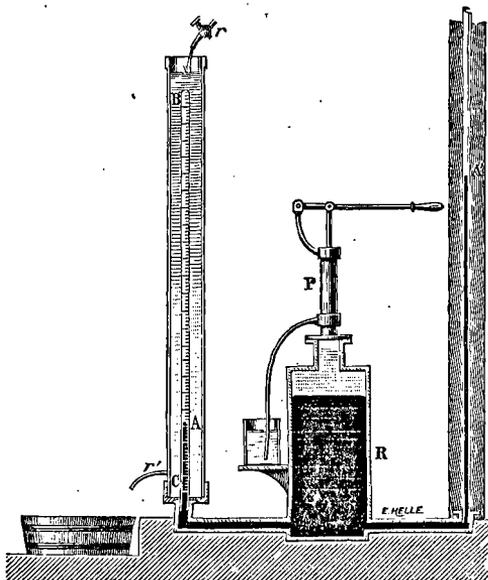


Fig. 168.

Le tube fermé BC était divisé en parties d'égale capacité, on y lisait directement les volumes; la force élastique du gaz était égale à la pression exercée par une colonne de mercure ayant pour hauteur la différence des niveaux en A et en A', accrue de la pression atmosphérique qui s'exerçait en A' sur le mercure du tube ouvert. Le tube BC était, pendant les expériences, maintenu à une température constante par un courant d'eau froide qui s'échappait d'un robinet r (fig. 168).

Résultats. — Les volumes V_1, V_2, V_3 de la masse gazeuse à différentes pressions $H_1, H_2, H_3 \dots$ furent comparés aux volumes calculés d'après la loi de Mariotte sup-

posée exacte; les différences entre les volumes mesurés et les volumes calculés furent très petites; la loi de Mariotte fut alors admise exacte pour l'air jusqu'à 27 atmosphères.

Incertitudes. — Le volume initial V_1 de la masse d'air décroissait constamment quand la pression augmentait, et finissait par se réduire sensiblement à $\frac{V_1}{27}$. Désignons par ϵ l'erreur à peu près constante qui pouvait être commise dans l'évaluation du volume; l'erreur relative, égale à la fraction $\frac{\epsilon}{V_1}$ du volume pour la première mesure, devenait $\frac{\epsilon}{\frac{V_1}{27}}$ ou $\frac{27\epsilon}{V_1}$, c'est-à-

dire 27 fois plus forte dans la dernière mesure. L'erreur de lecture devient donc, alors une fraction assez importante du volume observé, capable de masquer de petits écarts.

209. Expériences de Regnault. — Dans le dispositif de Regnault, l'erreur de lecture est une fraction constante du volume observé.

Description de l'appareil. — Le gaz est isolé dans un tube de verre de 3 mètres de longueur, maintenu à température constante par un

manchon où circule un courant d'eau froide. Ce tube communique à sa partie supérieure par un robinet r avec un récipient où est comprimé le gaz étudié. Sur le tube sont marqués deux traits de repère α et β tels que le volume compris entre α et β est rigoureusement égal au volume compris entre β et le robinet r . Ce tube est assujéti par le bas dans une tubulure d'un cylindre en fonte AB. Dans une deuxième

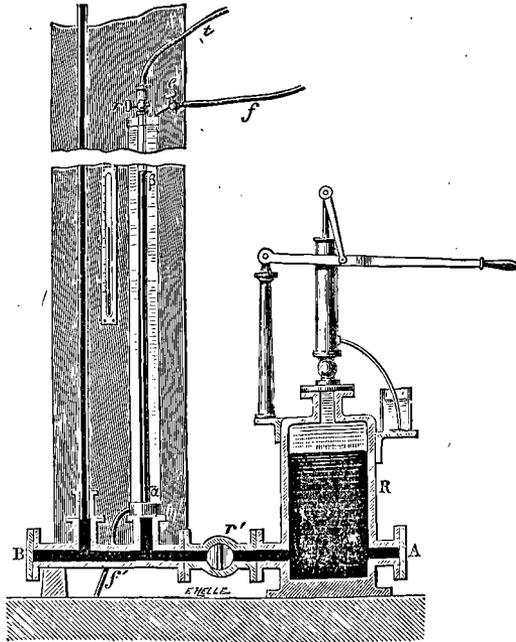


Fig. 169.

tubulure du même cylindre est engagée l'extrémité d'une série de tubes de verre réunis entre eux par des garnitures métalliques et formant une colonne verticale ouverte d'environ 25 mètres. Le cylindre AB contient du mercure et met les tubes en communication avec un réservoir R muni d'une pompe. Un robinet r' permet d'intercepter au moment des lectures la communication entre le réservoir et les deux tubes (fig. 169).

Marche des expériences. — Par la partie supérieure du tube à compression on fait arriver le gaz sec sur lequel on veut opérer et on remplit ce tube jusqu'en α : soit V le volume du gaz. Le robinet r étant fermé, on fait fonctionner la pompe annexée au réservoir et on

réduit le gaz au volume $\frac{V}{2}$ en le refoulant jusqu'en β . Pour ces deux volumes, la différence des niveaux de mercure dans le grand tube et dans le tube de compression (accrue de la pression atmosphérique) fait connaître les forces élastiques p et p' du gaz.

Les lectures étant faites, on ouvrait le robinet r et on introduisait dans le tube de compression une masse de gaz différente, de volume V , à une nouvelle pression initiale p_1 , supérieure à p ; on réduisait le volume à être $\frac{V}{2}$ et on mesurait la nouvelle pression p'_1 .

Les volumes V et $\frac{V}{2}$ ne variant pas dans les expériences successives faites à des pressions croissantes, et l'erreur absolue de lecture ε changeant peu, les erreurs relatives étaient sensiblement constantes.

Si la loi de Mariotte est vraie, on doit avoir entre les volumes et les pressions qui se rapportent à une même masse de gaz la relation :

$$Vp = \frac{V}{2} p'$$

$$\text{d'où } p' = 2p.$$

210. Résultats. — Les mesures très précises de Regnault ont fait voir que les gaz difficilement liquéfiables tels que l'azote, l'hydrogène, l'air atmosphérique n'obéissent qu'à peu près à la loi de Mariotte. Les écarts suivent une loi régulière, ce qui ne permet pas de les attribuer à des erreurs de lecture; ils sont variables d'un gaz à l'autre. Les recherches de Regnault, relatives à la température ordinaire et poussées seulement jusqu'à 27 atmosphères, ont été complétées et étendues par Amagat.

Température ordinaire. — 1° Pour l'hydrogène, qui est le plus difficilement liquéfiable de tous les gaz, la compressibilité est *inférieure* à celle de la loi de Mariotte; la réduction du volume à sa moitié exige une pression supérieure au double de la pression initiale; la différence, d'abord très faible, croît avec la pression, et le produit pV va en augmentant quand la pression augmente. L'hydrogène résiste donc d'autant plus à la compression que celle-ci est plus grande.

2° Les gaz plus facilement liquéfiables que l'hydrogène, mais que la pression seule (404) ne peut liquéfier qu'à une température très basse (air, azote, etc.), offrent d'abord une compressibilité *supérieure* à

celle de la loi de Mariotte, la réduction du volume à sa moitié étant produite par une pression inférieure au double de la pression initiale ; les différences, d'abord très faibles, croissent avec la pression et sont variables d'un gaz à l'autre ; le produit pV diminue quand la pression augmente. En faisant croître la pression, la compressibilité passe par un **maximum** (minimum du produit pV), puis elle décroît ; on atteint une pression où le gaz suit la loi de Mariotte. Pour des pressions encore plus fortes, la compressibilité devient comme pour l'hydrogène, *inférieure* à celle de la loi de Mariotte, le produit pV augmente, et à des pressions extrêmement élevées (de 1000 à 3000 atmosphères), la résistance à la compression est comparable à celle d'un liquide.

A 15°, le maximum de compressibilité a lieu pour l'azote vers 75 atmosphères ; c'est vers 125 atmosphères que l'écart devient nul ; au delà, la compressibilité est moindre que ne le veut la loi.

3° Les gaz qui peuvent être liquéfiés par la pression à la température ordinaire, tels que l'acide carbonique, l'acide sulfureux, l'ammoniaque, offrent une compressibilité *supérieure* à celle de la loi de Mariotte (pV diminue), et d'autant plus qu'on s'approche davantage de la liquéfaction. Les écarts ont lieu par conséquent dans le même sens qu'avec l'air ou l'azote, pour des pressions peu élevées, mais ils sont notablement plus accentués, et pour ces gaz la loi de Mariotte ne peut plus être considérée comme exacte dès une pression de 3 ou 4 atmosphères.

Températures élevées. — Pour tous les gaz, les écarts de la loi de Mariotte sont moindres qu'à la température ordinaire et ils ont lieu respectivement pour les trois groupes dans le même sens qu'à la température ordinaire. L'hydrogène continue à offrir une compressibilité *inférieure* ; à une température assez élevée, les gaz tels que l'azote se comportent immédiatement comme l'hydrogène ; il est probable d'après cela que l'hydrogène présenterait un maximum de compressibilité si on le refroidissait suffisamment.

Il résulte de l'ensemble des recherches que pour de faibles écarts de pressions et avec des gaz éloignés de leur point de liquéfaction, comme l'azote, l'air, l'hydrogène à la température ordinaire, la loi de compressibilité est assez voisine de la loi de Mariotte pour que dans les *calculs usuels*, on puisse considérer la loi de Mariotte comme exacte.

Applications. — 1° Une certaine masse de gaz, mesurée à la pression de 74 centimètres occupe un volume de 646 centimètres cubes. Quel est son volume à la pression 76 ?

2° Un litre d'air pèse 1^{re}273 à la pression 76; quel est le poids d'un litre d'air à la pression 77?

3° Une même masse d'air occupe successivement deux sphères de 2 et de 5 centimètres de rayon. Quel est le rapport des pressions?

4° Un tube barométrique de 1 centimètre carré de section et dans lequel le mercure s'élève à 76 centimètres, présente une chambre vide de 10 centimètres de longueur. Quel volume V d'air faut-il y introduire à la pression de 76 centimètres pour que le niveau tombe à 50 centimètres?

5° Un tube barométrique ayant 1 centimètre carré de section, marque 77 centimètres, et la hauteur de la chambre barométrique est de 4 centimètres. De combien le mercure sera-t-il déprimé si un centimètre cube d'air (à la pression 77) passe dans le tube?

6° Un tube barométrique contient un peu d'air. La chambre barométrique ayant 10 centimètres de hauteur, la colonne observée est de 75 centimètres. On soulève le tube, lorsque la chambre barométrique occupe 15 centimètres, la colonne a 75,2 centimètres. Calculer la hauteur barométrique vraie H au moment de l'expérience.

7° La chambre d'un baromètre à siphon longue de 10 centimètres contient un peu d'air, la hauteur observée est 75; on enlève du mercure avec une pipette, la différence des niveaux devient 75,2 et la longueur de la chambre barométrique 10,8. Quelle est la valeur H de la pression atmosphérique?

8° Une cloche à plongeur, cylindrique, ayant une hauteur de 3 mètres et une section de 6 mètres carrés est descendue dans l'eau jusqu'à ce que son sommet se trouve à 10^m,6 au-dessous de la surface. Quel volume V d'air faudra-t-il introduire à la pression extérieure qui est de 76 centimètres pour empêcher l'eau de s'élever dans la cloche?

9° Une éprouvette cylindrique contenant un gaz plonge dans une cuve à mercure. Le gaz occupe une hauteur de 10 centimètres, le mercure est soulevé de 10 centimètres; il faut enfoncer l'éprouvette de 17 centimètres dans la cuve pour que le gaz ait une pression égale à la pression extérieure. Quelle est la pression atmosphérique H?

MANOMÈTRES

211. On appelle spécialement *force élastique* d'un gaz la pression qu'il exerce sur une surface de 1 centimètre carré.

Les appareils qui servent à mesurer la force élastique des gaz et des vapeurs sont des **manomètres**. Dans les déterminations *théoriques* on évalue la force élastique en dynes; la valeur du gramme en dynes varie toutefois assez peu pour que dans les mesures *industrielles* on puisse la regarder comme constante, et on exprime les forces élastiques en grammes, en kilogrammes ou en atmosphères. Quand un manomètre adapté à une machine à vapeur marque 10 atmosphères, chaque centimètre carré de la paroi intérieure de la chaudière supporte normalement une pression égale au poids d'une colonne de mercure de 10.76 centimètres de hauteur. Ce poids vaut 10.76.13,6 = 10330 grammes ou 10^{kg}33.

MANOMÈTRES INDUSTRIELS

212. Manomètres à air libre. — Il consiste en un tube recourbé contenant du mercure. La pression du gaz s'exerce par la branche la

plus courte. Les niveaux du mercure sont dans un même plan horizontal AB quand la pression du gaz est égale à la pression atmosphérique. Le mercure s'élève dans la branche ouverte et s'abaisse dans l'autre quand la pression du gaz est supérieure à la pression atmosphérique (fig. 170). La différence verticale des niveaux étant $A'B' = h$, la force élastique du gaz est représentée par le poids d'une colonne de mercure de 1 centimètre carré de base et de hauteur $H + h$, H hauteur de la colonne barométrique qui agit sur B' . Si $h = 76$, la pression du gaz sera de deux atmosphères. Lorsque les deux branches ont le même diamètre, la dépression au-dessous de A dans l'un des tubes est égale à l'élévation au-dessus de B dans l'autre. Pour une pression de 5 atmosphères, l'instrument doit avoir des dimensions telles que $A'B' = 4.76$ centimètres, c'est-à-dire plus de 3 mètres.

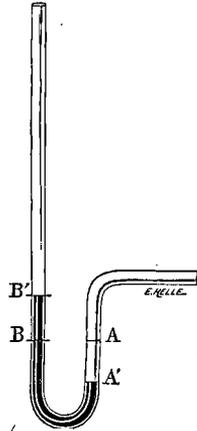


Fig. 170.

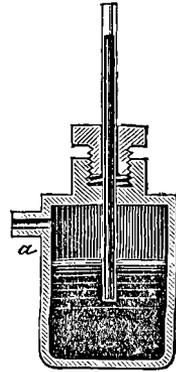


Fig. 171.

Les lectures sont faites en A' et en B' sur une échelle divisée, verticale, disposée entre les deux branches du tube.

Souvent le manomètre à air libre a la forme d'une large cuvette en fer contenant du mercure et présentant à sa partie supérieure une ouverture fermée par un bouchon à vis. Dans ce bouchon est mastiqué un long tube ouvert à ses deux extrémités et plongeant par son extrémité inférieure dans le mercure de la cuvette (fig. 171). Le gaz ou la vapeur pénètre par un ajutage latéral a et exerce sa pression sur le mercure de la cuvette. Celui-ci monte dans le tube à une hauteur qu'on lit sur une règle ayant son zéro au niveau primitif dans la cuvette, le diamètre de cette cuvette étant assez large pour que la dépression y reste pratiquement négligeable. La hauteur lue doit être augmentée de la hauteur barométrique. Les manomètres à air libre ne sont en usage que pour les pressions qui ne dépassent pas 4 à 5 atmosphères. Pour des pressions supérieures, la longueur des manomètres à air libre est embarrassante, et on fait usage de manomètres à air comprimé.

Si le liquide du manomètre à air libre n'est pas du mercure, la

force élastique du gaz sera mesurée en colonne de mercure par $H + h \frac{d}{D}$, d densité du liquide, D densité du mercure, h hauteur du liquide.

Pour des mesures précises, d doit être la densité du liquide dans les conditions de l'expérience, D la densité du mercure normal, H la colonne barométrique réduite (313).

Une force élastique inférieure à la pression atmosphérique serait représentée par $H - h \frac{d}{D}$.

213. Manomètres à air comprimé. — Ces manomètres, réduits à la courte branche d'un tube de Mariotte, renferment une masse d'air sec limitée dont la force élastique augmente à mesure que son volume

diminue. Le tube fermé qui contient la masse d'air est relié au réservoir à vapeur soit par une cuvette en fer dans laquelle il plonge verticalement (fig. 172), soit par un tube recourbé renfermant du mercure à sa partie inférieure (fig. 173). Le niveau du mercure est le même dans le tube et la cuvette ou dans les deux branches du tube recourbé si la pression du

réservoir est égale à la pression du gaz emprisonné dans le tube du manomètre. Le mercure monte dans le tube dès que la pression augmente dans le réservoir. Quand l'équilibre est atteint, la pression dans le réservoir est égale à la somme de la force élastique de l'air comprimé et de la pression due à la colonne de mercure soulevée entre les deux niveaux dans le tube et dans la cuvette.



Fig. 172.

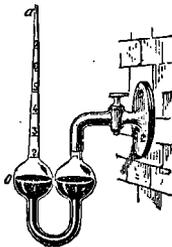


Fig. 173.

Les manomètres à air comprimé se graduent par comparaison avec un manomètre à air libre. On fait communiquer avec un même réservoir un manomètre à air libre et le manomètre à graduer, puis on exerce dans ce réservoir une pression de 2 atmosphères mesurée par le manomètre à air libre, et on inscrit 2 au niveau correspondant du mercure dans le tube fermé du manomètre à air comprimé. On opère de même pour des pressions supérieures.

Les petites dimensions du tube fermé rendent ce manomètre aisément transportable, mais si la chambre à air était cylindrique, les chiffres inscrits aux niveaux successifs du mercure deviendraient très

voisins pour les pressions élevées et une petite erreur de lecture conduirait à une évaluation peu précise de la force élastique cherchée (fig. 185). On atténue cette diminution de la sensibilité aux fortes pressions en effilant le tube manométrique (fig. 186). La fragilité de l'appareil et l'encrassement du tube de verre produit par l'oxydation lente du mercure au contact de l'air comprimé font préférer les manomètres métalliques.

214. Manomètres métalliques. — Le manomètre métallique de Bourdon (fig. 174) se compose d'un tube de laiton à section elliptique et à parois minces et flexibles contourné en spirale sur une longueur d'une spirale et demie. Une des extrémités du tube est fixe, elle est ouverte et mise en communication par un robinet avec le réservoir à pression; l'autre extrémité est fermée et libre ainsi que le reste du tube. L'extrémité fermée entraîne une longue aiguille qui se déplace sur un cadran divisé. Quand la pression augmente à l'intérieur du tube, la spirale *tend à se dérouler*, ce qui fait varier la position de l'extrémité fermée et par suite de l'aiguille sur le cadran ⁽¹⁾.

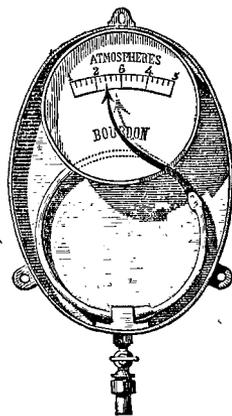


Fig. 174.

Les manomètres métalliques se graduent par comparaison avec un manomètre à air libre. Par suite des altérations que les pièces métalliques subissent dans leur élasticité, la graduation doit être répétée de temps en temps.

MANOMÈTRES DE PRÉCISION

Les manomètres de précision sont des *manomètres à air libre*. Regnault a fait usage des manomètres à air libre sous trois formes spéciales, adaptées à la grandeur des forces élastiques à évaluer.

215. Pressions élevées. — Dans les expériences sur la loi de Mariotte ou sur la force élastique de la vapeur d'eau, le manomètre

(1) Une pression extérieure aurait pour effet d'enrouler davantage la spirale. Des baromètres métalliques ont été construits sur ce principe.

consistait en deux tubes de verre parallèles et verticaux, mastiqués dans un canal en fonte horizontal et contenant du mercure sec. La courte branche du manomètre communique avec le récipient qui contient le gaz, la longue branche s'ouvre directement dans l'atmosphère. La branche ouverte était formée d'une série de tubes superposés, présentant chacun deux repères fixes. On déterminait exactement la distance des deux repères d'un même tube et la distance de deux repères voisins appartenant à deux tubes consécutifs. Pour chaque observation, il suffisait alors de mesurer la distance verticale du niveau du mercure dans la branche ouverte au repère le plus voisin dans la même branche, puis la distance verticale du niveau dans la branche fermée au repère le plus voisin de la branche

ouverte. On peut alors calculer la distance verticale des niveaux dans les deux branches, et on y ajoute la hauteur barométrique qui s'exerce au sommet de la colonne de la branche ouverte (fig. 168 et 169).

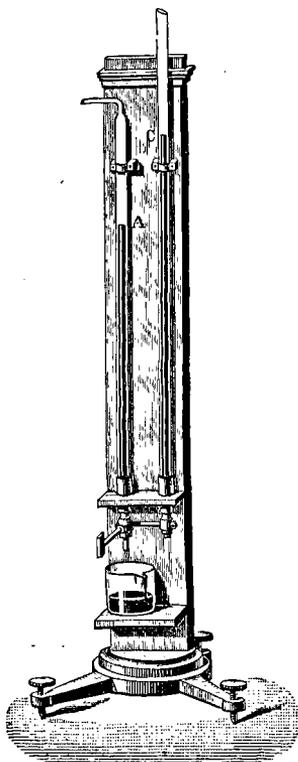


Fig. 175.

216. Pressions voisines de la pression atmosphérique (comprises entre 1 et 2 atmosphères). — Le manomètre se compose dans ce cas de deux branches en verre d'inégale longueur et de même diamètre, mastiquées dans un tube de fonte deux fois recourbé. La branche la plus longue est ouverte (fig. 175), la branche la plus courte A communique avec le récipient à gaz. Pour la commodité des opérations, un robinet à trois voies R permet d'établir la communication des deux branches entre elles (fig. 176, position 1), ou de l'une des branches avec l'extérieur (positions 3 et 4), en isolant l'autre, ou des deux branches avec l'extérieur (position 2). On mesure avec un cathétomètre la distance verticale h des niveaux A et C du

mercure dans les deux branches. La force élastique qui s'exerce en A est égale à $(H + h) Dg$. La hauteur barométrique qui agit en C est H,

le poids de l'unité de volume du mercure dans les conditions de l'expérience est égale à Dg .

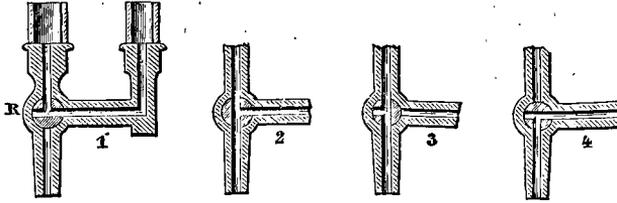


Fig. 176.

Si l'on se contente d'exprimer cette pression en colonne de mercure, on cherche la *hauteur équivalente de mercure normal* en posant :

$$(H + h)Dg = H_0D_0g_0^{(1)}.$$

217. Pressions inférieures à la pression atmosphérique. — Le récipient qui contient le gaz communique avec un simple tube droit d'environ 80 centimètres de hauteur plongeant dans une cuvette à mercure. Le niveau du mercure est le même dans le tube et dans la cuvette si la pression du gaz vaut exactement la pression atmosphérique. Le mercure monte dans le tube si la pression du gaz est inférieure à la pression atmosphérique (fig. 177).

La pression dans le plan horizontal qui passe par le niveau de la cuvette est la même en dehors et en dedans du tube; sur l'unité de surface. A l'intérieur du tube, c'est $F + hDg$, F force élastique du gaz qui s'exerce par t , h hauteur de la colonne de mercure soulevée; à l'extérieur du tube, c'est Hdg , H hauteur barométrique.

$$F + hDg = HDg, \text{ d'où } F = (H - h)Dg.$$

Un baromètre vide est disposé à côté du tube manométrique, dans la même cuvette; on mesure au cathétomètre la distance verticale $H - h$ des niveaux de

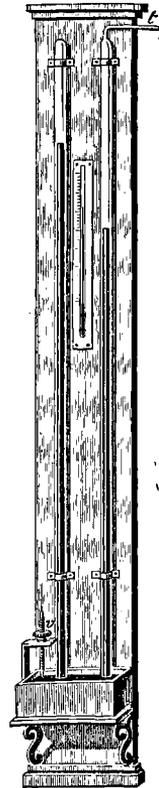


Fig. 177.

(1) Voir *Corrections barométriques* dans les applications des dilatations (313).

mercure dans les deux tubes. L'ensemble du tube manométrique et du baromètre porte le nom de *manomètre barométrique*.

Dans tous ces appareils, les corrections de capillarité ne sont négligeables qu'avec des tubes dont le diamètre intérieur dépasse 30 millimètres.

218. Mesure de la force élastique d'un gaz dans une éprouvette.

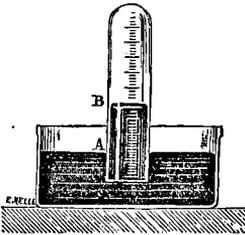


Fig. 178.

— Soit une éprouvette renfermant un certain volume de gaz (fig. 178); appelons h la hauteur de la colonne liquide soulevée AB; la force élastique du gaz, ajoutée à la pression de la colonne h , contre-balance la pression atmosphérique; elle équivaut donc à la pression d'une colonne liquide de hauteur $H - h$, H étant la hauteur du liquide considéré qui mesure la pression atmosphérique.

LOI DU MÉLANGE DES GAZ

219. Loi du mélange des gaz ou loi de Dalton. — Deux gaz mis en présence ne se superposent pas, comme des liquides, par ordre de densité, ils se mélangent comme s'ils se pénétraient; cette pénétration est appelée *diffusion*. Quand on mélange plusieurs gaz entre lesquels il n'y a pas d'action chimique, chacun d'eux se répartit uniformément dans tout le volume qui lui est offert, comme s'il était seul, et la force élastique du mélange est égale à la somme des forces élastiques qu'aurait chacun d'eux s'il occupait seul le volume total du mélange. Cet énoncé est dû à Dalton.

Prenons plusieurs gaz à la même température, ayant des volumes v, v', v'' , avec des forces élastiques respectives p, p', p'' .

Réunissons-les dans un volume V ; si chacun d'eux occupait seul tout l'espace V , les forces élastiques respectives seraient x, x', x'' données, conformément à la loi de Mariotte, par les équations :

$$vp = Vx$$

$$v'p' = Vx' \dots$$

D'après la loi énoncée plus haut, la force élastique du mélange est :

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

On tire de là : $VP = vp + v'p' + \dots = \Sigma vp$ (1).

La loi du mélange des gaz peut être vérifiée en faisant passer des masses gazeuses de pression et de volume connus dans une même enceinte de volume V et en mesurant la pression du mélange (2).

Lorsque $p = p' = p''$ et $V = v + v' + v''$, la pression du mélange est $P = \frac{p}{V}(v + v' + \dots) = p$. C'est à ce cas particulier que se rapporte une expérience de vérification due à Berthollet.

220. Expérience de Berthollet. — Berthollet mélangea deux gaz qui étaient primitivement à la même pression et reconnut que la diffusion s'opérait sans variation de pression. Il prit deux ballons égaux munis de garnitures à robinets, remplit l'un d'acide carbonique, l'autre d'hydrogène à la même pression, ferma les robinets et vissa les deux ballons l'un sur l'autre en plaçant le ballon rempli de gaz le plus léger au-dessus du ballon contenant le gaz le plus lourd. L'ensemble fut descendu dans les caves de l'Observatoire de Paris où la température est invariable. Vingt-quatre heures plus tard, l'équilibre de température entre les ballons et le milieu extérieur étant établi, les robinets furent ouverts (fig. 179). Après une communication de plusieurs heures, les robinets furent fermés et le contenu de chaque ballon fut examiné séparément.

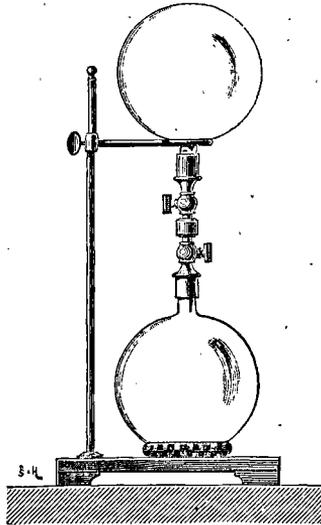


Fig. 179.

La proportion des deux gaz était la même dans chacun des deux ballons, ce qui montre que chacun d'eux occupait la capacité totale

(1) Cette équation peut encore s'écrire :

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

$\frac{vp}{P}$ est d'après la loi de Mariotte le volume y que le premier gaz occuperait s'il était porté à la pression P ($Py = vp$); la nouvelle forme de l'équation exprime que le volume d'un mélange est égal à la somme des volumes qu'occuperait séparément chacun des gaz soumis à la pression totale du mélange.

(2) La loi du mélange des gaz n'est pas une loi rigoureuse.

comme si cette capacité avait été vide, en outre la pression du mélange était égale à la pression initiale.

Applications. — 1° Dans un manomètre à air libre qui communique avec un récipient à air comprimé, le mercure s'élève à 570^{mm} au-dessus du niveau de la cuvette (de niveau sensiblement invariable); la hauteur barométrique est 750 millimètres. Quelle est la force élastique de l'air comprimé?

2° La hauteur du tube d'un manomètre à air comprimé est de 67,7 centimètres au-dessus du point où s'arrête le mercure, à égalité de niveau dans le tube et dans la cuvette pour une pression de 76 centimètres (cuvette à niveau sensiblement invariable). Pour quelle pression H le mercure s'élèvera-t-il à 35,2 centimètres?

3° Un manomètre à air comprimé, cylindrique et contenant de l'air sec, plonge dans une large cuvette à mercure, de niveau invariable. La hauteur du tube est 40 centimètres au-dessus du point où s'arrête le mercure à égalité de niveau dans le tube et la cuvette, pour une pression de 76 centimètres. A quelle distance d du sommet du tube s'arrêtera le mercure pour une pression de 3 atmosphères?

4° Un manomètre à air comprimé est formé de deux branches cylindriques de même diamètre; le mercure est de niveau dans les deux branches quand la branche ouverte reçoit une pression de 76 centimètres; la hauteur du tube fermé occupée à ce moment par l'air est de 40 centimètres. A quelle distance d du sommet se trouvera le mercure pour une pression de 3 atmosphères?

5° Un premier ballon contient 6 litres d'oxygène sous la pression de 4 atmosphères; un deuxième ballon renferme 4 litres d'azote sous la pression de 5 atmosphères. On les fait communiquer. Quelle est la force élastique F du mélange lorsque la température est redevenue égale à la température initiale?

6° Dans le problème précédent, quelle est la composition centésimale du mélange en volumes?

7° Un récipient renferme 5 litres d'air à la pression de 1 mètre de mercure, on fait sortir une masse d'air qui occupe 2 litres à la pression de 76 centimètres. Quelle est la force élastique du gaz resté dans le récipient?

8° Un ballon de 10 litres, plein d'air à la pression atmosphérique 76, pèse 215 grammes, plein d'air comprimé à 3 atmosphères il pèse 241 grammes. Quelle est la densité D de l'air à la pression 76?

DISSOLUTION DES GAZ DANS LES LIQUIDES

221. Les gaz sont solubles dans les liquides et inégalement solubles.

Dans une éprouvette pleine de mercure et renversée sur un bain de mercure, faisons passer un gaz; introduisons ensuite de l'eau récemment bouillie, l'eau s'élève au-dessus du mercure et vient en contact avec le gaz. Il y a absorption lente d'une partie du gaz par l'eau et le mercure monte dans l'éprouvette. Avec différents gaz, l'absorption par un même volume d'eau est différente, ainsi l'absorption de l'acide carbonique est plus forte que celle de l'oxygène.

La solubilité diminue quand la température s'élève.

222. Lois de la solubilité d'un gaz. — A une température donnée, la masse d'un gaz dissous est proportionnelle au volume V

du dissolvant et à la pression p que le gaz restant exerce sur le liquide après que la dissolution a été effectuée.

Si l'on mesure toujours à une même pression, par exemple à la pression 76, le volume du gaz dissous, la loi précédente peut s'énoncer : le volume du gaz dissous est proportionnel au volume V du dissolvant et à la pression finale p . Si l'atmosphère gazeuse qui surmonte le liquide est indéfinie, la pression du gaz restant demeure égale à la pression initiale.

223. Coefficient de solubilité. — A une température donnée, on appelle *coefficient de solubilité* d'un gaz dans un liquide le volume c de gaz dissous par l'unité de volume du dissolvant sous une pression finale de 76 centimètres, le gaz dissous étant mesuré à la pression 76.

v étant le volume de gaz dissous par un volume V du dissolvant, le volume dissous par l'unité de volume sera $\frac{v}{V} = c$.

Ex. : Le coefficient de solubilité de l'oxygène dans l'eau à 0° est 0,041; autrement dit, 1 centimètre cube d'eau à 0° peut dissoudre 0°041 d'oxygène, la pression finale de l'oxygène étant 76 et le gaz extrait du liquide étant mesuré à la pression 76.

(Si le volume du gaz dissous à la pression finale p est mesuré à cette pression, il est *indépendant* de la pression.

Supposons en effet que la dissolution ait d'abord été faite à la pression 76 et qu'on ait trouvé pour un volume V du liquide dissolvant un volume v de gaz dissous mesuré à la pression 76. Opérons sous la pression p : le volume de gaz dissous, proportionnel à la pression d'après la loi de la solubilité, sera v_1 , donné par $\frac{v_1}{v} = \frac{p}{76}$, v_1 étant mesuré à la pression 76.

Si nous mesurons ce gaz à la pression p , son volume deviendra x ,

$$\begin{aligned} v_1 \cdot 76 &= px \\ \text{ou } \frac{pv}{76} \cdot 76 &= px; \\ x &= v. \end{aligned}$$

v et par conséquent c sont dans ces conditions indépendants de la pression.

Ainsi à 0°, le coefficient de solubilité de l'oxygène dans l'eau est 0,041, quelle que soit la pression finale, pourvu que le gaz dissous soit mesuré à cette pression finale.

224. Calcul de la masse de gaz dissoute dans une enceinte limitée.
— Désignons par V le volume du liquide et par W le volume du gaz; la pression initiale étant P , le gaz occupe le volume W à la pression P . Après la dissolution, il comprend deux parties : le gaz restant a un volume W à la

pression finale x ; le gaz dissous occuperait un volume cV à la pression x , s'il était mesuré à cette pression.

Si nous réunissons ces deux masses, nous aurons d'après la loi du mélange des gaz :

$$WP = (W + cV)x.$$

La masse de gaz dissoute sera la masse de ce volume cV à la pression x)

Si l'on diminue la pression au-dessus d'une dissolution faite sous une pression déterminée, une partie du gaz dissous se dégage, le liquide ne conserve que la masse de gaz correspondant à la nouvelle pression.

Si la dissolution est portée dans un espace qui ne renferme pas le gaz dissous, tout ce gaz s'échappe comme si la dissolution était placée dans le vide.

Souvent le gaz en excès se dégage d'abord en grande partie, mais un excès de gaz reste dissous; on peut provoquer le dégagement de cet excès de gaz en projetant dans le liquide des corps qui présentent des aspérités sur lesquelles les bulles de gaz se dégagent.

225. Dissolution d'un mélange gazeux. — Quand un mélange gazeux se trouve en présence d'un liquide, *chacun des gaz se dissout comme s'il était seul* et proportionnellement à la pression qu'il exerce dans le mélange après la dissolution.

Exercice. — Calculer les volumes d'oxygène et d'azote dissous à 0° par l'unité de volume d'eau mis en présence de l'air atmosphérique, à la pression H . Le coefficient de solubilité de l'oxygène est 0,041, celui de l'azote est 0,20.

Un centimètre cube d'eau dissoudrait 0°041 d'oxygène à la pression 76, mesuré à la pression 76.

D'après la proportionnalité de la solubilité à la pression, le volume d'oxygène dissous à la pression H , mesuré à la pression 76, serait $0,041 \cdot \frac{H}{76}$.

Par suite, à la pression $\frac{21}{100} H$ que l'oxygène exerce dans le mélange (d'après la loi du mélange des gaz), un centimètre cube d'eau dissout v centimètres cubes d'oxygène, mesurés à la pression 76

$$v = \frac{0,041 \frac{21}{100} H}{76}.$$

Le volume d'azote dissous par un centimètre cube d'eau, mesuré à la même pression 76, sera de même :

$$v' = \frac{0,021 \frac{79}{100} H}{76};$$

$$\frac{v}{v'} = \frac{861}{1580}$$

Pour obtenir la composition centésimale de l'air dissous en volumes, posons :

$$v + v' = 100,$$

nous trouvons : $v = 35$, $v' = 65$.

Pour 100 d'air dissous, il y aura 65 d'azote et 35 d'oxygène.

L'air dissous qui sert à la respiration des animaux aquatiques est donc plus riche en oxygène que l'air atmosphérique.

PRINCIPE D'ARCHIMÈDE APPLIQUÉ AUX GAZ

226. En raison de la mobilité de leurs molécules et de leur poids, les liquides exercent une poussée de bas en haut sur les corps plongés ; pour les mêmes raisons, un corps plongé dans un gaz éprouve une poussée verticale dirigée de bas en haut et égale au poids du gaz qu'il déplace.

L'existence de cette poussée se démontre par le baroscope (fig. 180).

Le **baroscope** est un fléau de balance portant à l'une de ses extrémités une petite sphère pleine B et à l'autre une grosse sphère creuse A. Elles se font équilibre dans l'air. Si l'on fait le vide autour du baroscope, le fléau s'incline du côté de la grosse sphère. La grosse sphère est donc plus pesante dans le vide que la petite et elle ne lui fait équilibre dans l'air que parce qu'elle déplace un volume d'air plus grand et éprouve par conséquent une plus forte poussée⁽¹⁾.

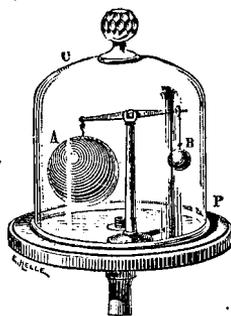


Fig. 180.

(1) Dans l'expérience de vérification du principe d'Archimède (157), les cylindres suspendus au plateau de la balance éprouvent des poussées de l'air dans lequel ils sont plongés ; on a pu négliger ces poussées, car elles restent les mêmes dans les deux équilibres, l'eau versée dans le cylindre creux se substituant au point de vue de la poussée dans l'air au cylindre plein qui est plongé dans l'eau.

L'effort exercé à l'extrémité de chacun des bras du fléau par la sphère qui y est suspendue est égal au *poids apparent* de cette sphère, c'est-à-dire à la différence entre son poids réel et la poussée qu'exerce sur elle le gaz ambiant.

D'après cela, si l'on désigne par M la masse de la grosse boule et par V son volume, par M' la masse de la petite boule et par V' son volume, par a la densité de l'air, l'équation

$$(M - Va)g = (M' - V'a)g \quad (1)$$

exprime que le poids apparent des deux boules est le même dans l'air⁽¹⁾.

On supprime les poussées en faisant le vide autour du baroscope, l'excès de poids de la grosse sphère est :

$$(M - M')g = (V - V')ag \quad (2)$$

Si l'air intérieur a été seulement raréfié ou si l'on introduit un gaz plus léger que l'air, de densité a' , l'excès du poids apparent de la grosse boule devient d'après l'équation (2) :

$$-Va) \cdot (M - V'a')]g = \frac{[M - M' - a'(V - V')]}{ou (a - a')(V - V')g} g = (a - a')(V - V')g \quad (3)$$

Si l'on comprime l'air autour du baroscope ou si l'on remplace l'air par un gaz plus lourd, tel que l'acide carbonique, la grosse boule est soulevée. La force soulevante est :

$$(a' - a)(V - V')g.$$

227. Corrections des pesées effectuées dans l'air. — L'effort exercé par un corps sur le plateau d'une balance n'est pas son poids réel, mais son *poids apparent*. Pour avoir le poids réel, il faut ajouter au poids apparent la valeur de la poussée que le corps éprouve dans l'air. Pour cette raison, les pesées doivent subir une correction s'adressant aux corps soumis à la pesée et aux poids marqués qui n'ont leur valeur nominale que dans le vide.

Désignons par D , δ et a les densités du corps, du métal des poids et de l'air. Le poids réel d'un corps de masse x est xg , $\frac{x}{D}$ étant le volume du corps, le poids de l'air déplacé est $\frac{x}{D}ag$.

L'effort exercé par ce corps sur le plateau de la balance est $xg - \frac{x}{D}ag$.

Le poids réel du poids marqué M est Mg , le poids de l'air déplacé est $\frac{M}{\delta}ag$, $\frac{M}{\delta}$ étant le volume du poids.

L'effort exercé par le poids est donc $Mg - \frac{M}{\delta}ag$.

(1) Si nous ne supposons pas que les bras du fléau sont égaux, on aurait pour l'équation (1), en désignant par l et l' les bras du fléau :

$$(M - Va)gl = (M' - V'a)gl'.$$

Les deux efforts étant égaux dans la double pesée,

$$xg \left(1 - \frac{a}{D}\right) = Mg \left(1 - \frac{a}{\delta}\right).$$

De cette équation on déduit la valeur x que l'on aurait obtenue pour la masse du corps si la pesée avait été faite dans le vide :

$$x = M \frac{1 - \frac{a}{\delta}}{1 - \frac{a}{D}}.$$

Pour un autre corps, $x' = M' \frac{1 - \frac{a}{\delta}}{1 - \frac{a}{D'}}.$

Nous trouverons plus loin (374) : $a = \frac{0,001293}{1 + \alpha t} \cdot \frac{\Pi - \frac{3}{8}f}{76}$

Le rapport des masses de deux corps $\frac{x}{x'}$ ou le rapport de leurs poids est indépendant des poussées exercées sur les poids marqués.

Si les deux corps sont de même densité, le rapport de leurs masses est indépendant des poussées exercées sur les corps et sur les poids.

La correction des pesées est ordinairement très faible pour les corps solides et liquides.

A propos des applications des dilatations, nous tiendrons compte de la poussée de l'air dans la détermination précise des densités par la méthode du flacon.

228. Corps immergés et corps flottants. — Les conséquences du principe d'Archimède établies pour les liquides (159) sont applicables aux gaz.

1° Un corps *plus lourd* que le corps qu'il déplace, *descend* entraîné par son poids apparent ;

2° S'il a le *même poids* que le gaz déplacé, il se maintient en place sans s'élever ni tomber ;

3° S'il est *moins lourd* que le gaz déplacé, la poussée qu'il subit est supérieure à son poids, et il *monte* jusqu'à des couches plus légères, où la poussée et le poids auront des valeurs égales.

Ces différents cas peuvent se rapporter à la fumée, aux nuages et aux aérostats.

AÉROSTATS

On appelle ballons ou *aérostats* des appareils formés d'une enveloppe mince et imperméable contenant un gaz moins dense que l'air et pouvant s'élever dans l'atmosphère.

229. Construction des aérostats. — La première expérience aérostatique, due aux frères Montgolfier, eut lieu en 1783, à Annonay. Leur ballon était gonflé avec de l'air chaud. Une corbeille en fils

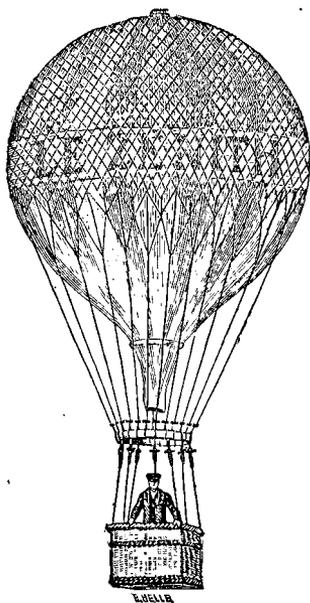


Fig. 181.

métalliques remplie de matières inflammées était fixée au-dessous d'une large ouverture pratiquée à la partie inférieure d'un globe en toile doublée de papier, ayant environ 12 mètres de diamètre. Le ballon se remplissait de gaz chauds plus légers que l'air extérieur et subissait une poussée supérieure à son poids. Après s'être élevé, il s'arrêta dans une couche d'air moins dense où la *poussée était égale à son poids*. La température du gaz intérieur diminua ensuite peu à peu et le ballon redescendit lentement.

Le gonflement se fait actuellement avec de l'hydrogène ou du gaz d'éclairage que l'on introduit par un col allongé qui termine inférieurement le ballon. L'enveloppe est légère, mais résistante; c'est un sac à peu près sphérique de taffetas de soie verni sur les deux faces. Une nacelle en osier est retenue par des cordes attachées à un filet qui enveloppe l'hémisphère supérieur du ballon et répartit uniformément la charge sur toute la surface (fig. 181)⁽¹⁾.

(1) La nacelle doit être assez éloignée du ballon pour que celui-ci en se gonflant et en relevant les cordages n'étouffe pas l'aéronaute. D'ailleurs, en éloignant la nacelle on abaisse le centre de gravité de l'ensemble au-dessous du centre de gravité de l'air déplacé et on augmente la stabilité du système (160).

230. Force ascensionnelle. — Tout aérostat plongé dans l'air est soumis à deux forces : 1° le poids P de l'enveloppe, du gaz intérieur et des agrès; 2° la poussée P' , égale au poids du volume total d'air déplacé.

On appelle *force ascensionnelle* la différence $P' - P$. On peut encore la définir le poids A qui devrait être suspendu au ballon pour le maintenir en équilibre dans l'air; on aurait $A + P = P'$.

La force ascensionnelle s'évalue ordinairement en kilogrammes.

Calcul de la force ascensionnelle au départ. — Désignons par ϖ le poids de l'enveloppe et des agrès, par v leur volume, par V le volume intérieur du ballon, Soit a le poids en kilogrammes du mètre cube d'air, et a' le poids du mètre cube de gaz à la température de l'expérience et à la pression Π .

Le poids d'un volume déterminé de gaz étant, d'après la loi de Mariotte, proportionnel à sa force élastique et le gaz intérieur ayant la pression Π de l'air extérieur, le poids du gaz intérieur sera $Va' \frac{\Pi}{76}$; le poids de l'air qu'il déplace est $Va \frac{\Pi}{76}$; enfin $\frac{va\Pi}{76}$ est le poids de l'air déplacé par l'enveloppe et les agrès; la force ascensionnelle est :

$$A = \frac{Va\Pi}{76} + \frac{va\Pi}{76} - \frac{Va'\Pi}{76} - \varpi.$$

Le ballon est fixé à un dynamomètre qui le retient à terre; on voit ainsi quelle est la force ascensionnelle avant le départ. Elle ne doit être alors que de quelques kilogrammes.

Pour comparer au point de vue de leur force ascensionnelle par mètre cube les gaz employés pour le gonflement, notons qu'un mètre cube d'air à 0° et 76 pèse 1^{kg}3 et un mètre cube d'hydrogène 0^{kg}09, la force ascensionnelle par mètre cube d'hydrogène est donc 1^{kg}21. La force ascensionnelle par mètre cube de gaz d'éclairage n'est que 0^{kg}50 environ.

Malgré cette infériorité du gaz de l'éclairage, on le préfère à l'hydrogène parce qu'on le trouve tout préparé dans les usines à gaz; en outre, les enveloppes se laissent moins facilement traverser par le gaz d'éclairage que par l'hydrogène.

Variations de la force ascensionnelle. — Il convient de ne pas gonfler entièrement le ballon au départ, car la pression extérieure

diminue quand on s'élève et l'expansion du gaz intérieur pourrait distendre les parois au point de les faire éclater⁽¹⁾.

Tant que le ballon *n'est pas complètement gonflé*, le gaz intérieur se dilate et se met en équilibre de pression avec l'air extérieur. Si la pression de l'air extérieur devient deux fois plus petite, le gaz de l'aérostat double de volume : par conséquent, les poids des gaz intérieur et extérieur ne changent pas et la force ascensionnelle, en ne tenant pas compte de la variation du poids de l'enveloppe et des agrès, reste constante.

Lorsque le ballon *est complètement gonflé*, son volume demeure invariable aussi bien que son poids, mais la poussée qu'il subit va en diminuant à mesure qu'il monte, avec la densité de l'air déplacé.

$$A = \frac{V'aH}{76} + \frac{vaH}{76} - \frac{V'a'H'}{76} - \omega$$

H pression extérieure, H' pression intérieure. Il arrive un moment où A est nul, l'aérostat se trouve alors dans une couche de densité constante et est entraîné par le vent dans une direction horizontale.

La force ascensionnelle varie encore avec les conditions extérieures : échauffement du gaz par les rayons solaires, accroissement de poids du ballon s'il traverse un nuage qui le couvre d'eau.

231. Manœuvre de l'aérostat. — Un abaissement de la colonne barométrique apprend que l'on s'élève, un accroissement de la colonne démontre que l'on descend. La hauteur barométrique observée permet en outre de calculer la hauteur à laquelle on se trouve. La manœuvre se fait à l'aide de sacs de sable ou *lest* que les aéronautes emportent avec eux et à l'aide d'une *soupape à ressort* placée à la partie supérieure du ballon. Pour s'élever, on diminue le poids du ballon sans modifier la poussée en jetant du lest; pour descendre, on augmente le poids du ballon en ouvrant la soupape au moyen d'une corde, ce qui laisse échapper du gaz et rentrer de l'air extérieur.

232. Parachute. — Aux flancs du ballon on attachait autrefois un grand parapluie en étoffe résistante appelé *parachute*; de son pourtour partaient des cordes qui s'attachaient à la nacelle. Dans le cas où un accident obligeait à quitter le ballon, on effectuait la descente en parachute. La nacelle tombe d'abord très vite, mais la vitesse devient rapidement uniforme en

(1) En laissant ouvert le prolongement inférieur du ballon, on est à l'abri de la rupture.

raison de la grande résistance que l'air oppose à mesure que la vitesse de chute augmente. Au centre de la toile du parachute, une ouverture circulaire doit livrer un passage régulier à l'air comprimé et préserver des secousses dangereuses que le dégagement latéral de l'air imprimerait à l'appareil.

233. Direction des aérostats. — Avec le lest et la soupape, l'aéronaute ne peut agir que sur la force ascensionnelle; il est donc maître de monter ou de descendre, mais ne peut effectuer aucun mouvement dans le sens horizontal. Le ballon est entraîné par le vent. Le diriger, ce serait le faire manœuvrer dans toute direction comme un navire sur l'eau.

Une solution consiste à imiter la navigation à vapeur, c'est-à-dire à employer une force motrice prenant son point d'appui sur l'air et imprimant à l'aérostat une vitesse supérieure à celle d'un vent contraire dans la direction où il se déplace.

Le problème de la direction préoccupe depuis longtemps les inventeurs. En 1870, dans les essais de correspondance par ballons tentés pendant le siège de Paris, les ballons furent dispersés au gré des courants aériens. En 1872, *Dupuy de Lôme* construisit un premier ballon susceptible de direction. L'expérience des commandants *Renard* et *Krebs*, à Meudon, en 1884, marque un grand progrès. Leur aérostat, de forme allongée, était muni d'une hélice à l'avant et d'un gouvernail à l'arrière; un mouvement très rapide était donné à l'hélice par un moteur électrique, mais l'aérostat ne put acquérir qu'une vitesse propre de 6 mètres par seconde, inférieure à la vitesse moyenne du vent.

234. Ballons-sondes. — On explore actuellement l'atmosphère avec des ballons *non montés*, de petit diamètre, gonflés d'hydrogène et emportant des appareils enregistreurs (baromètres, thermomètres, hygromètres, actinomètres). Ces ballons, appelés *ballons-sondes*, atteignent parfois une hauteur supérieure à 15 000 mètres.

Applications. — 1° Un lingot de platine, de densité 22, est équilibré dans l'air (à 0° et sous la pression 76) par un poids de laiton de 100 grammes. Quelle est la masse du lingot de platine dans le vide? Densité du laiton 8,4.

2° Un lingot de métal fait équilibre dans l'air à un poids de 50 grammes de laiton. Plongé dans l'eau à 0°, dont la densité est 0,99987, il fait équilibre à 42 grammes de laiton. Quelle est la densité du lingot?

3° Quelle est la force ascensionnelle d'un cylindre de bois, plongé dans l'eau, de 20 centimètres de hauteur et de 10 centimètres de diamètre? La densité du bois est 0,6.

4° Le volume d'un aérostat gonflé au gaz d'éclairage est 1000 mètres cubes et sa masse totale, y compris la nacelle, est de 500 kilogrammes. Quelle masse le ballon peut-il soutenir? Densité de l'air, 0,0013, densité du gaz 0,0005.

5° Quel est le plus petit rayon que puisse avoir un aérostat sphérique gonflé d'hy-

drogène pour lui permettre d'enlever son enveloppe? Le poids du mètre carré de l'enveloppe est 250 grammes. Densité de l'air, 0,001293; densité de l'hydrogène 0,001293.0,069.

6° Quel rayon faudrait-il donner à une enveloppe sphérique d'aluminium d'une épaisseur de 3 millimètres et parfaitement vide pour qu'elle pût se soutenir dans l'air à 0° sous la pression 76. La densité de l'aluminium à 0° est 2,6; la densité de l'air à 0° et 76 est 0,001293.

MACHINE PNEUMATIQUE

Une machine pneumatique sert à raréfier un gaz contenu dans un espace clos.

235. Description et fonctionnement. — Elle se compose d'un cylindre creux ou *corps de pompe* C, percé à sa base d'un orifice fermé par une soupape S qui donne accès par un tuyau à un récipient R contenant le gaz à extraire.

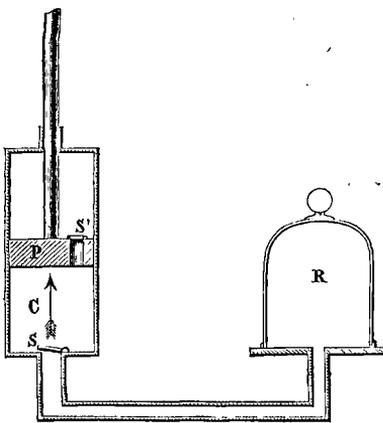


Fig. 182.

Dans le corps de pompe se meut un piston creux fermé par une soupape S' s'ouvrant comme S de bas en haut (fig. 182).

Supposons le piston P au bas de sa course : les soupapes S et S' sont fermées. Lorsqu'on soulève le piston, il laisse au-dessous de lui dans le corps de pompe un espace vide d'air; en vertu de son *expansibilité*, le gaz du récipient soulève la soupape S et pénètre en partie dans le corps de pompe; la soupape S' ne peut s'ouvrir que

de bas en haut et reste fermée par la pression atmosphérique.

Quand le piston est parvenu au bout de sa course, la force élastique du gaz devient la même dans le récipient et dans le corps de pompe et la soupape S, également pressée sur ses deux faces, retombe par son poids.

Si l'on abaisse alors le piston, la soupape S reste fermée et s'oppose au retour dans le récipient du gaz du corps de pompe, le gaz du corps de pompe, isolé du récipient, est comprimé puisque son volume diminue; sa force élastique augmente graduellement au point

de dépasser la pression atmosphérique qui agit au-dessus du piston ; à ce moment la soupape S' se soulève. Tout le gaz du corps de pompe s'échappe si le piston au bas de sa course se trouve en contact intime avec la base du corps de pompe.

On est revenu aux premières conditions de l'expérience, mais la force élastique a diminué dans le récipient, puisque le gaz qui y était primitivement contenu s'est partagé entre le récipient et le corps de pompe.

On lève de nouveau le piston, le vide se fait au-dessous de lui et le gaz du récipient se partage encore entre le récipient et le corps de pompe ; le gaz du corps de pompe isolé comme précédemment quand le piston s'abaisse, s'échappe encore à l'extérieur.

Chaque course descendante de piston extrait un volume de gaz égal au volume du corps de pompe, et la force élastique diminue dans le récipient qui se vide de plus en plus.

236. Force élastique dans le récipient après n coups de piston. — Désignons par R le volume du récipient et du tuyau qui va au corps de pompe et par C la capacité du corps de pompe.

Au début, le piston étant en contact avec le fond du corps de pompe, la masse gazeuse du récipient a un volume R et une force élastique II ; après que le piston a été soulevé, cette masse occupe le volume $R + C$. Conformément à la loi de Mariotte, sa force élastique nouvelle H_1 satisfait à l'équation :

$$RII = (R + C) H_1$$

$$\text{d'où } H_1 = \frac{R}{R + C} II.$$

Le gaz du corps de pompe est expulsé dans l'atmosphère pendant la descente du piston. Quand on soulève de nouveau le piston, la masse gazeuse restée dans le récipient, à la pression II_1 , occupe le volume $R + C$; sa force élastique devient H_2 ,

$$H_2 = \frac{R}{R + C} H_1 = \left(\frac{R}{R + C} \right)^2 II.$$

C'est la pression du gaz du récipient après deux coups de piston.

Après n coups de piston :

$$H_n = \frac{R}{R + C} H_{n-1} = \left(\frac{R}{R + C} \right)^n II.$$

Les forces élastiques du gaz du récipient *décroissent en progression géométrique* quand le nombre des coups de piston croît en progression arithmétique.

Avec une machine parfaite, la force élastique dans le récipient pourrait devenir inférieure à toute quantité donnée, car la fraction $\frac{R}{R+C}$ est inférieure à l'unité et $\left(\frac{R}{R+C}\right)^n$ tend vers zéro si n augmente indéfiniment.

La densité d'un gaz étant, d'après la loi de Mariotte, proportionnelle à sa force élastique,

$$\frac{D_n}{D} = \frac{H_n}{H}, \quad D_n = D \left(\frac{R}{R+C} \right)^n.$$

D représente la densité initiale du gaz du récipient, et D_n sa densité après n coups de piston; celle-ci décroît indéfiniment.

237. Efforts à exercer à chaque coup de piston. — *Effort pendant la montée.* — À mesure que le gaz est raréfié dans le récipient, sa pression sur la face inférieure du piston décroît constamment, tandis que la pression exercée par l'atmosphère sur la face supérieure demeure constante. L'effort de l'opérateur qui soulève le piston, *égal à la différence des pressions sur les deux faces*, va donc en augmentant, et cet effort doit être exercé pendant toute la période ascendante.

Calcul de l'effort pour une surface de un décimètre carré, en supposant la force élastique dans le récipient réduite à $\frac{1}{2}$ centimètre de mercure.

Pression sur la face supérieure du piston (en dynes) :

$$100.76.13,59.981 = 100.1033.981$$

Pression sur la face inférieure :

$$100.0,5.13,59.981 = 100.6,79.981$$

L'effort à exercer sera la différence de ces deux pressions; cette différence est ici voisine de 100 kilogrammes.

Le travail dépensé (en ergs) sera le produit de l'effort (en dynes) par la course du piston (en centimètres).

Pour n'avoir pas à exécuter un effort trop pénible, il faudrait réduire beaucoup la section du corps de pompe; mais par suite de la diminution de la capacité du corps de pompe, un nombre de coups de piston beaucoup plus grand serait nécessaire pour parvenir au même degré de raréfaction.

Effort pendant la descente. — Le piston descend tout seul par la différence de pression sur les deux faces et il n'y a d'effort à exercer que lorsque la force élastique du gaz du corps de pompe est devenue égale à la pression atmosphérique; mais cet effort ne doit être exercé que pour une portion de la course du piston de plus en plus restreinte. Car la force élastique diminuant graduellement dans le récipient, ce sera à un point toujours plus bas de la course du piston que la force élastique du gaz qui est enfermé deviendra égale à la pression atmosphérique.

238. Emploi de deux corps de pompe (fig. 182). — On facilite le jeu de la machine en associant deux corps de pompe qui fonctionnent parallèlement; ces deux corps de pompe en cristal C et C' contiennent chacun un piston et communiquent par leur partie inférieure avec un seul et même conduit O qui s'ouvre au centre d'un plateau en cristal ou *platine* sur lequel est posé le récipient. Les tiges T et T' des deux pistons sont des crémaillères et engrenent avec une roue dentée R qui reçoit un mouvement alternatif d'une manivelle à deux poignées MM'. L'une des extrémités du levier s'élève quand l'autre s'abaisse et l'un des pistons monte quand l'autre descend. Les pressions exercées par l'atmosphère sur les faces supérieures des deux pistons se font équilibre, puisque, par l'intermédiaire des crémaillères, l'une tend à faire tourner la roue dans un sens et l'autre en sens inverse. L'effort à vaincre est égal à la différence des pressions sur les faces inférieures des pistons. Ces pressions ont une différence maximum quand la force élastique du gaz comprimé a atteint la pression atmosphérique; cette différence est elle-même sensible-

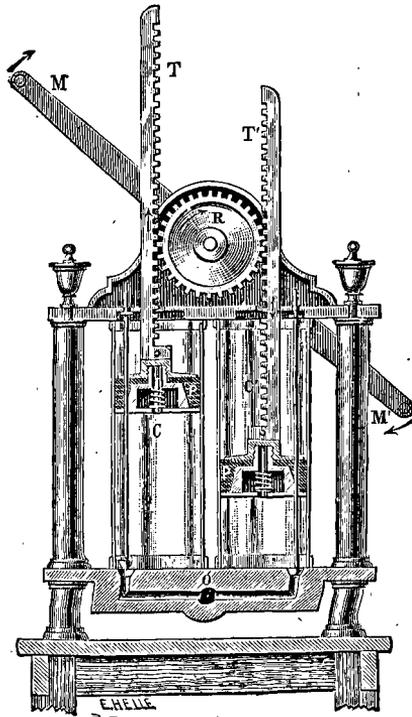


Fig. 182.

ment égale à une atmosphère après un grand nombre de coups de piston, car la force élastique du gaz sous le piston ascendant est à ce moment très faible. Comme la force élastique de l'air comprimé ne devient alors égale à la pression atmosphérique que vers le bas de la course du piston, l'effort maximum ne doit être exercé que sur un parcours très peu étendu et le travail correspon-

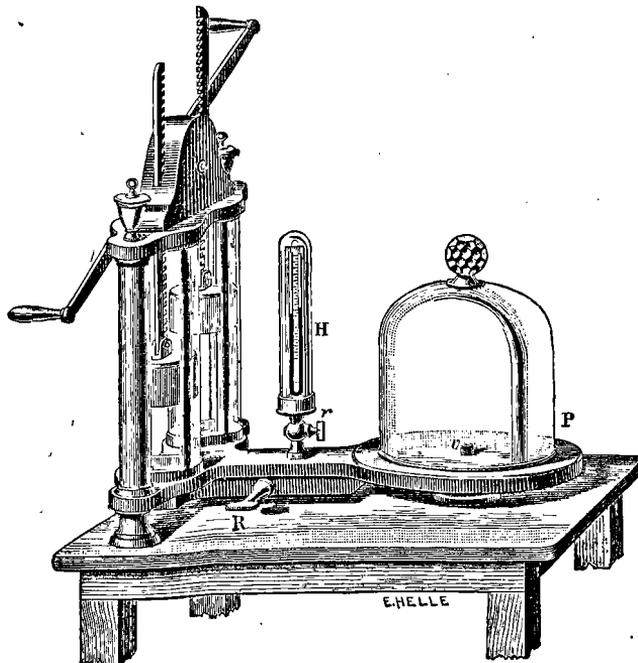


Fig. 183.

dant est peu considérable. Avec un seul corps de pompe, le même effort devait être exercé pendant toute la course ascendante du piston.

La manœuvre de la machine à deux corps de pompe est encore pénible, car outre la différence de pression, l'opérateur doit encore vaincre les frottements des pistons contre les corps de pompe.

Il faut noter qu'avec deux corps de pompe *le vide se fait deux fois, plus vite* qu'avec un seul, car à chacun des mouvements, l'air du récipient passe dans un corps de pompe.

La machine pneumatique à deux corps de pompe est représentée dans son ensemble par la fig. 183 : nous allons décrire ses diverses parties.

239. Description des différents organes. — Piston et soupape. — Le piston est formé d'un noyau en cuivre D offrant une base élargie sur laquelle sont empilées des rondelles de cuir graissées C, recouvertes d'un disque de laiton que l'on serre au moyen d'un écrou E, de façon à établir un contact suffisant entre les parois du piston et celles du corps de pompe (fig. 184).

Le noyau métallique du piston est percé d'un canal qui le traverse entièrement, l'extrémité inférieure de ce canal est une ouverture creusée dans la base du piston et fermée par une soupape que tient une tige verticale; cette tige est guidée par le canal qui traverse le piston et où elle passe librement; un petit ressort formé d'une hélice en cuivre *h* maintient la soupape fermée. Quand le piston descend, la force élastique de l'air comprimé surmonte la très faible résistance du ressort et soulève la soupape.

Le piston est traversé par une tige *t* qui y passe à frottement dur et porte inférieurement une soupape I en forme de tronc de cône. Cette soupape s'engage dans l'orifice creusé en cône du conduit qui mène au récipient. Le piston, en se soulevant, entraîne avec lui la tige, et le bouchon conique abandonne l'ouverture du conduit; mais la tige est presque aussitôt arrêtée par un renflement K fixé à sa partie supérieure et plus large que le trou percé dans le couvercle; elle vient buter contre la base supérieure du corps de pompe et reste immobile; le piston continue à monter en glissant sur la tige. Lorsque le piston, ayant accompli son mouvement ascendant, redescend, la tige le suit encore pendant un instant et appuie le bouchon conique dans l'orifice; le piston continue son mouvement descendant en glissant de nouveau le long de la tige. Ce fonctionnement *automatique* de la soupape assure la communication du récipient et du corps de pompe, alors que la force élastique de l'air du récipient est devenue trop petite pour soulever d'elle-même la soupape du corps de pompe.

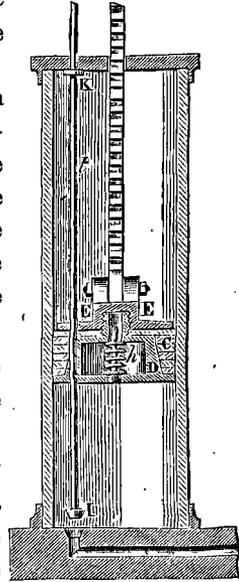


Fig. 184.

Manomètre. — On apprécie le degré de vide à l'aide d'un petit baromètre tronqué à siphon dont la branche fermée n'a que 30^{cm} de

hauteur. Ce baromètre tronqué est logé dans une éprouvette à parois épaisses H qui communique par un robinet r avec le canal aboutissant à la platine (fig. 183 et 185). Le mercure reste appliqué contre le sommet de la branche fermée, qui n'offre pas de chambre barométrique, tant que la force élastique dans le récipient est supérieure à 30^{cm} de mercure; au-dessous de 30^{cm}, le mercure descend dans la branche fermée. La force élastique est mesurée par la différence des niveaux dans les deux branches. La limite d'effet de la machine est atteinte lorsque cette différence devient stationnaire malgré le fonctionnement. Lors du vide, le niveau serait le même dans les deux tubes.

On peut mesurer avec une grande précision la pression du gaz restant dans l'enceinte où l'on fait le vide en le mettant en communication avec un *manomètre barométrique* (217). La pression est indiquée par la différence des hauteurs du mercure dans les deux tubes et cette différence se mesure au cathétomètre.

Platine. — La platine est un plateau circulaire en verre dépoli P, parfaitement dressé, maintenu dans un moule métallique et au centre duquel s'ouvre le canal d'aspiration. On pose sur ce disque la cloche sous laquelle on veut faire le vide. On enduit d'un peu de suif les bords de la cloche pour obtenir une fermeture hermétique. Quand le vide est fait, la pression atmosphérique maintient fortement les bords appliqués sur la platine. Au centre de la platine se trouve aussi une tubulure terminée par un pas de vis v sur lequel on peut visser divers appareils (fig. 183 et 185).

Clef. — Quand la limite d'effet est atteinte, pour conserver le degré

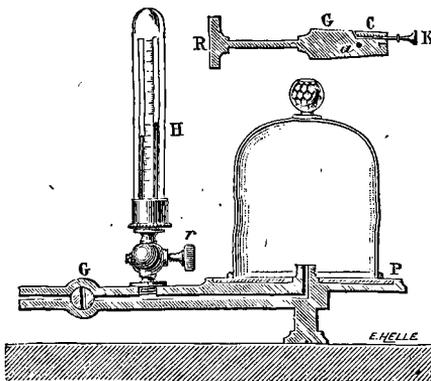


Fig. 185.

de vide obtenu, il faut interrompre toute communication entre le récipient et le corps de pompe afin d'éviter les rentrées d'air. Il importe aussi de rendre l'air dans les corps de pompe. Enfin, on ne pourrait enlever le récipient de dessus la platine, quand les expériences sont terminées, sans laisser rentrer l'air; car, tant que le vide est maintenu, le récipient est

appliqué sur la platine par une très forte pression (1033.981 dynes par centimètre carré de la *section* du récipient).

Un robinet ou *clef* R, disposé sur le conduit d'aspiration (fig. 185), entre les corps de pompe et le manomètre, permet : 1° de mettre les corps de pompe en communication avec le récipient pour faire le vide ; 2° d'intercepter cette communication et de rendre l'air dans les corps de pompe quand le vide est fait ; 3° de rendre l'air dans le récipient.

Le robinet est percé transversalement d'un conduit *a* qui le traverse de part en part ; la jonction du récipient et des corps de pompe est établie quand ce conduit est placé dans l'axe du canal d'aspiration. Outre ce conduit, il y en a un autre plus étroit *cd*, percé parallèlement à l'axe du robinet ; ce conduit s'ouvre d'une part sur la petite base du robinet en *d* et de l'autre se recourbe rectangulairement et vient déboucher en *c* dans le plan transversal qui contient le conduit principal et à 90° de celui-ci. Une petite fiche métallique K est logée en *d* dans ce conduit

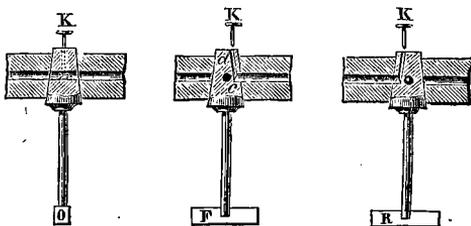


Fig. 186.

(fig. 186). En tirant cette fiche pour une position convenable du robinet, on fait rentrer l'air soit dans les corps de pompe, soit dans le récipient. Des lettres O, F, R, gravées sur la tête permettent à l'opérateur de distinguer la position du robinet.

O, communication ouverte entre les récipients et les corps de pompe ;
F, communication fermée et rentrée de l'air dans les corps de pompe ;
R, rentrée de l'air extérieur dans le récipient.

240. Limite du vide. — Théoriquement le vide complet est irréalisable, car la force élastique après *n* coups de piston n'est jamais nulle, si grand que soit *n* (236). Diverses défauts de la construction limitent encore le degré du vide. En particulier, quand le piston arrive au bas de sa course, il n'y a jamais contact absolu entre le piston et le corps de pompe ; les petits intervalles qui les séparent forment un *espace nuisible* dont l'existence est la cause principale qui limite pratiquement la raréfaction.

Influence de l'espace nuisible. — Quand le piston est arrivé au bas de sa course, l'espace nuisible, de volume *u*, renferme du gaz à

la pression atmosphérique H , car pendant la descente la soupape du piston s'est fermée par son poids lorsque la force élastique dans l'espace nuisible n'a plus dépassé la pression atmosphérique. A mesure que le piston remonte, ce gaz occupe graduellement tout le volume C du corps de pompe et sa force élastique finale est donnée, d'après la loi de Mariotte, par l'équation :

$$uH = fC, \text{ d'où } f = \frac{u}{C} H.$$

Le gaz du récipient ne passe dans le corps de pompe que si sa force élastique est supérieure à $\frac{uH}{C}$. C'est une limite qui ne peut être atteinte, si parfaite que soit la machine dans ses autres parties ; cette limite sera d'autant plus petite que $\frac{u}{C}$ sera plus petit.

Si le gaz de l'espace nuisible, au lieu d'avoir la pression H quand le piston est au bas de sa course, n'exerçait qu'une pression plus petite H' , la limite du vide serait reculée, puisque la force élastique finale f' serait donnée par l'équation $uH' = f'C$; ce résultat est obtenu en raréfiant le gaz de l'espace nuisible avec une deuxième machine pneumatique ; la pression H' peut alors devenir égale à $\frac{uH}{C}$, et $f' = \frac{u^2}{C^2} H$, si les deux corps de pompe sont identiques.

Babinet a fait servir l'un des corps de pompe à raréfier le gaz de l'espace nuisible de l'autre ; cela revient à associer les deux corps de pompe *en série* au lieu de les associer *parallèlement*, comme ils le sont dans le fonctionnement ordinaire.

On pourrait encore corriger l'imperfection due à l'espace nuisible en faisant le vide au-dessus du piston avec une seconde machine ; on remplacerait ainsi la pression extérieure par une pression $\frac{uH}{C}$ et l'air de l'espace nuisible dont la force élastique est H soulèverait la soupape ; l'air qui resterait dans l'espace nuisible n'aurait plus qu'une force élastique $\frac{uH}{C}$; en soulevant le piston, elle deviendrait $\frac{u^2}{C^2} H$, car $f_1 C = u \frac{uH}{C}$ et le gaz du récipient passerait dans le corps de pompe tant que sa force élastique serait supérieure à $\frac{u^2}{C^2} H$.

POMPE A MERCURE

La pompe à mercure, en utilisant le vide barométrique, permet de pousser très loin la raréfaction d'un gaz.

241. Description. — Elle se compose d'un tube vertical fixe T servant de tube barométrique, évasé à sa partie supérieure en un ballon A de $\frac{1}{2}$ litre de capacité qui forme la chambre barométrique

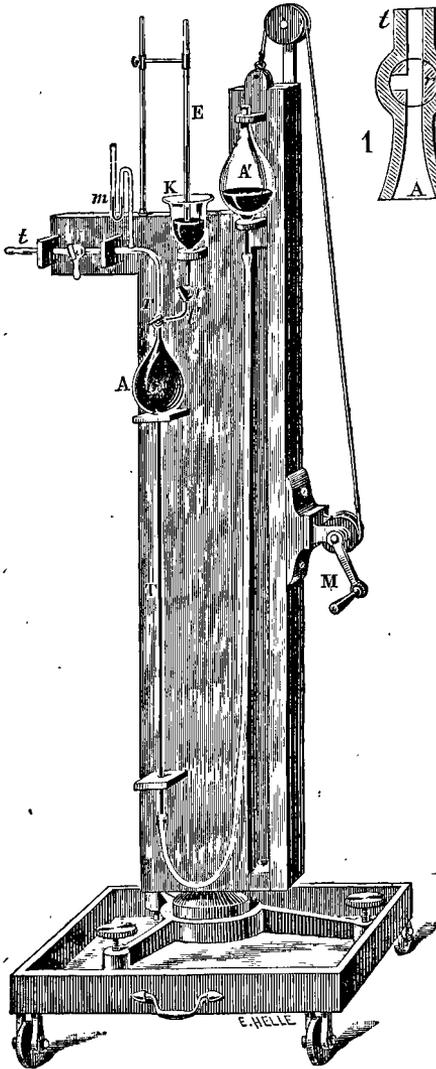


Fig. 187.

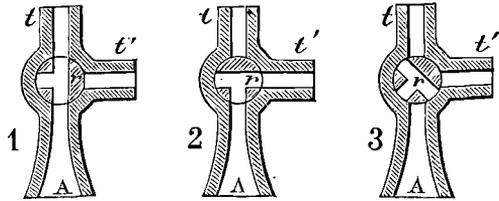


Fig. 188.

et communique par son extrémité supérieure avec le récipient où l'on veut faire le vide. A l'extrémité inférieure du tube T est fixé un tube en caoutchouc non vulcanisé qui se continue par un réservoir A' formant la cuvette du baromètre et pouvant être élevé au-dessus du ballon A (fig. 187).

En r, à la partie supérieure du baromètre, se trouve un robinet à trois voies, d'où partent deux tubes. Un premier tube t mène au récipient et présente sur son trajet un appareil desséchant et un manomètre m; un deuxième tube latéral t' est muni d'un robinet ordinaire r' et terminé par un entonnoir K plein de mercure.

Le robinet r permet d'établir la communication de la chambre barométrique, soit avec le récipient (position 1), soit avec le tube latéral (position 2) (fig. 188.)

243. Manœuvre de la pompe. — On commence par chasser l'air qui se trouve dans la chambre barométrique. A cet effet, le robi-

net étant placé dans la position (2), on soulève la cuvette A' de façon à l'amener à un niveau supérieur à celui du robinet r'.

En vertu des lois de l'équilibre des liquides dans des vases communicants, le mercure monte dans le tube T, remplit la chambre barométrique et refoule l'air; l'air s'arrête en r' qui est fermé. En ouvrant doucement le robinet r', l'air s'échappe à travers le mercure de l'entonnoir et l'appareil se remplit de mercure jusqu'en r'. Quand le mercure de la cuvette A' communique avec celui de l'entonnoir K, l'air du ballon A a disparu. On ferme alors r' et on fait descendre la cuvette A' à la partie inférieure de l'appareil; le mercure descend dans le tube T et laisse le vide barométrique dans la partie supérieure et dans le renflement A. Si l'on place alors le robinet r dans la position 1, une partie du gaz du récipient pénètre en A en traversant l'appareil desséchant qui maintient bien sec le mercure de la pompe; le mercure est déprimé dans le baromètre.

Si l'on rétablit le robinet r dans la position 2 et qu'on soulève A', le gaz extrait du récipient et logé dans la chambre barométrique est comprimé puis expulsé quand on ouvre r'. Il peut être recueilli dans une éprouvette E renversée sur le mercure de l'entonnoir K.

243. Degré du vide obtenu. — Dans la pompe à mercure, le piston est remplacé par une masse de mercure qui se déplace et il n'y a pas d'espace nuisible. En répétant les opérations, on fait passer à chaque descente de la cuvette une certaine quantité du gaz du récipient dans la chambre barométrique et on arrive à faire dans le récipient un vide presque parfait. Le manomètre *m* n'indique plus qu'une différence d'une très petite fraction de millimètre entre les deux branches.

La manœuvre est longue et l'on n'emploie cette pompe que pour faire le vide dans de petits espaces; pour des espaces un peu grands, on se sert d'abord de la machine ordinaire et on termine avec la pompe à mercure.

Elle ne renferme que des robinets de verre que l'on fabrique avec une grande perfection; ces robinets, pour fermer hermétiquement, n'ont besoin que d'être légèrement graissés.

On construit actuellement des pompes à mercure sans robinets dans lesquelles la raréfaction peut être poussée encore plus loin.

244. Trompes. — Quand un liquide s'écoule dans un tube qui est en communication par un orifice latéral avec un réservoir contenant

un gaz, il se produit un entraînement mécanique du gaz. C'est sur ce fait qu'est basée la construction des trompes.

Habituellement un courant liquide amené en A sort par un ajutage *m*, pénètre dans un ajutage *n* et s'écoule en B (fig. 189). Le réservoir R se vide automatiquement et progressivement.

Dans la trompe de Sprengel qui est utilisée dans la fabrication des lampes à incandescence, l'entraînement du gaz est produit par un écoulement de mercure. On arrive sans difficulté à un degré de vide inférieur à $\frac{1}{1\ 000\ 000}$ d'atmosphère.

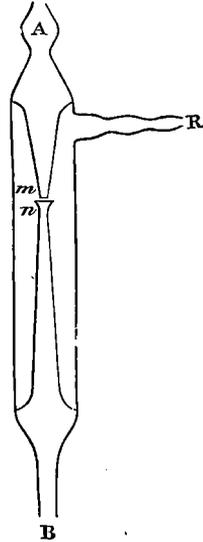


Fig. 189.

MACHINE DE COMPRESSION

Une machine de compression sert à comprimer un gaz dans un récipient de manière à y accroître considérablement la pression. Une machine pneumatique dans laquelle le jeu des soupapes est renversé fonctionne comme machine de compression.

245. Fonctionnement d'une machine de compression. — Un corps de pompe communique avec un récipient R par un conduit que ferme à son entrée une soupape *r* s'ouvrant de haut en bas (fig. 190). Dans le corps de pompe se meut un piston P percé d'une ouverture que ferme une soupape *a* s'ouvrant également de haut en bas.

Le piston étant au bas de sa course, soulevons-le; le vide se fait dans le corps de pompe; la soupape *r* reste fermée par la pression de l'air du récipient, tandis que l'air extérieur ouvre la soupape *a* et remplit le corps de pompe.

Lorsque le piston est arrivé au haut de sa course, abaissons-le; l'air du corps de pompe diminue de volume, sa force élastique va en croissant et maintient fermée la soupape *a*, mais à un certain moment elle devient assez forte pour ouvrir la soupape *r*; l'air du corps de pompe est alors refoulé dans le récipient.

On soulève de nouveau le piston, il se remplit encore d'air à la

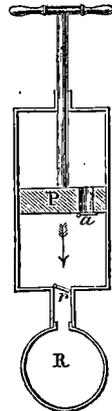


Fig. 190.

pression atmosphérique et cet air est à son tour refoulé dans le récipient quand on fait descendre le piston.

L'effort de l'opérateur va en croissant, car la résistance opposée à l'ouverture de la soupape par l'air condensé croît avec sa force élastique, et comme cette résistance est proportionnelle à la surface du piston, celle-ci doit être petite.

246. Force élastique dans le récipient après n coups de piston. — Désignons par R le volume du récipient et par C la capacité du corps de pompe; le piston étant au haut de sa course, l'air contenu dans le corps de pompe occupe un volume C à la pression atmosphérique H . Par la descente du piston, cet air a été refoulé dans le récipient, y a pris un volume R et une force élastique f donnée par l'équation :

$$CH = Rf,$$

$$\text{d'où } f = \frac{C}{R} H.$$

Le gaz introduit dans le récipient se mélange au gaz qui s'y trouve déjà à la pression H_0 , et ajoute sa force élastique f à la force élastique H_0 (d'après la loi du mélange des gaz). La force élastique totale est H_1 .

$$H_1 = H_0 + f = H_0 + \frac{C}{R} H.$$

Un second coup de piston fait pénétrer dans le récipient la même quantité d'air que le premier; la force élastique y devient :

$$H_2 = H_1 + f = H_0 + 2 \frac{C}{R} H.$$

$$\text{Après } n \text{ coups de piston, } H_n = H_0 + n \frac{C}{R} H.$$

La pression dans le récipient augmente donc en progression arithmétique. On juge du degré de condensation de l'air du récipient à l'aide d'un manomètre à air comprimé ou d'un manomètre métallique.

247. Limite de la compression par l'espace nuisible. — Soit u le volume de l'espace nuisible, ou de l'espace compris entre la base inférieure du piston et le fond du corps de pompe lorsque le piston est au bas de sa course, l'existence de cet espace limite la compression.

La force élastique de l'air du corps de pompe est égale à H au haut de la course du piston; réduit au volume u de l'espace nuisible, cet air atteindra une force élastique maximum φ donnée par l'équation :

$$CH = u\varphi$$

$$\text{d'où } \varphi = \frac{C}{u} H.$$

Lorsque l'air du récipient a acquis cette force élastique, la soupape r ne s'ouvre plus, on est arrivé à la limite de la compression. Si l'espace nuisible est la vingtième partie du corps de pompe, la pression de l'air que l'on peut accumuler dans le réservoir ne peut dépasser 20 atmosphères.

248. Pompe de compression. — Sous sa forme habituelle, la machine de compression ou *pompe de compression* se compose d'un corps de pompe en laiton long et étroit dans lequel se meut un piston plein P . A la base du corps de pompe deux tubulures offrent suivant leur axe deux soupapes de sens contraires. Ces soupapes sont de petits troncs de cônes qui s'engagent dans des ouvertures de même forme contre lesquelles de petits ressorts à boudin les maintiennent appliqués. La soupape d'aspiration a s'ouvre de l'extérieur vers l'intérieur, la soupape de refoulement r s'ouvre de l'intérieur à l'extérieur; r ferme la tubulure qui aboutit au récipient R où le gaz doit être comprimé (fig. 191).

Dans la course ascendante du piston, a s'ouvre et r se ferme; dans la course descendante, a reste fermé et r s'ouvre lorsque la force élastique du gaz com-

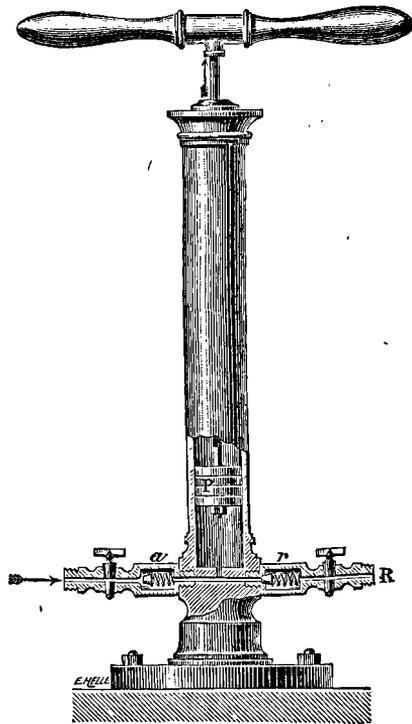


Fig. 191.

primé dans le corps de pompe devient supérieure à la force élastique du gaz déjà comprimé dans le récipient.

Cette pompe peut aussi être employée à faire le vide; dans ce cas, a communique avec le récipient et r avec l'atmosphère; la manœuvre est pénible puisqu'il n'y a qu'un corps de pompe; aussi diminue-t-on l'effort nécessaire pour soulever le piston en ne donnant au piston qu'une petite section.

249. Applications de l'air raréfié et de l'air comprimé. —

La machine pneumatique est appliquée industriellement dans un grand nombre de circonstances; par exemple, pour s'assurer que des tuyaux de conduite d'eau ou de gaz ne présentent pas de fuites; on voit si l'on peut y faire le vide.

L'air comprimé est aussi fréquemment utilisé; nous citerons, parmi ses applications : 1° la distribution simultanée de l'heure dans toute une ville par les *horloges pneumatiques* : un flux d'air partant toutes les minutes d'un récipient à air comprimé et parcourant une canalisation fait avancer l'aiguille du cadran de chacune des horloges de quartier; 2° le transport des dépêches par le *télégraphe pneumatique* : les dépêches sont enfermées dans une boîte cylindrique et poussées dans un tube en fonte par l'air comprimé; 3° l'arrêt des trains de chemin de fer par le *frein Westinghouse* : de l'air comprimé provenant d'une machine de compression, mise en mouvement par la locomotive, est lancé à un moment donné sur des pistons qui commandent les freins des wagons; 4° le fonctionnement des machines perforatrices employées pour le *perçement des tunnels* dans des galeries souterraines où l'emploi des machines à vapeur rendrait l'air irrespirable; 5° les *cloches à plongeur*, les *scaphandres* pour les travaux effectués sous l'eau.

Applications. — 1° Le récipient d'une machine pneumatique a une capacité de 4 litres et la pression de l'air y est de 76 centimètres. Le corps de pompe ayant une capacité de $1/2$ litre, quelle sera la pression dans le récipient après 4 coups de piston?

2° Quel est le rapport des capacités du récipient et du corps de pompe d'une machine pneumatique si, à la fin du quatrième coup de piston, la densité du gaz du récipient est devenue les $\frac{81}{256}$ de la densité primitive?

3° Le manomètre d'une machine pneumatique marque 5 centimètres après 10 coups de piston; la pression primitive du récipient était 75. Que marquera le manomètre après 20 coups de piston?

4° On place un corps sous la cloche d'une machine pneumatique. La pression initiale est 76 centimètres, elle devient 19 après 2 coups de piston : quel est le volume v du corps? Volume de la cloche 2 litres, volume du corps de pompe 1 litre.

5° Le récipient d'une machine pneumatique a une capacité de 3'79 et le corps de

pompe de 0^h58. Après combien de coups de piston la densité de l'air du récipient sera-t-elle réduite à $\frac{1}{10}$ de sa valeur primitive?

6° La capacité du corps de pompe d'une pompe de compression est de 80 centimètres cubes; dans le récipient dont la capacité est de 1 litre, la pression initiale est égale à 1 atmosphère. Combien faudra-t-il de coups de piston pour amener la pression de l'air du récipient à 5 atmosphères?

7° Le volume du récipient d'une pompe de compression étant 10 fois celui du corps de pompe, après combien de coups de piston la pression de l'air du récipient sera-t-elle double de la pression extérieure?

SIPHON

250. Un *siphon* est un tube recourbé à deux branches inégales qui sert à transvaser un liquide d'un vase dans un autre (sans pratiquer aucune ouverture dans leurs parois).

Fonctionnement. — Pour transvaser un liquide d'un vase V dans un vase V' où le niveau est plus bas, on remplit de liquide un tube recourbé AED et, les deux extrémités étant bouchées, on retourne le tube en plongeant la courte branche dans le vase où le niveau est le plus élevé. En débouchant les deux extrémités, on voit le liquide s'écouler par l'orifice D, tant que cet orifice est au-dessous du niveau du liquide dans le vase supérieur. L'écoulement est d'autant plus rapide que la différence de hauteur des niveaux dans les deux vases est plus grande (fig. 192).

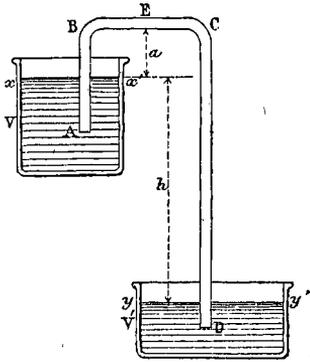


Fig. 192.

Explication. — Afin de comprendre comment a lieu l'écoulement, supposons pour un instant que, dans ce tube recourbé dont les deux branches ont séparément une hauteur inférieure à la hauteur atmosphérique H (1033^{cm} pour l'eau, 76^{cm} pour le mercure), une cloison transversale E intercepte la communication en un point quelconque de la partie horizontale. Les deux parties ABE, DCE étant comme précédemment remplies séparément, le liquide restera suspendu de chaque côté, au lieu de tomber par son poids; la pression de gauche à droite sur la cloison E sera $H - a$, c'est une pression qui est exercée sur le sommet d'un baromètre tronqué dont la hauteur n'est que a ; la pression de droite à gauche sera $H - (a + h)$. La différence

est dirigée de gauche à droite; mesurée en hauteur de liquide, elle est h . En désignant par S la section du tube en E , par Dg le poids spécifique du liquide, la différence de pression en dynes est $ShDg$.

Si l'on vient à percer la cloison, l'écoulement a lieu de gauche à droite en vertu de cette différence de pression, la tranche E est remplacée par une autre, et le liquide du vase V passe en V' . La vitesse d'écoulement diminue avec la différence de hauteur h .

Si les deux branches du siphon ont une hauteur supérieure à H : après avoir retourné le siphon en plongeant ses extrémités dans chacun des vases, la colonne liquide se sépare au sommet du siphon et une colonne de hauteur H reste suspendue au-dessus de chacun des deux vases.

Le siphon peut fonctionner avec une courte branche de longueur inférieure à H et une longue branche de longueur supérieure à H . La grande branche ne reste pas remplie de liquide; il se fait un vide au-dessus de la colonne II qui reste soulevée et le liquide du vase supérieur passe à travers ce vide pour rejoindre la colonne H .

Amorcement du siphon. — Pour amorcer le siphon, c'est-à-dire pour le remplir du liquide, on plonge la courte branche dans le liquide à transvaser et on aspire à l'autre extrémité. La pression atmosphérique pousse le liquide dans le tube et l'écoulement a lieu. Si le liquide est corrosif, l'aspiration se fait par un tube latéral en plongeant la courte branche dans le liquide et en bouchant la longue branche (fig. 193).

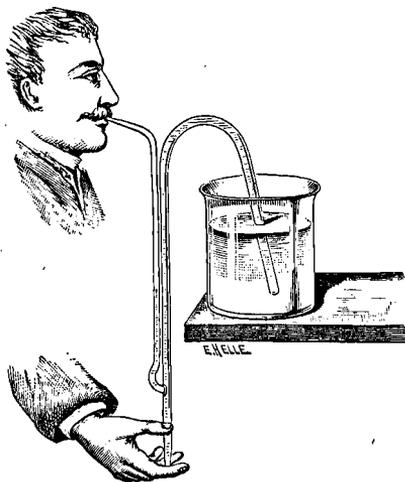


Fig. 193.

Quand la section du siphon est petite, il n'est pas nécessaire que la longue branche soit plongée dans le liquide du vase inférieur, mais si le siphon a une forte section, il doit avoir ses deux orifices submergés, sans quoi l'air diviserait la colonne en montant dans la grande branche.

Un siphon qui contient de l'air peut continuer à fonctionner si cet

air peut se loger dans la partie supérieure sans couper la colonne liquide. Si le liquide transvasé est de l'eau aérée, l'air se dégage à mesure que l'eau s'élève dans le siphon puisque la pression supportée va en diminuant. Cet air accumulé établirait une discontinuité entre les deux colonnes et le siphon finirait par s'arrêter. On aspire cet air au moyen d'une pompe disposée à la partie supérieure du siphon.

251. Calcul complet de la pression. — Nous avons calculé la pression sur la cloison E en supposant que la pression extérieure était la même en A et en D ; le calcul doit être modifié si le milieu ambiant a une densité telle qu'on ne puisse négliger la variation de sa pression de A en D (fig. 192).

Supposons le siphon et les deux vases V et V' contenant un liquide de densité d et plongés dans un fluide de densité δ (fig. 194), la pression en E de gauche à droite sera :

$$P + l\delta g - adg$$

et de droite à gauche :

$$P + (l + h)\delta g - (a + h)dg.$$

P est la pression atmosphérique sur la surface du liquide de densité δ ; la différence des deux pressions sera :

$$h(d - \delta)g.$$

$$e \{ h g d - \delta \}$$

$d > \delta$, le liquide du siphon s'écoule du vase supérieur vers l'inférieur.

$d = \delta$, il n'y a pas d'écoulement.

$d < \delta$, l'écoulement a lieu en sens inverse.

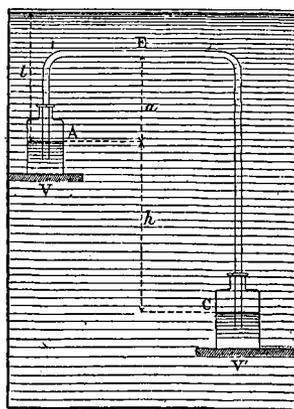


Fig. 194.

252. Fontaine intermittente. — L'appareil qui porte ce nom présente des intermittences qui se produisent par le fonctionnement même de l'appareil. Il se compose d'un ballon en verre B fermé à sa partie supérieure par un bouchon de verre R usé à l'émeri et garni à sa partie inférieure d'une monture en cuivre C munie de trois ou quatre tubulures étroites. La monture est traversée en son centre par un tube droit ouvert à ses deux extrémités. Ce tube droit s'élève jus-

l. 4-102) l - H (0+2)

qu'au haut du ballon et se termine inférieurement dans une cuvette en cuivre A percée en son centre d'un petit orifice (fig. 195).

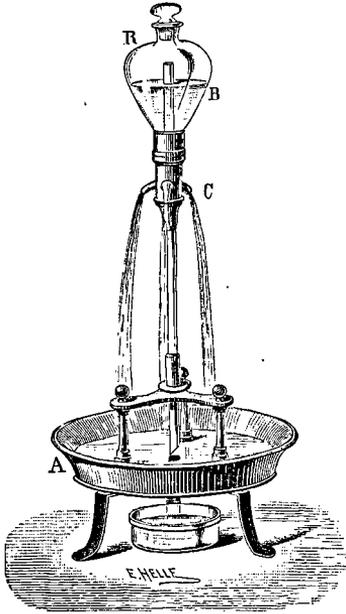


Fig. 195.

Fonctionnement. — On remplit le ballon d'eau aux trois quarts et on le bouche. L'air intérieur communiquant avec l'air extérieur, l'eau s'écoule par son poids par les ajutages en C, l'eau écoulée s'accumule peu à peu dans la cuvette et couvre l'extrémité inférieure du tube si l'orifice débite moins d'eau que la somme des orifices des ajutages. Lorsque la communication n'a plus lieu entre l'air extérieur et la partie supérieure du globe, l'air augmenté de volume dans le ballon par suite de l'écoulement, sa force élastique intérieure diminue et l'écoulement s'arrête quand la pression extérieure fait équilibre à la force élastique intérieure accrue de la pression du li-

quide. A ce moment l'eau s'est élevée dans le tube droit jusqu'à une hauteur égale à la hauteur du liquide dans le ballon au-dessus des orifices C. Mais peu à peu la cuvette se vide, le liquide dégage de nouveau l'extrémité inférieure du tube, l'air rentre alors dans l'intérieur du globe, et l'écoulement recommence, pour cesser encore après quelques instants, pour la même raison que précédemment.

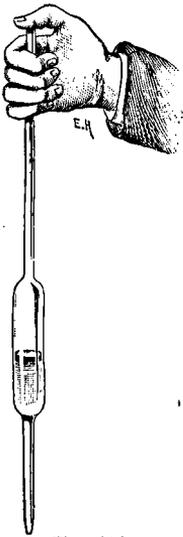


Fig. 196.

253. Pipette. — C'est un tube droit en verre ou en métal, ouvert aux deux bouts, effilé à la partie inférieure. On plonge la pipette dans un liquide par son extrémité effilée, l'orifice supérieur étant ouvert. Le liquide pénètre à l'intérieur et atteint le niveau extérieur. On ferme avec le doigt l'orifice supérieur et on sort l'appareil du liquide. Il s'écoule un peu de liquide, mais comme l'extrémité inférieure est trop petite pour que l'air puisse y péné-

trer en divisant la colonne, l'air intérieur diminue de force élastique puisque son volume augmente, et l'écoulement cesse quand la pression extérieure fait équilibre à la pression du gaz intérieur accrue de la pression du liquide resté (fig. 196).

Si l'on rend l'air en soulevant le doigt, l'écoulement se reproduit ; si l'on rebouche l'orifice avec le doigt, quelques gouttes s'écoulent encore, mais l'air intérieur se raréfie de nouveau et l'écoulement s'arrête.

(254. **Loi de Torricelli sur l'écoulement des liquides.** — Quand un liquide pesant s'écoule à travers un orifice percé dans une paroi très mince, la vitesse à la sortie de l'orifice est la même que celle que prendrait un corps pesant tombant dans le vide de la hauteur h qui sépare l'orifice de la surface libre. Cette vitesse est donc représentée par $v = \sqrt{2gh}$ (99).

Avec le siphon, la vitesse d'écoulement n'est pas constante, car la différence des niveaux dans les deux vases varie si ces deux vases V et V' n'ont pas la même section, ce qui est le cas ordinaire (fig. 192).

On obtient un écoulement constant avec le vase de Mariotte.

255. Vase de Mariotte (fig. 197). — Un vase de Mariotte consiste en un vase rempli de liquide et dont le bouchon est traversé par un tube t ouvert aux deux bouts. Sur une paroi latérale du vase est pratiquée une ouverture A qui permet l'écoulement du liquide. Le flacon étant d'abord entièrement plein ainsi que le tube, si on ouvre A , le liquide s'écoule puisque la pression intérieure en A est supérieure à la pression atmosphérique de toute la hauteur Aa , le tube t se vide. La vitesse d'écoulement diminue très vite. Lorsque le tube est vidé, si nous considérons le plan CD qui passe par l'extrémité inférieure du tube t , la pression est en tous les points de ce plan égale à la pression atmosphérique qui s'exerce par le tube vidé ; l'écoulement se produit encore, car la pression en A exercée de l'intérieur est égale à la pression atmosphérique accrue de la pression de la colonne liquide de hauteur h comprise entre le plan CD et l'orifice.

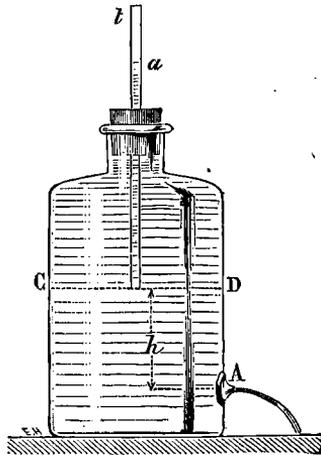


Fig. 197.

Tant qu'il reste du liquide dans le vase au-dessus de CD , la vitesse d'écoulement *reste constante* et égale à $\sqrt{2gh}$. La vitesse décroît dès que, par suite de l'écoulement, le niveau du liquide est descendu au-dessous de CD .

On fait varier la vitesse d'écoulement en enfonçant plus ou moins le tube t .

POMPES

Les pompes sont des appareils destinés à élever l'eau.

256. Pompe aspirante. — *Description.* — Une pompe aspirante se compose d'un gros tuyau cylindrique ou *corps de pompe* C dans lequel se meut un *piston* P percé dans son épaisseur d'une ouverture que ferme une soupape *b* s'ouvrant de bas en haut; le corps de pompe communique par un *tuyau d'aspiration* *t* avec le *puisard* R, réservoir contenant l'eau à élever.

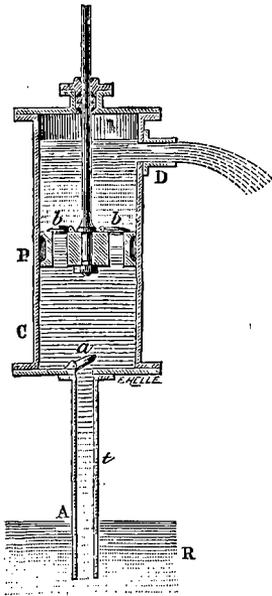


Fig. 198.

A l'orifice du tuyau d'aspiration une soupape *a* s'ouvre aussi de bas en haut; un tuyau de *déversement* D, horizontal ou recourbé vers le bas est disposé latéralement à la partie supérieure du corps de pompe (fig. 198).

Fonctionnement. Amorçement. — Supposons la pompe remplie d'air et le piston au bas de sa course; l'eau est au même niveau dans le tuyau et dans le puisard. On soulève le piston, le vide se fait au-dessous de lui, la soupape *b*⁽¹⁾ reste fermée par son poids et par la pression atmosphérique, tandis que la soupape *a* s'ouvre, pressée par l'air du tuyau d'aspiration qui est à la pression atmosphérique et qui se répand dans

l'espace vide que le piston a laissé au-dessous de lui. Par suite de son accroissement de volume, cet air n'a plus qu'une

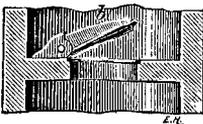


Fig. 199.

(1) Une des soupapes les plus fréquemment employées dans les pompes est la *soupape à clapet* (fig. 199). Le clapet *b* est une plaque de laiton fixée à charnière sur le bord de l'orifice. La soupape et les bords sont ajustés de manière à former un joint hermétique.

force élastique inférieure à celle de l'atmosphère, d'où l'ascension dans le tuyau d'une colonne liquide dont la pression s'ajoute à celle de l'air intérieur dilaté pour faire équilibre à la pression extérieure qui s'exerce en A sur la surface libre de l'eau du puisard.

Quand le piston est arrivé au haut de sa course, la soupape d'aspiration *a* se ferme par son poids. Si on abaisse le piston, l'eau reste suspendue dans le tuyau d'aspiration au point où elle a été soulevée; l'air du corps de pompe est comprimé, prend bientôt une force élastique supérieure à la force élastique de l'atmosphère, ouvre la soupape *b* et s'échappe au dehors.

Le piston étant revenu au bas de sa course, on le soulève de nouveau, l'eau continue à monter dans le tuyau d'aspiration, et par la descente du piston, une nouvelle quantité d'air s'échappe.

Après un certain nombre de coups de piston, *si la hauteur du tuyau d'aspiration ne dépasse pas la hauteur barométrique (189) en hauteur d'eau (10^m33)*, l'eau atteindra la soupape *a*, l'ouvrira et pénétrera dans le corps de pompe. La pompe sera alors *amorcée*.

Fonctionnement régulier. — Pendant la descente du piston, l'air qui reste dans le corps de pompe est comprimé et s'échappe. *Si la face inférieure du piston soulevé ne se trouve pas à plus de 10^m33 du niveau du puisard*, l'eau suit le piston dans son mouvement ascendant en formant une colonne continue puisqu'il n'y a plus d'air dans le corps de pompe et remplit toute la capacité du corps de pompe.

A la descente du piston, la soupape *b* est immédiatement soulevée et l'eau du corps de pompe passe au-dessus du piston. Dans le mouvement ascendant qui suit, cette eau est élevée et versée au dehors par le tuyau D, la soupape *b* restant fermée. A partir du moment où l'eau a rempli le corps de pompe, on déverse au dehors, chaque fois que le piston est soulevé, un volume d'eau égal au volume du corps de pompe.

257. Espace nuisible. — Théoriquement, une pompe aspirante parfaitement construite ne peut être amorcée si le tuyau d'aspiration a plus de 10^m33. A cause des imperfections de la construction, on ne place pas en général la soupape d'aspiration à plus de 7 à 8 mètres au-dessus du puisard. Le piston, au bas de sa course, n'est pas en contact avec la partie inférieure du corps de pompe et laisse au-dessous de lui un espace nuisible de volume *u*, rempli d'air à la pression atmosphérique H; cet air, quand le piston est soulevé, prend dans le

corps de pompe de capacité C , une force élastique $\frac{uH}{C}$; la hauteur que l'eau peut atteindre dans le tuyau d'aspiration est diminuée de $\frac{uH}{C}$ (II est exprimé en colonne d'eau). La hauteur limite du tuyau d'aspiration est donc $H \left(1 - \frac{u}{C}\right)$.

A cet air de l'espace nuisible s'ajoutent souvent des rentrées d'air au-dessous du piston pendant sa montée et un dégagement de l'air dissous dans l'eau aérée du puisard.

258. Effort nécessaire pour manœuvrer le piston. — Nous allons le calculer à partir du moment où la pompe est amorcée.

Effort pendant la descente. — Pour faire descendre le piston, il suffit de vaincre les frottements, il n'y a pas d'effort à exercer résultant des pressions, car il y a pendant la descente communication entre le liquide au-dessus et au-dessous du piston.

Effort pendant la montée. — Désignons par h la distance de l'orifice du déversoir à la face supérieure du piston, par h' la distance de la face inférieure du piston au niveau dans le puisard, par H la hauteur de la colonne d'eau qui fait équilibre à la pression atmosphérique du moment, par dg le poids de l'unité de volume de l'eau en dynes, par S la section du piston en centimètres carrés : la face supérieure du piston supporte de haut en bas une pression (en dynes) :

$$SHdg + Shdg$$

la face inférieure supporte de bas en haut une pression :

$$SIIIdg - Sh'dg.$$

L'effort pendant la montée sera la différence :

$$S(h + h') dg$$

$$h + h' = L - e.$$

L distance verticale de l'orifice de déversement au niveau du puisard, e épaisseur du piston.

En négligeant la faible épaisseur du piston, l'effort qu'il faut exercer pour soulever le piston est donc égal au poids $SLdg$, poids d'une colonne d'eau ayant pour base la section du piston et pour hauteur la distance de l'orifice du tuyau de déversement au niveau dans le puisard.

Soit λ le parcours du piston, l'effort étant indépendant de la position du piston, le travail dépensé dans la montée est $\lambda SLdg$. Le poids de l'eau qui s'écoule à chaque coup de piston étant $S\lambda dg$, le travail est celui qu'il faudrait dépenser pour élever directement l'eau à la hauteur L . Par suite des frottements, le travail exigé par le fonctionnement de la pompe est supérieur au

travail qui serait dépensé en élevant l'eau directement. L'avantage de l'emploi de la pompe résulte de sa manœuvre qui a lieu par l'intermédiaire d'un levier (fig. 200).

Il convient de remarquer que lorsque l'eau a été élevée au-dessus du piston, c'est la force ascensionnelle du piston qui élève l'eau, et la hauteur qu'elle peut atteindre ne dépend que de l'effort appliqué au piston, quelle que soit l'élévation du tuyau de déversement.

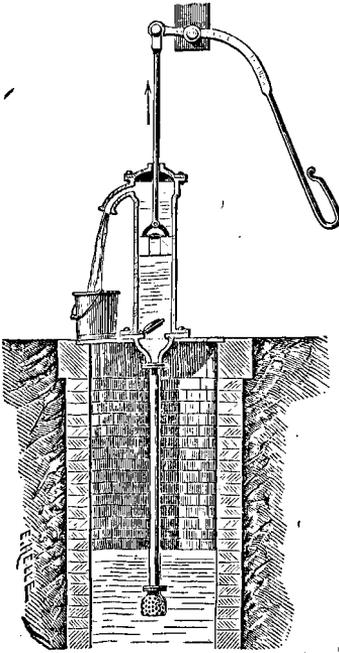


Fig. 200.

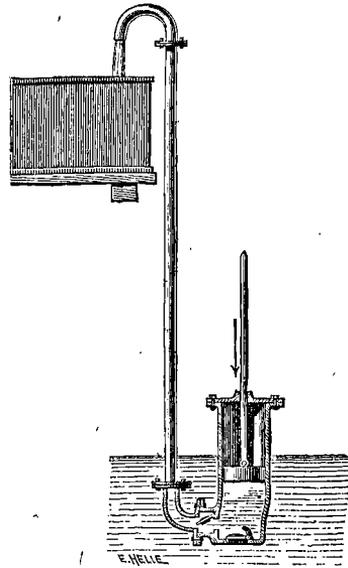


Fig. 201.

259. Pompe foulante. — Le tuyau d'aspiration est supprimé. La pompe foulante simple se compose d'un corps de pompe plongeant *directement* dans le réservoir et muni à sa partie inférieure d'une soupape s'ouvrant de bas en haut. Le tuyau par lequel l'eau est expulsé prend naissance latéralement au bas du corps de pompe et présente à son entrée dans le corps de pompe une soupape s'ouvrant de l'intérieur à l'extérieur (fig. 201).

Un piston *plein* se meut à frottement dans le corps de pompe. Quand le piston s'élève, le vide se fait au-dessous de lui, et la pression atmosphérique pousse l'eau dans le corps de pompe. Si le piston s'arrête, la soupape inférieure retombe en vertu de son poids. Dans la descente

du piston, la soupape latérale s'ouvre, et l'eau est refoulée dans le tuyau d'ascension ; elle s'y élève à une certaine hauteur.

Après un nombre suffisant de coups de piston, l'eau se déverse à la partie supérieure. C'est la pression du piston qui fait directement monter l'eau ; plus la hauteur du tuyau de refoulement sera grande, plus l'effort nécessaire pour abaisser le piston sera grand, à cause de la pression exercée par l'eau soulevée. La pompe débite, à chaque coup de piston, un volume d'eau égal au volume du corps de pompe. Rien ne limite la hauteur du tuyau de refoulement et par conséquent la hauteur à laquelle on peut élever l'eau.

260. Effort nécessaire pour manœuvrer le piston. — *Effort pendant la montée.* — Si l'on ne tient pas compte des frottements, il n'y a guère d'effort extérieur à vaincre pour faire monter le piston, car les pressions sur les deux faces sont sensiblement les mêmes.

Effort pendant la descente. — Soit h la hauteur de l'eau dans le tuyau latéral au-dessus du niveau dans le réservoir, et H la hauteur de la colonne atmosphérique.

La soupape latérale étant ouverte, la pression supportée par la face inférieure du piston qui descend est $SHdg + Shdg$: elle s'exerce de bas en haut. La pression supportée par la face supérieure est $SHdg$: elle s'exerce de haut en bas.

La pression résultante est égale à la différence ; c'est $Shdg$: elle s'exerce de bas en haut ; c'est le poids d'une colonne d'eau ayant pour base la section du piston et pour hauteur la hauteur de l'eau dans le tuyau de refoulement au-dessus de la surface du réservoir. $Shdg$ est exprimé en dynes.

Si λ est la course du piston, le travail dépensé pour un coup de piston est $Shdg\lambda$; λ étant mesuré en centimètres, le travail sera exprimé en ergs. $S\lambda d$ est la masse de l'eau qui s'écoule par le tuyau latéral. Le travail est le même que si cette eau était portée directement à la hauteur h . Quand on dispose d'une force suffisante, la pompe foulante peut élever l'eau à une hauteur quelconque.

261. Pompe à incendie. — La pompe à incendie ordinaire consiste en deux pompes foulantes accouplées ; dont les tuyaux latéraux très courts débouchent dans un réservoir clos R rempli d'air. La pompe est immergée dans un récipient portatif que l'on remplit d'eau ; cette eau est refoulée par la pompe dans le réservoir, d'où elle est poussée dans la direction voulue à l'aide d'un tuyau T qui plonge jusqu'au fond du réservoir. Dans la pompe foulante décrite plus haut, l'écoulement ne se produit que pendant la descente du piston. Ici, l'addition d'un réservoir d'air au tuyau de refoulement rend le jet continu. En effet, l'eau s'élève dans le réservoir, commence par

comprimer l'air qui s'y trouve ; après quelques coups de piston, elle sort par le tuyau, et, comme l'air presse continuellement, l'écoulement est continu.

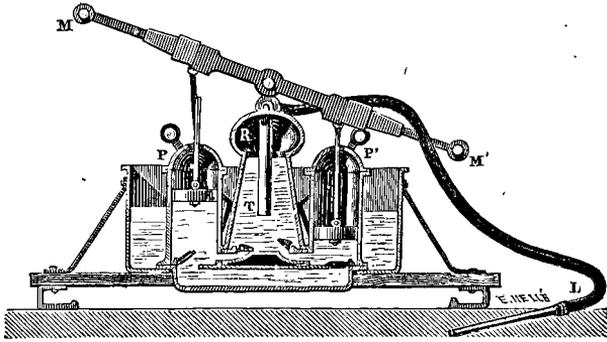


Fig. 202.

Les tiges des deux pistons sont articulées à un double levier MM' qui reçoit un mouvement alternatif (fig. 202).

262. Pompe aspirante et foulante. — Elle se compose d'un corps de pompe dans lequel se meut un piston *plein*. Un tuyau d'aspiration plongeant dans le puisard est ajusté à la partie inférieure du corps de pompe dont il est séparé par une soupape s'ouvrant de bas en haut comme dans une pompe aspirante. A la base du corps de pompe prend naissance latéralement un tuyau de refoulement qui porte à sa partie inférieure une soupape s'ouvrant de l'intérieur à l'extérieur comme dans une pompe foulante (fig. 203).

Quand on soulève le piston, la soupape de refoulement se ferme, la soupape d'aspiration s'ouvre, et l'air qui est compris entre elle et le niveau de l'eau dans le tuyau d'aspiration se répand en partie dans le vide formé au-dessous du piston. En faisant jouer suffisamment le piston, on élève l'eau au-dessus de la soupape d'aspiration

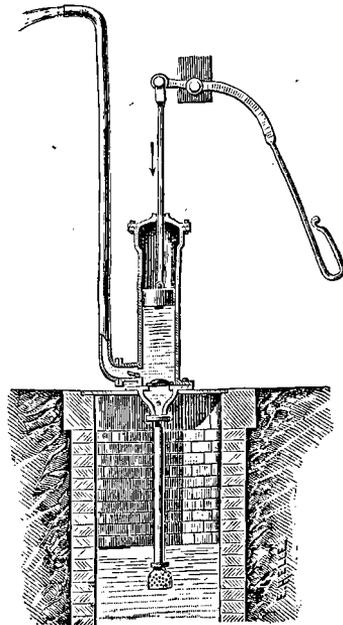


Fig. 203.

pourvu que cette soupape ne soit pas à plus de 10^m33 au-dessus du niveau dans le réservoir.

Une fois la pompe amorcée, l'eau est poussée pendant la descente du piston dans le tuyau de refoulement. On fait monter l'eau assez haut dans ce tuyau pour qu'elle s'écoule par l'orifice de déversement. A chaque descente du piston, il sort un volume d'eau égal au volume du corps de pompe.

263. Presse hydraulique. — Elle se compose d'une pompe aspirante et foulante qui extrait l'eau d'un réservoir inférieur R et la pousse par un tuyau dans un cylindre à parois résistantes A où se meut un large piston métallique terminé supérieurement par un pla-

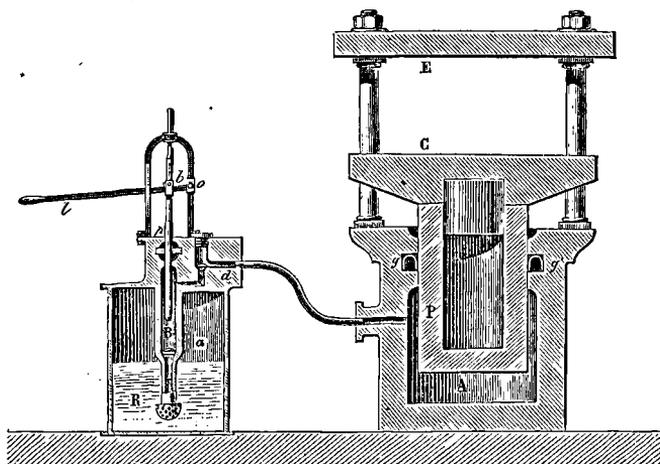


Fig. 204.

teau C. Le large piston P étant descendu par son poids jusqu'au fond du cylindre, on fait fonctionner la pompe : la pression exercée par le piston *p* se transmet à la face inférieure du piston P, et l'oblige à s'élever ; les matières à presser sont comprimées entre le plateau C et une plateforme fixe E (fig. 204). Quand la compression a été exercée, on fait écouler l'eau par un robinet à vis placé sur le trajet du tube, le piston P redescend au bas du cylindre. Pour éviter que la pression ne dépasse la résistance des parois, l'appareil est muni d'une *soupape de sûreté* conique réglée par un poids et s'ouvrant lorsque la pression a atteint une limite fixée à l'avance.

264. Calcul de la pression. — La tige du piston *p* de la pompe est mise en mouvement par un levier mobile autour d'un point fixe *o* voisin de la

tige b . Supposons que la distance du point de l'application de l'effort au point fixe o soit égale à 10 fois la distance ob du point fixe au point d'articulation de la tige. D'après la théorie du levier (61), un effort de 30 kilos appliqué en l équivaut à un effort de 30.10 ou 300 kilos en b .

D'autre part, en vertu du principe de la transmission des pressions (143), si la section S du large piston est 100 fois plus grande que la section s du piston de la pompe, une pression de 300 kilos exercée sur la tête du petit piston produira une pression de 300.100 ou 30 000 kilos sur le large piston. On pourra donc, avec un effort de 30 kilos en l exercer une pression de 30 000 kilos en C .

Les chemins λ et λ' parcourus par le petit et le grand piston sont en raison inverse de leurs sections, car le volume d'eau qui pénètre dans le large cylindre est égal au volume déplacé par le petit piston :

$$s\lambda = S\lambda', \text{ d'où } \frac{\lambda'}{\lambda} = \frac{s}{S}$$

Dans notre exemple, le grand piston ne s'élèvera que de $\frac{1}{10}$ de millimètre pour une course de 1 centimètre du petit. Si p est la pression exercée par unité de surface, ps sera la pression exercée par le petit piston et pS la pression reçue par le grand piston. Le travail dépensé est $ps\lambda$, le travail produit est $pS\lambda'$; ces travaux sont égaux (conformément au principe de la conservation de l'énergie), puisque $s\lambda = S\lambda'$. La presse hydraulique permet d'exercer de grands efforts, mais le déplacement est extrêmement lent. *On perd en vitesse ce que l'on gagne en force.*

265. Cuir embouti (fig. 205). — Pour empêcher l'eau de s'échapper entre les parois du cylindre et celles du piston, on entoure le piston d'un cuir embouti, anneau de cuir flexible, ayant la forme d'une *gouttière renversée*, qui est logé dans une rainure circulaire gg' pratiquée dans la paroi du cylindre (fig. 204). Sous l'influence de la pression, l'eau s'infiltré entre le cylindre et le piston, mais elle pénètre dans la concavité du cuir embouti et le force à s'appliquer d'une part contre le piston et d'autre part contre les parois du cylindre. La fermeture est d'autant plus hermétique que la pression est plus considérable.

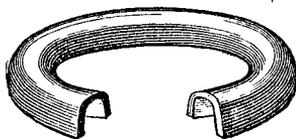


Fig. 205.

Avant que l'ingénieur anglais Bramah eût trouvé en 1796 ce moyen d'éviter les fuites, la presse hydraulique n'avait pu être utilisée.

On complète la presse hydraulique en ajoutant : un *manomètre* pour mesurer la pression obtenue ; une *vis latérale* qu'on engage lentement dans le liquide du cylindre A pour augmenter la pression exercée par le piston C .

266. Applications. — Les applications industrielles de la presse hydraulique sont nombreuses; citons le foulage des draps, la compression des graines oléagineuses pour la fabrication des huiles, l'extraction du jus de la pulpe de betterave, la compression de substances encombrantes telles que le coton et le foin, l'essai des chaudières des machines à vapeur, etc.

Applications. — 1° Quelle est la plus grande hauteur h à laquelle un liquide de densité 1,5 pourra être porté par un siphon quand le mercure se tient à 76 centimètres? Poids spécifique du mercure, 13,6.

2° Le tuyau d'aspiration d'une pompe a 4 mètres de haut et 3 centimètres carrés de section; la section du corps de pompe est égale à 200 centimètres carrés. Quelle doit être la hauteur h du corps de pompe pour que, au premier coup de piston, l'eau s'élève au sommet du tuyau d'aspiration? Pression extérieure, 75.

3° Le corps de pompe d'une pompe aspirante a une longueur de 40 centimètres, sa base inférieure est à 6 mètres de la surface du réservoir, la section du tuyau est $\frac{1}{5}$ de celle de la section S du corps de pompe. Quelle sera la hauteur de l'eau dans le tuyau après qu'on aura soulevé le piston? Hauteur barométrique, 76.

4° Une pipette cylindrique de 25 centimètres de hauteur est plongée de 20 centimètres dans le mercure. On la ferme avec le doigt à sa partie supérieure et on la sort du mercure. Quelle hauteur occupe le liquide qui reste quand l'écoulement s'arrête? Hauteur barométrique, 75.

5° Le large piston d'une presse hydraulique a un rayon de 5 centimètres: quel doit être le rayon du piston de la pompe pour qu'un effort de 20 kilogrammes exercé sur le long bras du levier transmette une pression de 2000 kilogrammes? Le rapport des bras du levier de la pompe est 4.

HISTORIQUE

267. Notions de mécanique. — Le principe de l'inertie et le principe de l'indépendance des effets des forces sont dus à *Galilée*. *Newton* a énoncé ces deux principes sous leur forme actuelle et y a ajouté le principe de l'égalité de l'action et de la réaction. *Descartes* est le premier qui a présenté une définition précise du travail mécanique; enfin, c'est à *Leibnitz* que nous sommes redevables de la notion de la force vive et du théorème de l'équivalence de la force vive et du travail.

Pesanteur. — Les premières recherches sur le centre de gravité sont dues à *Archimède* qui détermina géométriquement dans plusieurs cas particuliers la position du centre de gravité d'un corps homogène.

Les lois de la chute des corps ont été découvertes par *Galilée*. En faisant tomber du haut de la cathédrale de Pise plusieurs sphères de volumes égaux, mais de poids différents, il vit que toutes arrivaient au sol à peu près en même temps; il attribuait à la résistance de l'air les retards observés dans le mouvement des moins pesants. Pour trouver la loi des espaces, il substitua à la chute directe suivant la verticale la chute très ralentie le long d'un plan incliné.

Les lois du pendule sont également dues à *Galilée*. Il découvrit la loi de l'isochronisme en comptant les oscillations d'une lampe suspendue à la voûte d'une église. Il vit que le nombre des oscillations restait constant malgré le décroissement graduel des arcs décrits.

La détermination de l'intensité de la pesanteur par le pendule a été proposée par *Huygens*, elle fut appliquée pour la première fois par *Borda* à Paris. C'est aussi à *Huygens* qu'on attribue l'idée d'appliquer le pendule à la régulation des horloges.

Képler avait reconnu l'attraction des planètes par le soleil; *Newton* formula la loi de la gravitation universelle et démontra que la pesanteur en est un cas particulier, en faisant voir que l'attraction exercée par la Terre sur la Lune était précisément égale à la pesanteur terrestre, réduite suivant la loi de la raison inverse du carré des distances.

Hydrostatique. — Le principe de la transmission des pressions fut pour la première fois nettement exprimé par *Pascal* qui donna en même temps l'idée de la construction de la presse hydraulique.

Notre démonstration expérimentale de la loi de la pression exercée par un liquide pesant sur le fond du vase qui le renferme (130) est celle de *Pascal*. Cette loi et la loi des pressions latérales avaient été énoncées antérieurement par *Stevin*, savant flamand auquel on doit aussi la règle du parallélogramme des forces.

Archimède avait trouvé la valeur de la poussée exercée de bas en haut sur un corps plongé dans un liquide et en avait déduit plusieurs conséquences,

Mécanique des gaz. — *Galilée* démontra la pesanteur de l'air en 1638 en pesant un ballon de verre d'abord plein d'air pris dans l'atmosphère, puis d'air comprimé; il observa une augmentation de poids.

En 1643, *Torricelli* réalisa l'expérience du baromètre et en donna l'explication confirmée par *Pascal* en 1646 dans l'expérience du Puy-de-Dôme. Ce fut la découverte de la pression atmosphérique.

La loi de la compressibilité des gaz, énoncée à peu près en même temps par *Boyle* en Angleterre et par *Mariotte* en France (1670) est encore démontrée dans les cours à l'aide des dispositions expérimentales imaginées par *Mariotte*. *Despretz* montra en 1827 que les gaz facilement liquéfiables se compriment plus que l'air. Les expériences de *Regnault* (1845) et d'*Amagat* (1880) ont fait voir dans quelles limites la loi de *Mariotte* pouvait être regardée comme rigoureuse.

Vers 1650, *Otto de Guëricke*, bourgmestre de Magdebourg, invente la première machine pneumatique. Pesant un grand ballon successivement plein d'air et vide, il confirme la pesanteur de l'air déjà établie par *Galilée*. Il exécute l'expérience des hémisphères de Magdebourg.

Boyle fit mouvoir le piston à l'aide d'une crémaillère et d'une roue dentée. *Denis Papin* emploie deux corps de pompe au lieu d'un, imagine la platine, substitue aux robinets des machines antérieures des soupapes qui s'ouvrent et se ferment alternativement par le jeu même de l'appareil.

Une pompe foulante est décrite dans la pneumatique d'*Héron* d'Alexandrie; on y trouve aussi le siphon, la pipette. La théorie du siphon est due à *Pascal*.

CHALEUR

268. Sensation de chaleur et de froid. — Auprès d'un foyer allumé, nous ressentons une impression spéciale dite *sensation de chaleur*. Le contact d'un morceau de glace tenu à la main détermine une sensation opposée, celle de *froid*. La cause de ces impressions est appelée **chaleur**. Un corps qui s'échauffe est dit *gagner de la chaleur*, un corps qui se refroidit en *perd*.

Les sensations de chaleur et de froid résultent de l'action exercée par les corps chauds ou froids sur des nerfs qui ont leurs terminaisons à la surface de toute la peau; les nerfs sensibles à la chaleur ne sont pas localisés dans un organe spécial comme les nerfs sensibles au son et à la lumière.

Ces sensations sont relatives et ne permettent pas d'apprécier sûrement l'état calorifique d'un corps. Ainsi, une des deux mains plongée dans la glace éprouve une sensation de froid, l'autre main, plongée dans de l'eau chaude éprouve une sensation de chaleur. En plongeant ensuite les deux mains dans un même vase contenant de l'eau tiède, la main qui sort de la glace éprouve une sensation de chaleur et celle qui sort de l'eau chaude une sensation de froid; la même eau produit ainsi deux sensations différentes.

269. Effets de la chaleur. — Placés dans les conditions où nous ressentons ces diverses impressions, les différents corps subissent divers changements dans leurs propriétés :

- 1° Changements de dimensions ou de volume (dilatations);
- 2° Changements d'état, d'agrégation (fusion, vaporisation);
- 3° Changements chimiques et électriques (séparation des éléments d'un corps composé (courants thermo-électriques).

Nous passerons en revue ces diverses modifications.

DILATATIONS PAR LA CHALEUR

Le plus souvent, un corps se dilate quand il s'échauffe, et se contracte quand il se refroidit. Diverses expériences démontrent ces variations de volumes pour les corps solides, liquides et gazeux.

270. Solides. — Une sphère métallique B, suspendue par une chaîne de fer passe librement, mais sans jeu, à travers un anneau de même métal A (fig. 206). Vient-on à chauffer la sphère sans chauffer

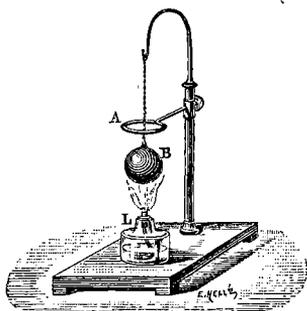


Fig. 206.

l'anneau, l'accroissement de son volume ne lui permet plus de traverser l'anneau. Par le refroidissement, elle reprend son volume initial. Si l'on chauffe à la fois et également l'anneau et la sphère, le diamètre intérieur de l'anneau reste égal au diamètre de la sphère. Cela montre que l'anneau s'est dilaté comme s'il était plein.

Dans un corps homogène et *non cristallisé*, uniformément chauffé, chaque unité de longueur s'accroît de la même quantité, quelle que soit sa direction, et le corps chaud reste géométriquement *semblable* au corps froid.

Lorsque l'une des dimensions est très grande par rapport aux autres, comme dans une tige métallique, l'allongement dans le sens de la longueur est très grand par rapport aux allongements des autres dimensions.

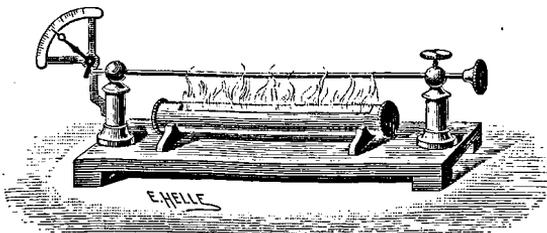


Fig. 207.

Le **pyromètre à cadran** fait voir l'allongement d'une barre métallique par la chaleur. C'est une tige métallique fixée invariablement à

l'aide d'une vis à l'une de ses extrémités; à l'autre extrémité elle traverse librement une ouverture pratiquée dans une colonne et s'appuie contre la courte branche d'un levier coudé, mobile autour d'un axe fixe. Le long bras du levier se meut sur un cadran (fig. 207). Vient-on à chauffer la tige, l'extrémité libre se déplace et pousse la courte branche OB du levier. Les angles BOB' , COC' sont égaux, et si $OC = nOB$, l'arc parcouru par l'extrémité C sera n fois plus long que l'arc décrit par l'extrémité B. Cette disposition amplifie l'allongement de la tige et le rend très apparent (fig. 208). Les deux bras OC' , OB' reprennent leurs positions primitives quand la tige s'est refroidie.

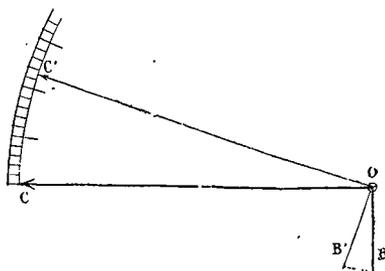


Fig. 208.

271. Liquides. — Un ballon surmonté d'un long tube étroit contient de l'alcool coloré jusqu'au niveau h . On plonge brusquement le ballon dans un vase plein d'eau chaude (fig. 209); le niveau du liquide baisse d'abord jusqu'en a . Puis le liquide remonte en h et bientôt au-dessus du niveau primitif en b .

Par la première action de la chaleur l'enveloppe s'est dilatée (comme si elle était pleine), et le liquide est descendu dans le vase dont la capacité a augmenté; mais le liquide se dilate à son tour et, de ce qu'il dépasse notablement le niveau initial, on doit conclure qu'il se dilate plus que l'enveloppe. Par suite de l'accroissement de capacité du ballon, la *dilatation apparente* du liquide est inférieure à sa dilatation réelle ou *absolue*.

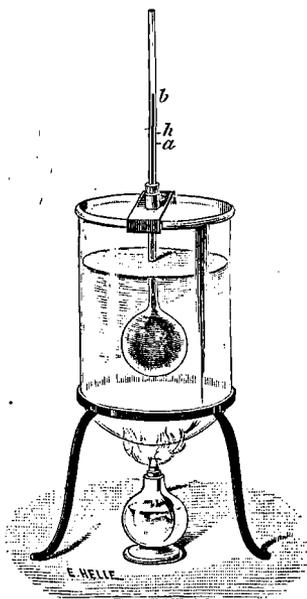


Fig. 209.

dilatation des gaz sous pression constante
272. Gaz. — Les gaz se dilatent beaucoup plus que les solides et les liquides.

Soit un ballon B auquel est adapté un tube recourbé horizontal; ce ballon contient un gaz séparé de l'air extérieur par un petit index liquide I' (fig. 210). Il suffit de chauffer le ballon avec les mains pour que l'index soit chassé très loin en I. Par le refroidissement, l'index revient à sa position primitive. Le gaz s'est dilaté *sans changement de force élastique*, puisqu'il est resté soumis à la pression atmosphérique.

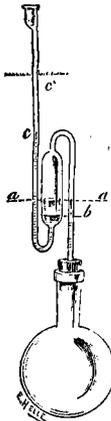
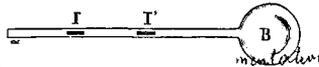


Fig. 211.



Prenons en second lieu un ballon prolongé par un tube deux fois recourbé (fig. 211), versons dans ce tube du mercure qui s'élève au même niveau *a* dans les deux branches. Si nous chauffons le ballon, le mercure s'abaisse en *b* et s'élève en *c*. On peut alors, en versant du mercure jusqu'en *c'* dans la branche ouverte, maintenir le niveau constant en *a* et empêcher le gaz de se dilater. La pression du gaz chauffé est égale à la pression atmosphérique accrue de la pression de la colonne *ac'*. La chaleur a donc eu ici pour *effet unique d'augmenter la force élastique du gaz*.

La chaleur produit habituellement à la fois les deux effets : accroissements de volume et de force élastique.

MESURE DES TEMPÉRATURES

273. La température est une qualité des corps chauds. On ne peut pas la définir d'une manière absolue, mais seulement d'une manière relative. A cet effet, mettons en présence deux corps inégalement chauds : le plus chaud se refroidit et se contracte pendant que le plus froid s'échauffe et se dilate. Après quelque temps, ils cessent de se modifier : l'équilibre est établi, les volumes restent stationnaires; les deux corps sont dits à la **même température**. Si l'on vient à chauffer l'un d'eux, on dit que sa température *s'élève*; il envoie de la chaleur aux corps voisins; si on le refroidit, on dit que sa température *s'abaisse*, il reçoit alors de la chaleur des corps plus chauds

que lui. C'est de leur *différence de température* que dépendent les échanges de chaleur entre deux corps.

274. Thermomètres. — A température constante, le volume d'un corps reste invariable. Son volume augmente lorsque sa température s'élève et diminue si sa température s'abaisse. Le volume reprend la même valeur pour une même température si le corps ne subit aucune altération. *Les divers volumes que prend un même corps à des températures différentes peuvent servir à caractériser ces températures* (1). Ce corps n'indiquera pas seulement sa propre température, mais aussi celle des corps qui l'environnent, s'ils sont en équilibre calorifique avec lui; ce sera un *thermomètre*.

Des corps *identiques*, c'est-à-dire de même nature, de même forme et de mêmes dimensions fourniront évidemment les mêmes indications; à un même volume de chacun d'eux correspondra une même température. *L'identité absolue des thermomètres n'est pas nécessaire*; par une graduation faite à l'aide de deux températures fixes, la masse du thermomètre devient indifférente et l'identité de nature de la substance des thermomètres est suffisante.

275. Principe de la construction d'un thermomètre centigrade. — La *température de fusion* d'une substance est une **température fixe**. Un corps plongé dans une substance en fusion conserve en effet un volume invariable tant que dure la fusion.

La *température d'ébullition* d'un liquide sous une pression déterminée est également *fixe*. Un corps plongé dans la vapeur d'un liquide en ébullition y conserve un volume invariable tant que dure l'ébullition.

Cela posé, on choisit pour thermomètre un corps dont le volume peut être apprécié à chaque instant. On le plonge dans la *glace fondante* où son volume devient invariable, égal à V_0 et caractérise le *degré zéro du thermomètre*.

On plonge ensuite ce même corps dans la *vapeur d'eau bouillante* sous la pression de 76 centimètres, son volume devient invariable, égal à V_{100} et caractérise le *degré cent du thermomètre*. Entre ces volumes V_0 et V_{100} se trouvent des volumes intermédiaires que l'on

(1) Un grand nombre de phénomènes varient quand le corps qui en est le siège nous semble devenir plus froid ou plus chaud (volume, pression, indice de réfraction, résistance électrique, etc.) et pourraient servir à classer les températures.

peut considérer comme caractérisant des températures intermédiaires entre les températures 0° et 100° .

On appelle élévation de température de 1° un accroissement de température correspondant à une variation de volume $\frac{V_{100} - V_0}{100}$ du thermomètre. Si la variation de volume du thermomètre dans une enceinte est $V - V_0 = t \frac{V_{100} - V_0}{100}$, on convient de dire que la température de l'enceinte est t . On admet ainsi que la variation de température est proportionnelle à la variation de volume.

Entre les deux points fixes 0 et 100, entre lesquels le volume croît de $100 \frac{V_{100} - V_0}{100}$, il y a 100 intervalles de 1° . On appelle échelle centigrade l'échelle de températures où la dilatation d'un corps entre les deux températures de la glace fondante et de l'eau bouillante est divisée en 100 parties égales à chacune desquelles correspond une variation de température de 1° .

276. Comparabilité des thermomètres de même substance.

— Les indications d'un thermomètre ainsi construit sont indépendantes de sa masse et de sa forme.

En effet, d'après l'équation qui définit la température t ,

$$V - V_0 = t \frac{V_{100} - V_0}{100},$$

choisir une substance comme substance thermométrique, c'est admettre que sa dilatation $V - V_0$ ou δ est proportionnelle à la température, c'est poser $\delta = at$; la constante a se détermine par une observation de la dilatation entre la glace fondante et la vapeur d'eau bouillante : $V_{100} - V_0 = \Delta = a \cdot 100$.

$$a = \frac{\Delta}{100} \text{ est la capacité du degré.}$$

Soient deux thermomètres construits avec une même substance, mais présentant des volumes différents à 0° .

L'un B a un volume V_0 , l'autre b un volume $\frac{V_0}{n}$, chacune des unités de volume de la substance éprouvant un même accroissement de volume dans une même enceinte, les dilatations seront proportionnelles au volume à 0° , elles seront :

Δ et $\frac{\Delta}{n}$ entre la glace fondante et l'eau bouillante;

δ et $\frac{\delta}{n}$ entre la glace fondante et la température considérée.

D'après la définition de la température,

$t = \frac{\delta}{a} = \frac{\delta}{\Delta} \frac{100}{100}$ sera l'indication du premier thermomètre dans une

enceinte,

$t' = \frac{\delta'}{a'} = \frac{\frac{\delta}{n}}{\frac{\Delta}{n}} = \frac{\delta}{\Delta} \frac{100}{100}$ sera l'indication du deuxième dans la même enceinte.

$t' = t$, les indications seront donc identiques.

Un thermomètre doit avoir une masse très petite afin de ne pas refroidir les corps avec lesquels il est mis en contact.

277. Choix d'une substance thermométrique. — La loi de dilatation des différentes substances étant généralement différente, deux corps dont les volumes seraient les mêmes à 0° et à 100° n'auront pas nécessairement le même volume aux températures intermédiaires : il faut donc préciser la nature de la substance employée comme thermomètre. Les corps solides ne sont pas employés comme substances thermométriques, car deux échantillons d'un même solide ne sont jamais identiques, et en outre ils éprouvent fréquemment des modifications dans leur structure avec le temps et à la suite de dilatations.

Les liquides s'obtiennent facilement purs, ils reprennent toujours leur volume primitif, mais il est nécessaire de les renfermer dans des enveloppes de verre qui éprouvent aussi une dilatation.

278. Thermomètre à mercure. — Le thermomètre habituellement employé est le thermomètre à mercure. C'est un réservoir en verre en forme d'olive renfermant du mercure et surmonté d'un tube très étroit et cylindrique. Le niveau du mercure s'élève avec la température.

Le choix du mercure offre plusieurs avantages. C'est un liquide qu'on peut obtenir facilement pur. Son point de congélation et son point d'ébullition sont éloignés des températures usuelles. Très bon conducteur de la chaleur, il se met rapidement en équilibre de température avec l'enceinte dans laquelle il est plongé. En outre, son

opacité le rend visible même dans une tige très étroite, et les variations de volume sont faciles à observer.

Ayant marqué 0° au niveau où s'arrête le mercure dans la glace fondante et 100° au niveau dans la vapeur d'eau bouillante, on divise l'intervalle en 100 parties égales.

279. Définition du degré centigrade. — Le degré centigrade du thermomètre à mercure est l'*élévation de température qui correspond à la centième partie de la dilatation apparente⁽¹⁾ du mercure dans le verre*, en passant de la glace fondante dans l'eau bouillante sous la pression de 76 centimètres de mercure.

On prolonge la division au-dessus de 100 et au-dessous de 0 ; les degrés situés en dehors des points fixes ne répondent plus à la définition précédente, on s'en sert néanmoins pour classer les températures.

280. Construction du thermomètre à mercure. — *Choix du tube.* — On choisit un tube régulièrement cylindrique ou bien *calibré*. On



Fig. 212.

s'assure que cette condition est remplie, en promenant dans le tube une petite colonne de mercure de 30^{mm} environ (fig. 212) ; elle doit occuper la même longueur ab dans toutes ses positions. On souffle un réservoir à l'une des extrémités du tube.

Remplissage du thermomètre. — A l'autre extrémité du tube, on souffle une ampoule d'un volume supérieur au réservoir et terminée par une pointe ouverte ; l'ampoule ayant été légèrement chauffée de façon qu'une partie de l'air qu'elle renferme s'échappe, on plonge la pointe dans un bain de mercure pur et sec (fig. 213). L'air resté dans l'ampoule se refroidit, sa force élastique décroît et la pression atmosphérique y pousse du mercure. Quand la quantité de mercure ainsi introduite paraît suffisante pour remplir le réservoir et la tige, on redresse l'appareil (fig. 214).

L'air contenu dans la tige capillaire empêche le mercure de l'ampoule d'y pénétrer, mais si l'on chauffe le réservoir et la tige avec une

(1) La dilatation apparente d'un liquide renfermé dans une enveloppe est la différence entre sa dilatation absolue et la dilatation de l'enveloppe (306).

lampe, une certaine quantité d'air s'échappe par bulles à travers le mercure, la force élastique de l'air restant diminue par le refroidissement et la pression atmosphérique y fait descendre du mercure. On



Fig. 213.

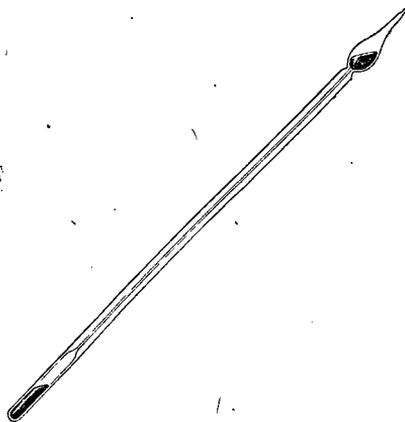


Fig. 214.

recommence à chauffer, il sort de nouveau de l'air qui est remplacé par du mercure, on continue jusqu'à ce que le réservoir et le tube soient remplis.

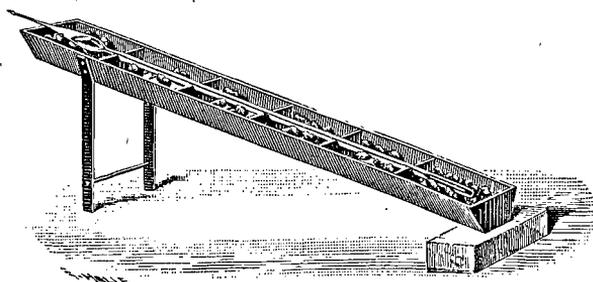


Fig. 215.

On fait alors bouillir le mercure en chauffant l'appareil sur une grille inclinée (fig. 215), les vapeurs mercurielles entraînent en se dégageant ce qui reste d'air et d'humidité dans le tube et le réservoir. Après le refroidissement, le mercure exactement appliqué contre la surface du verre, forme *miroir*.

On plonge le tube dans un bain liquide dont la température est

supérieure à la plus élevée que l'appareil devra marquer ; par la dilatation, le mercure en excès passe dans l'ampoule. On sépare alors l'ampoule de la tige et on ferme l'extrémité du tube à la lampe d'émailleur. Le mercure se contracte par un nouveau refroidissement et un espace vide se forme au-dessus de lui. Si les dimensions relatives du réservoir et du tube ont été bien choisies, le mercure s'élève à une certaine hauteur dans la tige aux températures ordinaires.

281. Détermination des points fixes. — 1° *Détermination du zéro.* — On plonge le thermomètre verticalement dans de la glace fondante râpée. Cette glace G est contenue dans un vase A dont le fond est percé d'un trou pour laisser échapper l'eau de fusion (fig. 216). Quand le niveau du mercure est devenu définitivement *stationnaire*, on y marque un trait fin avec un diamant. C'est le zéro de l'échelle.

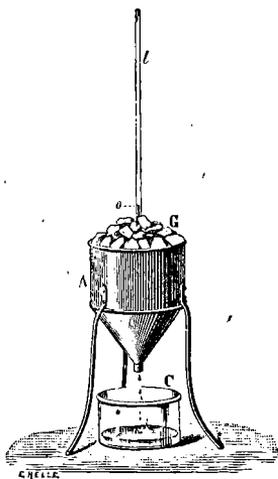


Fig. 216.

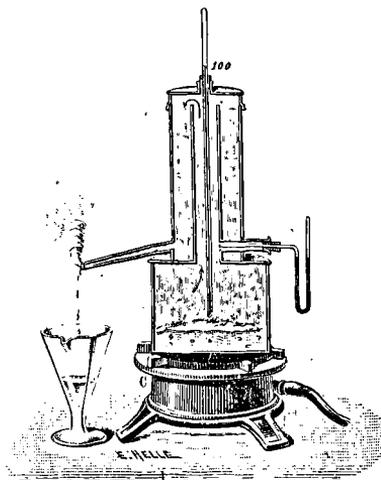


Fig. 217.

2° *Détermination du point 100.* — Pour déterminer le point fixe supérieur, ce n'est pas dans l'eau bouillante que l'appareil doit être plongé, parce que la température de l'eau elle-même varie avec diverses circonstances : nature du vase, pureté de l'eau, distances des différentes couches au fond du vase ; le thermomètre doit être placé dans la vapeur, dont la température ne dépend que de la pression extérieure (388).

Le thermomètre est suspendu, à une petite distance au-dessus de

l'eau bouillante, dans le manchon central d'une chaudière métallique à double enveloppe (fig. 217). La vapeur circule dans la deuxième enveloppe qui est annulaire, et s'échappe par un tube latéral inférieur. Le manchon central est ainsi protégé contre le contact de l'air et mis à l'abri du refroidissement et de la condensation de la vapeur. Un petit manomètre latéral à liquide indique par l'égalité des niveaux dans ses deux branches que l'ébullition a bien lieu sous la pression extérieure.

Quand le niveau du mercure est devenu *stationnaire* dans la tige, on consulte le baromètre et on marque un trait au point où s'arrête le mercure. Si la pression est 76, ce trait est le point 100 ; si la pression est voisine de 76, telle que $76 + h$, le quotient $\frac{h}{2,7}$ donne la fraction de degré à ajouter à 100, car au-dessus de la pression 76, la température de la vapeur d'eau bouillante s'élève de 1° quand la pression atmosphérique croît de $2^{\text{mm}}7$; une égale diminution de pression correspond à un abaissement de 1° (365).

T étant le degré marqué au point fixe supérieur, on divise avec une machine à diviser l'intervalle entre les deux points fixes en T parties d'égale longueur (T est très voisin de 100), appelées *degrés*. On prolonge la division au-dessus du point fixe supérieur, on la prolonge également au-dessous du point fixe inférieur en conservant aux traits le même écartement et on fait précéder du signe — les degrés situés au-dessous du point de fusion de la glace.

282. Échelles thermométriques. — La division en 100 parties égales de l'intervalle compris entre la température de la glace fondante et la température de l'eau bouillante à la pression 76 caractérise l'échelle *centigrade* ; c'est la plus usitée.

Dans l'échelle dite de *Réaumur*, usitée en Suisse, on marque 0° et 80° aux deux points fixes, et on divise l'intervalle en 80 parties égales.

Dans l'échelle de *Fahrenheit*, usitée en Angleterre et aux États-Unis, on marque 32 et 212 aux deux points fixes, et on divise l'intervalle en 180 parties égales.

283. Correspondance des échelles thermométriques. — Considérons un thermomètre sur lequel seraient marquées les trois graduations (fig. 218). Appelons c la longueur d'une division dans l'échelle centigrade, r dans l'échelle de Réaumur, et f dans l'échelle de Fahrenheit.

Dans l'intervalle compris entre les deux points fixes, nous avons

$$100c = 80r = (212 - 32) f.$$

Désignons par C, R et F les nombres de degrés marqués sur les trois échelles à une même température et exprimons que la longueur comprise entre le zéro et le niveau du mercure est la même sur les trois échelles :

$$Cc = Rr = (F - 32) f.$$

Nous obtiendrons en divisant membre à membre :

$$\frac{C}{100} = \frac{R}{80} = \frac{F - 32}{180}$$

$$\text{ou } \frac{C}{5} = \frac{R}{4} = \frac{F - 32}{9}$$

Les deux équations de la dernière ligne permettent d'effectuer toutes les conversions.

L'échelle centigrade est la seule employée actuellement dans les recherches scientifiques.

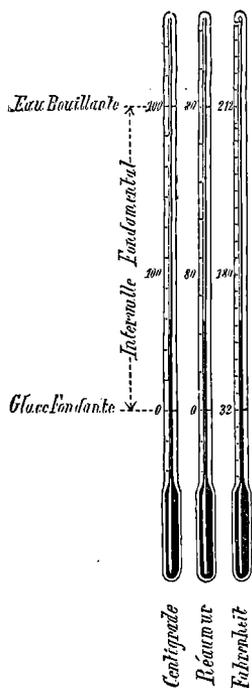


Fig. 218.

284. Déplacement du zéro. — Si l'on porte dans la glace fondante un thermomètre qui a été gradué peu de temps après sa construction, le mercure s'arrête un peu au-dessus du zéro. En effet, par suite d'un travail moléculaire du verre de l'enveloppe, après la construction, le zéro remonte d'abord assez vite, puis lentement et il n'atteint une position fixe qu'après plusieurs années. Le point 100 se déplace d'une quantité sensiblement égale et l'intervalle de 0 à 100 reste constant. Pour corriger l'influence du relèvement du zéro qui peut dépasser 1 degré, on détermine la position du zéro après avoir observé une température à évaluer, et pour avoir la véritable température on retranche de la lecture faite le nombre de divisions dont le zéro s'est élevé. Cette correction serait très réduite si l'on ne déterminait les points fixes que longtemps après la construction du thermomètre.

285. Sensibilité d'un thermomètre. — Un thermomètre à tige fine accuse de très petites variations de température, si le réservoir a de grandes dimensions, puisque l'accroissement de volume est proportionnel à la masse qui se dilate; la longueur du degré permet alors une subdivision en dixièmes et même en centièmes de degré.

D'autre part, pour qu'un thermomètre se mette rapidement en équilibre de température avec le milieu où il est placé, le réservoir ne doit avoir que de petites dimensions.

Ces deux sensibilités s'excluent et suivant les circonstances on recherche l'une ou l'autre.

286. Mesure des températures très basses. — Le thermomètre à mercure ne peut donner d'indications qu'entre -40° , température de sa congélation et $+360^{\circ}$, température de son ébullition. Aux températures très basses on emploie un thermomètre à alcool, l'alcool ne perdant sa fluidité que par un refroidissement très énergique.

287. Thermomètre à alcool. — Pour remplir d'alcool un tube thermométrique, on chauffe le réservoir, puis on plonge dans l'alcool l'extrémité ouverte de la tige; l'alcool remplit la tige et une partie du réservoir; on redresse l'instrument et on fait bouillir un instant le liquide; en plongeant de nouveau la tige dans l'alcool, le thermomètre se remplit complètement⁽¹⁾. On ferme à la lampe en laissant un peu d'air au-dessus du niveau de l'alcool dans la tige.

Le zéro se détermine *directement* dans la glace fondante, comme pour le thermomètre à mercure. On obtient un autre point de l'échelle en plongeant l'instrument dans de l'eau tiède dont la température est donnée par un bon thermomètre à mercure. Le thermomètre à alcool ne peut être employé au-dessus de 78° , température d'ébullition de l'alcool.

Les indications du thermomètre à alcool diffèrent peu de celles du thermomètre à mercure.

288. Thermomètres à maxima et à minima. — La *température moyenne* d'un jour s'obtient en notant la température d'heure en heure et en

(1) Il reste fréquemment une bulle dans le réservoir; pour la faire disparaître, on attache le tube à l'extrémité d'une ficelle et on lui donne un mouvement de fronde; la bulle revient vers le centre du mouvement et, par conséquent, passe dans la tige d'où on l'expulse facilement.

divisant par 24 la somme des 24 observations. Le résultat diffère peu de la demi-somme du maximum et du minimum pendant les 24 heures.

Les thermomètres de Rutherford *conservent* le maximum et le minimum, sans qu'on soit obligé de suivre leurs indications.

289. Thermomètre à maxima. — C'est un thermomètre à *mercure*, dont la tige, recourbée horizontalement, renferme un petit index de *fer ae* qui peut y glisser librement; le mercure, ne mouillant ni le verre ni le fer, ne

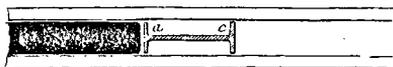


Fig. 219.

peut s'engager autour de l'index et le pousse devant lui, quand la température s'élève; l'index reste en place si la température s'abaisse (fig. 219). L'extrémité de l'index la plus rapprochée du réservoir marque le maximum.

290. Thermomètre à minima. — C'est un thermomètre à *alcool* dont la tige, recourbée horizontalement, renferme un petit index en *émail uv*; l'alcool, mouillant à la fois le verre et l'émail, enveloppe l'index et l'entraîne par adhérence en se contractant (fig. 220); en se dilatant, il le laisse en place

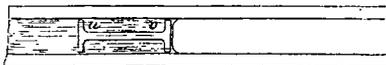


Fig. 220.

et glisse dans le petit intervalle qui le sépare du tube. L'extrémité de l'index la plus éloignée du réservoir marque le minimum.

Pour la mise en expérience d'un de ces appareils, on abaisse la tige, afin d'amener par la pesanteur les cylindres aux extrémités des colonnes liquides; on replace ensuite la tige horizontalement.

291. Comparabilité des thermomètres à mercure. — Le déplacement du zéro prouve qu'un thermomètre à mercure ne reste pas comparable à lui-même; en outre, en raison des différences de dilatation que présentent les enveloppes de verre, des thermomètres à mercure construits avec des verres différents ne marquent pas simultanément la même température dans une même enceinte. Ils s'accordent nécessairement d'après leur graduation à 0° et à 100° , l'accord reste très approché au-dessous de 100° , mais les écarts peuvent devenir importants au-dessus de 100° .

292. Thermomètre normal. — Pour ces motifs, on a pris pour thermomètre normal un *thermomètre à gaz*. La grande dilatabilité des gaz en fait des thermomètres très sensibles, et rend négligeable l'influence de la dilatation de l'enveloppe. Les thermomètres à hydrogène restent toujours comparables entre eux et peuvent être employés depuis les températures les plus basses jusqu'aux températures les plus élevées (dans ce dernier cas, on renferme le gaz dans une enveloppe de porcelaine).

Au lieu de déterminer la température d'une enceinte par l'observation de la dilatation d'une masse de gaz, on a préféré s'adresser à l'observation de la variation de la force élastique du gaz (272).

L'échelle est l'échelle centigrade. On appelle *degré de température* du thermomètre normal la variation de température qui communique à une masse d'hydrogène assujettie à conserver un volume constant, une *variation de force élastique égale à la centième partie de la variation* qu'elle éprouve entre la température de la glace fondante et celle de la vapeur d'eau bouillante, la force élastique initiale dans la glace fondante étant 1 mètre de mercure. Dans les mesures précises, on évalue les températures en degrés du thermomètre normal.

293. Emploi de thermomètres à mercure gradués. — Le thermomètre normal exigeant pour chaque mesure une opération longue et délicate, le thermomètre à mercure est resté le thermomètre *pratique*. Il convient d'ailleurs de remarquer que si on effectue la correction du déplacement du zéro, un thermomètre à mercure reste très sensiblement d'accord avec le thermomètre normal entre 0° et 100°; en dehors de ces limites, on effectue une graduation des thermomètres à mercure, par comparaison avec un thermomètre normal.

Nous reviendrons plus loin sur le thermomètre normal (333).

DILATATION DES SOLIDES

FORMULES DES DILATATIONS

294. Dilatation linéaire. — Une barre métallique chauffée éprouve un allongement *proportionnel à sa longueur*, car il est égal à

la somme des allongements de ses diverses parties. L_0 désignant la longueur d'une barre à 0° , L sa longueur à t° , et l l'accroissement de longueur de l'unité de longueur de 0° à t° ,

$$L = L_0 + L_0 l = L_0 (1 + l).$$

L'expérience a fait voir qu'entre 0° et 100° , l'allongement est sensiblement proportionnel à l'élévation de température du thermomètre normal, $l = \lambda t$; en d'autres termes, entre ces limites, $\frac{l}{t}$ est constant, quel que soit t .

λ s'appelle *coefficient de dilatation linéaire* : c'est l'allongement de l'unité de longueur d'un corps pour une élévation de température de 1° ,

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

$1 + \lambda t$ s'appelle le binôme de dilatation linéaire.

Cette relation permettra de calculer l'une des quatre quantités, L_0 , L , λ ou t , quand les trois autres seront connues.

Si la barre est portée à la température t' ,

$$L' = L_0 (1 + \lambda t'). \quad (2)$$

En divisant (2) par (1), il vient :

$$\frac{L'}{L} = \frac{1 + \lambda t'}{1 + \lambda t} = \left[\frac{1 + \lambda (t' - t)}{1 + \lambda t} \right],$$

d'où l'on calcule la longueur à t' , connaissant la longueur à t° et le coefficient de dilatation.

En faisant la division, on a négligé les termes λ^2 et λ^3 qui sont extrêmement petits, vu la petitesse de λ .

$$\frac{1 + \lambda t'}{1 + \lambda t} = \frac{1 + \lambda (t' - t)}{1 + \lambda t} \approx \left[\frac{1 + \lambda (t' - t)}{1 + \lambda t} \right] \approx \left[\frac{1 + \lambda (t' - t)}{1 + \lambda t} \right]$$

295. Dilatation cubique. — Soit V_0 le volume d'un corps à 0° , V son volume à t° , l'augmentation de volume de ce corps est la somme des augmentations de volume de ses différentes parties, elle est donc *proportionnelle au volume V_0* ; c étant l'accroissement de volume de l'unité de volume de 0° à t° ,

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

Un corps homogène et non cristallisé, uniformément chauffé, reste semblable à lui-même en se dilatant, car il présente une même dilatation linéaire dans toutes ses directions.

Soit un tel corps, taillé en cube, ayant à 0^0 ses arêtes égales à l'unité de longueur, son volume à 0^0 sera égal à l'unité de volume ; de 0^0 à t^0 chacune des arêtes s'allongera de l , il restera un cube en se dilatant, et son volume deviendra $(1 + l)^3$, ou $1 + c$ d'après la définition de c .

$$1 + c = (1 + l)^3 = 1 + 3l + 3l^2 + l^3.$$

Les deux derniers termes peuvent être négligés à cause de leur petitesse ; il reste $c = 3l$. La dilatation cubique est donc le triple de la dilatation linéaire.

Si $l = \lambda t$, $c = 3\lambda t$, la dilatation cubique sera, dans les mêmes limites que la dilatation linéaire, proportionnelle à la température. Posons $c = \gamma t$, $\gamma = 3\lambda$.

γ est le *coefficient de dilatation cubique*, c'est l'accroissement de volume de l'unité de volume d'un corps pour une élévation de température de 1^0 . Le coefficient de dilatation cubique d'un corps est le triple du coefficient de dilatation linéaire.

Pour un même corps à t^0 et à t'^0 ,

$$V = V_0 (1 + \gamma t)$$

$$V' = V_0 (1 + \gamma t')$$

$$\text{De là } \frac{V'}{V} = \frac{1 + \gamma t'}{1 + \gamma t} = 1 + \gamma (t' - t).$$

296. Dilatation superficielle. — Soit S_0 la surface d'une plaque solide à 0^0 , S sa surface à t^0 , a l'accroissement de surface d'un centimètre carré de 0^0 à t^0 ,

$$\text{on aura } S = S_0 (1 + a).$$

Soit un carré d'une substance homogène ayant à 0^0 son arête égale à l'unité de longueur : sa surface à 0^0 sera égale à l'unité de surface, chacun des côtés s'allongera de l de 0^0 à t^0 , la surface restera un carré et deviendra $(1 + l)^2$, ou $1 + a$, de là $a = 2l$, en négligeant l^2 . La figure 221 fait voir l'augmentation totale de surface et la portion habituellement négligée.

Si $l = \lambda t$ $a = 2\lambda t$; posons $a = \sigma t$

$$\sigma = 2\lambda$$

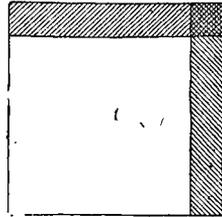


Fig. 221.

Pour une même plaque à t^0 et à t' ,

$$S = S_0 (1 + \sigma t)$$

$$S' = S_0 (1 + \sigma t')$$

$$\frac{S'}{S} = \frac{1 + \sigma t'}{1 + \sigma t} = \left[1 + \sigma (t' - t) \right]$$

Les relations $c = 3l$, $a = 2l$ n'existent que si le corps reste semblable à lui-même en se dilatant; pour les cristaux qui n'appartiennent pas au système cubique, l varie avec la direction et ces cristaux ne restent pas semblables à eux-mêmes dans leur dilatation.

297. Densités d'un même corps à diverses températures.

— Soient V_0 et V les volumes d'un même corps à 0^0 et à t^0 , D_0 et D ses densités à 0^0 et à t^0 , la masse ne change pas quand la température varie.

$$\text{On a donc } M = V_0 D_0 = VD$$

$$\text{or } V = V_0 (1 + c)$$

$$\text{par suite } V_0 D_0 = V_0 (1 + c) D$$

$$\text{ou } D = \frac{D_0}{1 + c}$$

Le volume d'un corps augmente quand la température s'élève, et sa densité diminue.

A diverses températures t et t' , les densités D , D' seront données par :

$$D = \frac{D_0}{1 + c} \quad D' = \frac{D_0}{1 + c'}$$

$$\text{De là, en divisant : } \frac{D'}{D} = \frac{1 + c}{1 + c'} = \frac{1 + \gamma t}{1 + \gamma t'}$$

Les densités d'un même corps, à deux températures différentes, sont *inversement proportionnelles* aux binômes de dilatation cubique.

Les formules établies pour les volumes et les densités des solides s'appliquent également aux liquides; toutefois pour ceux-ci, sauf pour le mercure, les dilatations c cessent d'être sensiblement proportionnelles aux températures du thermomètre normal.

DILATATION LINÉAIRE DES SOLIDES

298. Méthode de Lavoisier et Laplace. — *Appareil et principe de la méthode.* — L'appareil de Lavoisier et Laplace (fig. 222)

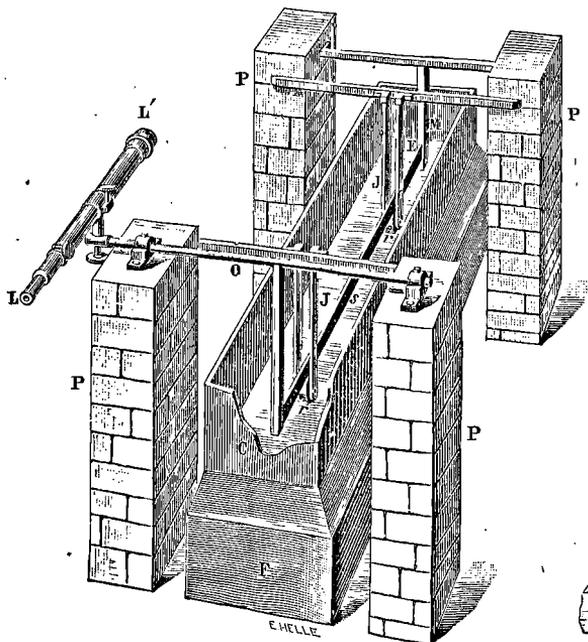


Fig. 222.

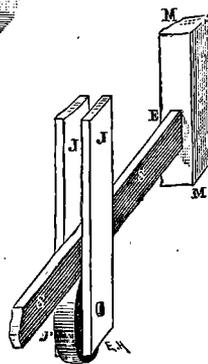


Fig. 223.

consiste en une cuve métallique *C* dans laquelle une barre d'environ 2 mètres du solide à expérimenter est disposée horizontalement sur des rouleaux de verre *r*. Par une de ses extrémités *E*, la barre *S* bute contre un montant fixe *M* (fig. 223) lié à deux piliers en maçonnerie *P*. par l'autre extrémité, elle vient pousser une tige verticale formant la courte branche d'un levier coudé à angle droit qui tourne autour d'un axe *O*. La grande branche du levier est la ligne de visée d'une lunette *LL'* mobile dans un plan vertical et dirigée sur une règle divisée distante d'environ 200 mètres. Si la barre se dilate, son extrémité libre *C* vient en *D* et la ligne de visée de la lunette passe de la position *OA* à la position *OB* (fig. 224).

Les angles COD, AOB étant égaux, les deux triangles rectangles auxquels ils appartiennent sont semblables ; par conséquent,

$$\frac{CD}{AB} = \frac{OC}{OA} \quad \text{d'où} \quad CD = \frac{OC}{OA} AB.$$

Un allongement très petit CD correspond à une longueur AB sur la règle, d'autant plus grande que celle-ci est plus éloignée.

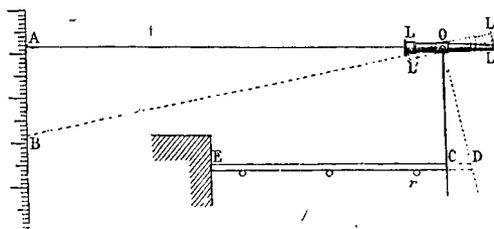


Fig. 224.

Expérience. — La cuve ayant été remplie de glace fondante et la barre S ayant pris la température 0° , on vise avec la lunette une division A de la règle. On remplace la glace par de l'eau que l'on fait bouillir ou par de l'huile chaude à t° : la barre se dilate. L'extrémité libre pousse devant elle la courte branche du levier qui, de la position OC passe à la position OD en tournant de l'angle COD, la lunette tourne du même angle et sa ligne de visée prend une direction OB. On note au même instant la température d'un thermomètre placé dans la cuve et la division B de la règle.

$$CD = \frac{OC}{OA} AB.$$

OC et OA peuvent se mesurer : mais il vaut mieux déterminer expérimentalement $\frac{OC}{OA}$ en plaçant successivement dans la cuve à 0° deux règles dont l'une dépasse l'autre d'une longueur C'D' *exactement* connue. On vise A'B', on aura C'D' = $\frac{OC}{OA}$ A'B'. Dans l'appareil de Lavoisier et Laplace, $\frac{OC}{OA}$ était égal à $\frac{1}{744}$,

$\frac{AB}{744}$ représente l'allongement total de la barre de 0° à t° .

299. Méthode micrométrique. — Actuellement, au lieu de chercher à amplifier l'allongement de la barre, on le mesure directement à l'aide de vis

$$\Delta L = L_1 - L_0 = \Delta L \quad \Delta = \frac{L_1 - L_0}{L_0} = \frac{OB - OA}{OA} = \frac{AB}{OA}$$

micrométriques. La barre porte deux traits parallèles a tracés perpendiculairement à sa longueur au voisinage des deux extrémités; ces deux traits sont à une distance connue l_0 à 0° . La barre est disposée dans une auge A que l'on peut refroidir à 0° ou chauffer à t° . Aux extrémités de l'auge contenant la barre à étudier on a installé de forts piliers P en maçonnerie : chacun d'eux porte un

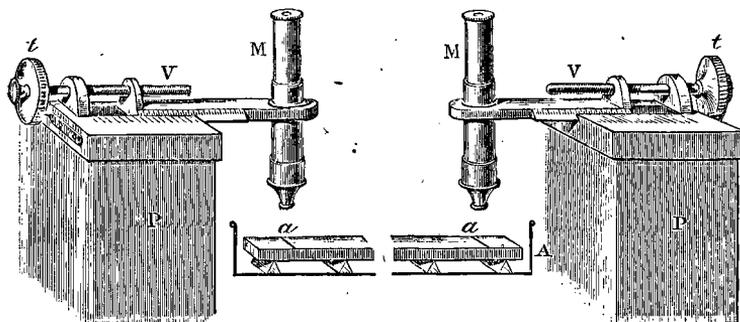


Fig. 225.

microscope vertical M muni d'un réticule formé de deux fils croisés; le microscope peut être déplacé par une vis micrométrique V (fig. 225). Le pas de cette vis est de 1^{mm} et la tête de la vis est munie d'un tambour t portant 100 divisions. Pour un tour complet du tambour, la vis fait avancer le microscope d'un millimètre et quand le tambour ne tourne que d'une division, le microscope ne se déplace que de $\frac{1}{100}$ de millimètre.

La barre étant à 0° , on règle d'abord les microscopes de façon à voir les deux traits a sous la croisée des fils des réticules. Les axes des microscopes sont alors distants de l_0 . On chauffe ensuite la barre à t° , les deux traits s'écartent; on fait jouer les vis micrométriques pour rétablir la coïncidence des images des deux traits avec les croisées des fils des réticules. Soient n et n' les nombres de divisions dont on a fait tourner les tambours, l'allongement de la barre est :

$$\frac{1}{100} (n + n') \text{ en millimètres}$$

et le coefficient de dilatation a pour valeur :

$$\frac{n + n'}{100l_0t}$$

300. Résultats. — Entre 0° et 100° , l'allongement d'une barre métallique ou d'une tige de verre est *sensiblement proportionnel à l'élévation de la température*, marquée par un thermomètre normal. Entre 0° et 100° , on a donc $l = \lambda t$, et il y a par conséquent un *coefficient de dilatation*. Au-dessus de 100° , pour une même barre, la dilatation croît plus vite que la température, $l = \lambda t + \lambda' t^2$, λ et λ'

sont des coefficients variables avec la nature du corps; ils se déterminent par deux expériences faites par exemple de 0° à t° et de 0° à t° . Pour un même corps solide, la dilatation entre 0° et t° dépend de l'état physique (métal recuit ou écroui, etc.).

Les barres reprennent sensiblement leur longueur initiale après le refroidissement. Le zinc est le métal qui se dilate le plus.

COEFFICIENTS DE DILATATION LINÉAIRE ENTRE 0° ET 100°

Zinc.....	0,000031	Laiton.....	0,000019
Plomb.....	0,000028	Fer.....	0,000012
Argent.....	0,000019	Platine.....	0,000008
Cuivre.....	0,000017	Verre.....	0,000008

DILATATION DES LIQUIDES

Les liquides étant toujours enfermés dans des vases, on ne peut échauffer un liquide sans que le vase qui le contient augmente en même temps de capacité (271), ce qui masque une partie de la dilatation des liquides.

Dulong et Petit ont mesuré la dilatation vraie ou absolue du mercure par une *méthode indépendante de la dilatation de l'enveloppe*.

301. Détermination de la dilatation absolue du mercure par Dulong et Petit. — *Principe de la méthode.* — Soient deux tubes verticaux et de même diamètre, reliés par un tube horizontal

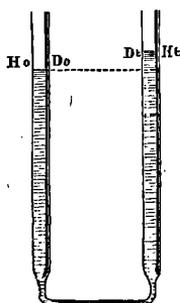


Fig. 226.

très étroit (fig. 226) et remplis de mercure. Le liquide s'élève à la même hauteur dans les deux branches, s'il a partout la même température; mais si, en maintenant l'un des tubes à la température zéro, on porte l'autre à la température t , le liquide chaud dont la densité D_t est plus faible, s'élève à une plus grande hauteur H_t pour faire équilibre à la pression du liquide froid et une différence de niveau s'établit dans les deux tubes comme avec deux liquides différents. La dilatation des tubes n'exerce aucune influence sur la hauteur des liquides.

Le tube de communication étant *très étroit*, le frottement du liquide

contre les parois s'oppose à la production de courants entre le mercure chaud et le mercure froid et par conséquent à leur mélange. A l'aide de niveaux, on a soin de rendre ce tube de communication parfaitement horizontal.

Désignons par H_0 et H_t les hauteurs du mercure dans les deux tubes au-dessus de l'axe de communication; soient D_0 et D_t les densités du mercure à 0^0 et à t^0 ; d'après la condition d'équilibre relative à deux vases communicants (177), les hauteurs des deux liquides sont en raison inverse de leurs densités :

$$\frac{H_t}{H_0} = \frac{D_0}{D_t}$$

$$\text{or } \frac{D_0}{D_t} = 1 + \mu_t$$

μ_t dilatation de l'unité de volume du mercure de 0^0 à t^0 ,

$$\text{donc } \frac{H_t}{H_0} = 1 + \mu_t$$

$$\text{et } \mu_t = \frac{H_t - H_0}{H_0}.$$

Description de l'appareil. — Dans l'appareil employé par Dulong

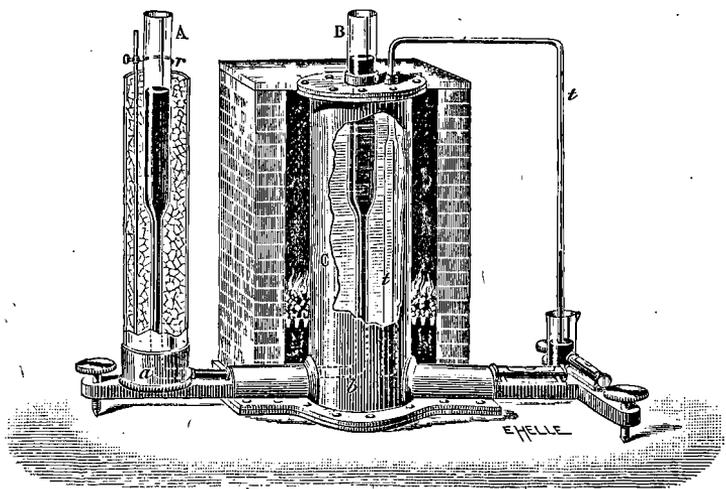


Fig. 227,

et Petit, les tubes A et B contenant le mercure sont des tubes larges à leurs parties supérieures pour qu'il n'y ait pas de dépression capil-

laire⁽¹⁾; A est entouré d'un manchon rempli de glace pilée, B est placé dans un cylindre de cuivre C plein d'huile que l'on chauffe avec un fourneau. La température est indiquée par un thermomètre à gaz t plongé dans l'huile à côté du tube B (fig. 227) et dont le réservoir occupe toute la hauteur du bain d'huile afin de donner la température moyenne.

Le tube de communication étroit ab est fixé sur une règle métallique en forme de T, que l'on rend horizontale à l'aide de vis calantes et de niveaux.

Une tige verticale en fer portant un repère r est placée dans la glace à côté du tube A.

Expérience. — L'huile ayant été chauffée au voisinage de la température à laquelle on voulait faire une mesure de la dilatation du mercure, on fermait les ouvertures du fourneau, la température montait encore un peu et atteignait un maximum où elle restait *stationnaire* avant de descendre, assez longtemps pour qu'on pût mesurer $H_t - H_0$, H_0 et t .

La distance R du repère r à l'axe du tube horizontal ab ayant été déterminée avec soin, on mesurait avec un cathétomètre : 1° la distance h du repère au niveau du mercure froid, $R - h = H_0$; 2° la différence des niveaux dans les deux tubes $H_t - H_0$.

302. Résultats. — Entre 0^0 et 100^0 la dilatation du mercure est sensiblement proportionnelle à l'élévation de température marquée par un thermomètre normal. On peut donc écrire $\mu_t = \mu t$. Le coefficient moyen μ de dilatation du mercure dans cet intervalle est $\frac{1}{5550}$.

Au delà de 100^0 , la dilatation du mercure croît plus vite que proportionnellement à la température.

La dilatation de l'unité de volume du mercure entre 0^0 et t^0 peut être représentée exactement par une formule empirique $\mu_t = at + bt^2$; a et b sont deux nombres qu'on détermine par deux expériences faites entre 0^0 et θ^0 , puis entre 0^0 et t^0 , θ^0 étant une température comprise entre 0^0 et t^0 . Le coefficient moyen entre 0^0 et t^0 est $a + bt$.

(1) A une même température, les dépressions capillaires (178) pour un même liquide contenu dans 2 tubes communicants de même diamètre sont égales; mais elles sont inégales si les 2 tubes sont portés à des températures différentes. Avec des tubes d'un diamètre supérieur à 3 centimètres aux points où se fixent les niveaux, les dépressions capillaires sont entièrement négligeables.

303. Détermination de la dilatation d'un liquide quelconque. — La méthode de Dulong et Petit exige une installation délicate et une opération longue; elle est d'ailleurs souvent inapplicable en raison de l'évaporation rapide qui se produit à la surface de la plupart des liquides quand on les chauffe.

L'étude de la dilatation d'un liquide se fait en le renfermant dans une enveloppe qui se dilate elle-même. La connaissance de la dilatation du mercure permet alors de mesurer l'accroissement de capacité de l'enveloppe.

304. Méthode du thermomètre à poids. — *Construction du thermomètre.* — Un thermomètre à poids se compose d'un gros réservoir cylindrique en verre R, terminé à sa partie supérieure par un tube étroit t deux fois recourbé et effilé à son extrémité (fig. 228). Après avoir pesé le thermomètre vide, on y introduit du mercure pur en procédant comme pour un thermomètre ordinaire (280). Le mercure introduit ayant été porté à l'ébullition pour chasser l'air et l'humidité, on plonge la pointe du tube dans une capsule C qui a été pesée vide et qui renferme du mercure chaud. L'appareil se remplit, on le laisse refroidir, puis on l'entoure de glace fondante, il se remplit entièrement de mercure à 0° . On débarrasse alors la capsule de l'excès de mercure qu'elle contient et on la replace sous la pointe effilée du thermomètre. On pèse de nouveau l'appareil avec le mercure qui le remplit à 0° (1). L'accroissement de masse M est le poids en grammes ou la masse de mercure contenue dans le thermomètre jusqu'à l'extrémité de sa pointe à 0° ; le volume de ce mercure à 0° ou la capacité à 0° en centimètres cubes de l'enveloppe qui le renferme est $\frac{M}{D_0}$, D_0 densité du mercure à 0° .

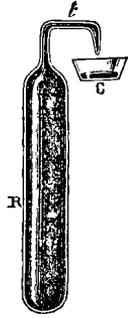


Fig. 228.

En chauffant à t° , une certaine quantité de mercure sort du thermomètre, car le mercure est plus dilatable que le verre; ce mercure est recueilli et pesé; sa masse m est l'accroissement de poids de la capsule.

Dilatation de l'enveloppe de verre. — Désignons par μt la dilatation de l'unité de volume du mercure entre 0° et t° , par Kt la dilatation de l'unité de volume de l'enveloppe. Le volume du mercure à t° est $\frac{M}{D_0} (1 + \mu t)$. L'enveloppe creuse se dilate comme si elle était remplie de la substance qui la forme, et son volume intérieur devient $\frac{M}{D_0} (1 + Kt)$.

(1) Le poids de l'appareil vide comprend le poids du thermomètre et le poids de la capsule; l'appareil plein de mercure à 0° comprend en outre le mercure qui remplit l'enveloppe thermométrique à 0° . La pesée ne se fait que lorsque l'appareil a repris la température ambiante; un peu de mercure est alors tombé dans la capsule, mais la masse totale du mercure qui est pesée est la même que celle qui remplissait le thermomètre à 0° .

D'autre part, le volume du mercure sorti à t^0 et supposé à t^0 est :

$$\frac{m}{D_0} (1 + \mu t).$$

Il est clair que le volume total du mercure à t^0 est égal au volume de l'enveloppe à t^0 accru du volume du mercure sorti, également à t^0 .

$$\frac{M}{D_0} (1 + \mu t) = \frac{M}{D_0} (1 + Kt) + \frac{m}{D_0} (1 + \mu t)$$

$$\text{d'où } (M - m) \mu t - m = MKt$$

$$\text{et } Kt = \frac{(M - m) \mu t - m}{M}$$

La dilatation Kt de l'enveloppe⁽¹⁾ sera donnée par cette dernière équation dans laquelle M , m et t sont fournis par l'observation, μt est connu d'après la détermination directe de la dilatation du mercure⁽²⁾.

Dilatation d'un liquide autre que le mercure. — Connaissant la dilatation de l'enveloppe, on recommence une opération semblable à la précédente avec le liquide dont on veut connaître la dilatation : remplissage du thermomètre, pesée du liquide contenu à 0^0 , pesée du liquide sorti à t^0 .

L'équation $(M' - m') \omega_t - m' = M'Kt$, où Kt est maintenant connu, permettra de calculer la dilatation ω_t de l'unité de volume du liquide.

Le thermomètre à poids n'exige aucune graduation de l'enveloppe; les mesures sont très précises puisqu'elles se font avec la balance; le seul inconvénient du procédé est la longueur des opérations.

305. Méthode du flacon. — Un flacon à densité de liquide (163) dont le tube capillaire porte un trait d'affleurement, peut être employé dans les mêmes conditions qu'un thermomètre à poids. On remplit le flacon de liquide jusqu'au trait à 0^0 , on chauffe à t^0 , et on enlève l'excédent de liquide. Soient M et M' les masses du liquide qui remplissent le flacon à ces deux températures.

On écrit que le volume du liquide qui remplit le flacon à t^0 est égal à la capacité de l'enveloppe, à cette même température :

$$\frac{M'}{D_0} (1 + \mu_t) = \frac{M}{D_0} (1 + Kt)$$

On opérera d'abord avec le mercure pour déterminer Kt , puis avec un liquide pour obtenir la dilatation ω_t relative à ce liquide.

(1) On pourra déterminer la dilatation d'une enveloppe de verre quelconque en lui donnant la forme d'un thermomètre à poids, et en opérant comme il vient d'être dit.

(2) *Mesure d'une température à l'aide du thermomètre à poids.* — K_t et μ_t étant exprimés en fonction de la température t , il suffira de prendre t pour inconnue dans l'équation :

$$(M - m) \mu_t - m = MK_t$$

ou simplement dans l'équation : $(M - m) \mu t - m = MKt$, où μ et K sont les coefficients moyens de dilatation.

Ayant porté l'appareil dans l'enceinte dont on cherche la température, on pèsera le mercure sorti m .

306. Méthode du thermomètre à tige. — *Jaugeage du thermomètre.* — On prend une enveloppe thermométrique dont la tige *bien cylindrique* est divisée en parties d'égale longueur. On détermine par un jaugeage préalable le *volume* R_0 du réservoir à 0° jusqu'à l'origine de la graduation et le *volume* v_0 d'une division. Pour obtenir R_0 , on pèse le thermomètre vide, puis on remplit le réservoir de mercure à 0° , et on pèse de nouveau. (La pesée se fait quand le thermomètre a repris la température ambiante.) L'accroissement de masse M est la masse du mercure qui remplit le réservoir à 0° .

$$\frac{M}{D_0} = R_0,$$

D_0 est la densité du mercure à 0° .

Pour obtenir v_0 , on ajoute du mercure qui remplit à 0° un nombre b de divisions, soit m l'accroissement de masse :

$$\frac{Mm}{bD_0} = v_0.$$

Dilatation de l'enveloppe. — On introduit du mercure dans le thermomètre, on le porte dans la glace fondante, où le mercure occupe le réservoir et a divisions, puis dans un bain liquide à t° où le mercure s'élève de c divisions. Nous exprimerons que le volume du mercure à t° est égal au volume de la capacité qui le renferme, en admettant que l'enveloppe s'est dilatée comme si elle était pleine. Le volume $R_0 + av_0$ du mercure à 0° devient à t° :

$$(R_0 + av_0) (1 + \mu t) = S_0 (1 + \mu t)$$

en posant $R_0 + av_0 = S_0$. Chaque unité de volume de l'enveloppe valant alors $1 + Kt$, la capacité qui contient le mercure à t° est :

$$(S_0 + cv_0) (1 + Kt).$$

K est le coefficient moyen de dilatation cubique du verre.

De là l'équation :

$$S_0 (1 + \mu t) = (S_0 + cv_0) (1 + Kt)$$

On pourra calculer Kt , puisque μt est connu ⁽¹⁾ d'après la détermination directe de la dilatation du mercure.

Dilatation d'un liquide. — On opérera dans la même enveloppe avec le liquide dont on cherche la dilatation. On écrira une équation semblable à la précédente, où S_0 et c prendront de nouvelles valeurs V_0 et n , qu'on observera :

$$V_0(1 + \omega_t) = (V_0 + nv_0)(1 + Kt)$$

Kt étant connu, cette nouvelle équation fera connaître ω_t dilatation de l'unité de volume du liquide de 0° à t° .

Le remplissage du thermomètre soit avec du mercure, soit avec un liquide, se fait par le procédé déjà décrit à propos de la construction du thermomètre à mercure (280).

¹⁴⁴ *Dilatation apparente.* — Dans l'équation qui vient d'être établie :

$$V_0(1 + \omega_t) = (V_0 + nv_0)(1 + Kt)$$

$V_0\omega_t$ est la dilatation absolue du volume V_0 du liquide, V_0Kt est la dilatation absolue d'un volume égal V_0 de l'enveloppe, $nv_0(1 + Kt)$ est la différence entre la dilatation des deux volumes égaux du liquide et de l'enveloppe, c'est le volume que le liquide occupe en s'élevant dans la tige; nv_0 se nomme la *dilatation apparente* du liquide, ce serait son accroissement de volume en supposant que les divisions ont gardé la capacité qu'elles avaient à 0° .

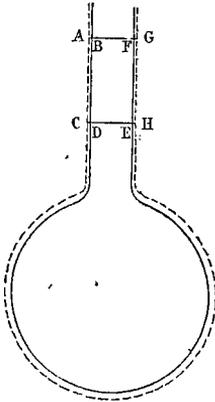


Fig. 229.

Ces différents accroissements sont visibles sur la figure (fig. 229), nv_0 est le volume BDEF.

Si l'on néglige le produit nv_0Kt qui correspond à la capacité annulaire dont ABCD est la section et qui est extrêmement petite, vu la petitesse des deux facteurs nv_0 et Kt , l'équation

$$V_0\omega_t = V_0Kt + nv_0$$

exprime que la dilatation absolue d'un liquide est égale à la somme de sa

(1) En opérant à différentes températures, on obtiendra l'expression de K_t en fonction de t . Le plus souvent, dans les calculs qui se rapportent à des températures inférieures à 100° , on remplace, comme nous l'avons fait, K_t par Kt , K étant le coefficient moyen de dilatation du verre entre 0° et 100° :

$$K = \frac{K_{100}}{100}$$

dilatation apparente et de la dilatation de l'enveloppe⁽¹⁾) Divisons par V_0

$$\omega_t = Kt + \frac{nv_0}{V_0}$$

$\frac{V_0}{v_0}$ vaut un certain nombre de divisions N

$$\omega_t = Kt + \frac{n}{N}$$

Cette expression, commode pour le calcul, met la dilatation apparente de l'unité de volume du liquide sous la forme simple $\frac{n}{N}$. On a déterminé préalablement N , c'est le rapport $\frac{V_0}{v_0}$, connu d'après le jaugeage; on lit n et la température t du bain dans lequel l'appareil est plongé.

Une première détermination faite avec le mercure donnera Kt , une deuxième faite avec un liquide fera connaître la dilatation de l'unité de volume de ce liquide à 0^0 et à t^0 .

Il n'est pas inutile de faire remarquer que cette façon d'exprimer l'égalité de volume du liquide et de son enveloppe *ne modifie en rien* les opérations à effectuer, et que la considération de la dilatation apparente n'est en aucune façon nécessaire.)

307. Résultats. — La dilatation des liquides est très supérieure à celle des solides. La dilatation de l'unité de volume d'un liquide de 0^0 à t^0 peut être représentée par une expression à trois termes telle que $\omega_t = at + bt^2 + ct^3$. Le coefficient moyen de dilatation entre 0^0 et t^0 , $\frac{\omega_t}{t}$, n'est pas constant; $a + bt + ct^2$ croît, en effet, avec la température. *Les liquides n'ont donc pas, à proprement parler, de coefficient de dilatation.* On détermine les constantes numériques a , b , c , par trois expériences effectuées par exemple de 0^0 à t^0 , de 0^0 à t'^0 , de 0^0 à t''^0 , t , t' et t'' étant des températures du thermomètre normal.

La dilatation d'un liquide occupant à 0^0 un volume V_0 est $V_t - V_0 = V_0 \omega_t$. On aura donc, pour exprimer le volume V_t d'un liquide à t^0 , l'équation :

$$V_t - V_0 = V_0 (at + bt^2 + ct^3)$$

$$\text{d'où } V_t = V_0 (1 + at + bt^2 + ct^3).$$

(1) D'après cela, la dilatation apparente d'un liquide (par exemple de la masse de mercure d'un thermomètre) est égale à la différence entre sa dilatation absolue et la dilatation de l'enveloppe qui le renferme.

Voici deux exemples de formules de dilatation des liquides :

Alcool

$$\omega_t = 0,0010486t + 0,0000017510t^2 + 0,00000000134518t^3$$

Sulfate de carbone

$$\omega_t = 0,0011398t + 0,0000013707t^2 + 0,00000019123t^3$$

Pour les liquides très volatils, tels que l'anhydride sulfureux liquide, le coefficient de dilatation croît rapidement avec la température et il devient même supérieur à celui des gaz.

DILATATION DE L'EAU

308. Maximum de densité de l'eau. — Le volume d'un liquide diminue quand on le refroidit, par conséquent sa densité augmente. L'eau présente une anomalie spéciale. *Vers 4°, le volume d'une masse d'eau déterminée est minimum et sa densité est maximum.* L'enveloppe dans laquelle l'eau doit être contenue ne permet d'observer directement qu'un maximum de densité *apparent*. Si l'on refroidit simultanément, à partir de 15° environ, un thermomètre à mercure et un tube thermométrique contenant de l'eau, on voit le niveau des liquides baisser d'abord à la fois dans les deux thermomètres. A un certain

moment, lorsque le thermomètre à mercure marque un peu plus de 5°, le niveau paraît *stationnaire* dans le thermomètre à eau. Si l'on continue à refroidir les deux thermomètres, le niveau de l'eau remonte tandis que celui du mercure continue à baisser. *Le volume apparent de l'eau dans une enveloppe de verre est donc minimum vers 5°.*

On rend manifeste par une méthode indépendante de la dilatation de l'enveloppe le *maximum de densité* de l'eau vers 4° en prenant une éprouvette E renfermant de l'eau et entourée dans sa région moyenne par une galerie métallique R remplie de fragments de glace

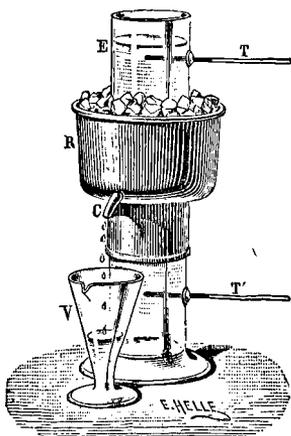


Fig. 230.

(fig. 230). Les parois de l'éprouvette sont traversées par deux ther-

momètres à mercure T et T', dont l'un est placé à la partie supérieure et l'autre vers le fond. L'eau de l'éprouvette se refroidit à la région moyenne et les deux thermomètres indiquent un abaissement de température ; le thermomètre inférieur baisse toutefois beaucoup plus vite, ce qui tient à ce que l'eau refroidie au voisinage de la galerie devient plus dense et tombe au fond. Mais lorsque le thermomètre inférieur a atteint 4°, il s'y *arrête*, tandis que le thermomètre supérieur, après avoir atteint à son tour 4°, continue à baisser. En effet, à partir du moment où toute l'eau de l'éprouvette est à 4°, les couches d'eau de la région moyenne continuent à se refroidir au-dessous de 4°, mais elles sont alors plus légères et restent à la partie supérieure.

Pendant l'hiver, le refroidissement de l'eau des lacs, des étangs, des fleuves, a lieu par la surface ; l'eau refroidie de la surface tombe au fond, tandis que l'eau du fond remonte. Lorsque toute la masse a fini par acquérir une température de 4°, la température se maintient à 4° dans les parties profondes et la vie peut y persister alors même que la surface se congèle.

309. Détermination de la température du maximum de densité de l'eau. — L'observation de la dilatation de l'eau dans un thermomètre à tige ne permet de fixer d'une façon précise la température du maximum de densité que si l'on tient compte de la dilatation de l'enveloppe.

On introduit du mercure dans une enveloppe thermométrique préalablement jaugée (306). Le mercure introduit occupe à 0° un volume S_0 ; à t^0 , il occupera un volume $S_0 + cv_0$ qu'on observe. On exprime que le volume du mercure à t^0 est égal à la capacité qu'il occupe :

$$S_0(1 + \mu_t) = (S_0 + cv_0)(1 + K_t)^{(1)}.$$

c est donné par une lecture. On déduit $1 + K_t$ de l'équation précédente. On opère à diverses températures pour obtenir les valeurs correspondantes de K_t .

On remplit ensuite d'eau la même enveloppe thermométrique et on note les divisions auxquelles s'arrête le niveau de l'eau à 0° et à t^0 .

(1) En raison de l'importance de la détermination précise de la température du maximum de la densité de l'eau, nous supposons ici μ_t et K_t rigoureusement exprimés en fonction de la température.

Soit V_0 le volume de l'eau à 0° . Désignons par n le nombre de divisions dont le liquide s'est élevé à t° . L'équation

$$V_0 (1 + \omega_t) = (V_0 + nv_0) (1 + K_t)$$

où tout est connu, sauf ω_t , peut permettre de le calculer.

$$(V_0 + nv_0) (1 + K_t)$$

est la valeur V_t du volume à t° de la masse d'eau considérée. On obtient ainsi le *volume de cette eau à diverses températures*, et on reconnaît que ce volume est minimum à 4° .

La masse de l'eau renfermée dans l'enveloppe thermométrique étant constante,

$$V_0 D_0 = V_4 D_4 = V_t D_t$$

$$D_t = D_4 \frac{V_4}{V_t}$$

La densité de l'eau à 4° ayant été prise égale à 1, sa densité à 0° est 0,99987; à 8° , la densité de l'eau est très sensiblement la même qu'à 0° . Dans une enveloppe de verre, c'est à 0° et à 10° que le volume *apparent* offre des valeurs à peu près égales. On voit qu'entre 0° et 10° un même point d'affleurement de la colonne liquide dans un thermomètre à eau correspondrait à deux températures différentes; cela exclut l'emploi de l'eau comme substance thermométrique.

Rappelons que le gramme ne représente la masse d'un centimètre cube d'eau que si cette eau est à 4° . Pour toute autre température, une masse d'un gramme occupe un volume supérieur à 1 centimètre cube.

DENSITÉS DE L'EAU ENTRE 0° ET 100°

0°	0,999871	10°	0,999747
2°	0,999969	20°	0,998259
4°	1	30°	0,995765
6°	0,999970	50°	0,98820
8°	0,999886	100°	0,95865

En maintenant par surfusion (354) de l'eau liquide dans une enveloppe thermométrique jusqu'aux environs de -20° , on a pu constater que l'eau continue à se dilater au-dessous de 0° .

Les dissolutions salines aqueuses offrent comme l'eau pure un maximum de densité. Le maximum de densité s'abaisse plus rapidement que le point de

congélation; pour l'eau de mer, le maximum de densité a lieu à $-30,7$ et la congélation à $-10,9$.

La pression abaisse la température du maximum de densité de l'eau; sous des pressions suffisamment fortes, le volume à 0^0 finit par devenir moindre qu'à 4^0 . Le maximum de densités s'abaisse de 1^0 par 50 atmosphères de pression.

310. Mesure directe de la dilatation cubique des solides. — Le thermomètre à poids a servi à déterminer le coefficient de dilatation cubique de quelques solides, non attaquables par le mercure. Le solide est introduit dans le thermomètre sous la forme d'un cylindre C, avant que le tube effilé

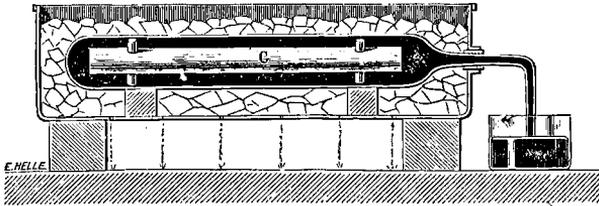


Fig. 231.

soit soudé. L'appareil est rempli de mercure à la façon ordinaire. Désignons par M la masse du mercure contenu dans l'appareil dans la glace fondante (fig. 231), par D_0 sa densité à 0^0 ; soient m la masse du solide, d_0 sa densité à 0^0 , α son coefficient de dilatation cubique; $\frac{M}{D_0} + \frac{m}{d_0}$ représente la capacité intérieure de l'enveloppe à 0^0 .

En chauffant à t^0 , il sort une masse M' de mercure que l'on pèse.

Exprimons que la somme des volumes à t^0 du mercure restant et du métal est égale à la capacité intérieure de l'enveloppe qui les renferme :

$$\frac{M - M'}{D_0} (1 + \mu t) + \frac{m}{d_0} (1 + \alpha t) = \left(\frac{M}{D_0} + \frac{m}{d_0} \right) (1 + Kt)$$

Cette équation permet de calculer le coefficient de dilatation cubique α . On a déterminé préalablement Kt .

APPLICATIONS DES DILATATIONS

311. Application du pendule aux horloges. — Une horloge est un appareil dans lequel une aiguille se déplace sur un cadran d'angles égaux en des temps égaux.

Une horloge comprend trois parties: un *moteur*, un *régulateur* et un *système de roues dentées servant d'intermédiaire* entre le moteur et le régulateur.

Moteur. — Le moteur est un poids P suspendu à une corde enroulée sur un cylindre O . Le poids tombe et fait tourner le cylindre qui porte une première roue dentée et communique son mouvement à tout le système des roues (fig. 232). Comme le mouvement d'un corps qui tombe tend à s'accélérer de plus en plus, on adapte à l'appareil un régulateur qui suspend l'action du moteur à des intervalles égaux et décompose le mouvement en une série de petits mouvements d'égale durée séparés par des intervalles de repos égaux.

Régulateur. — Le régulateur est un pendule. Le pendule arrête à chacune de ses oscillations le mouvement de l'horloge si bien que l'aiguille du cadran se meut d'un mouvement saccadé. Si l'oscillation

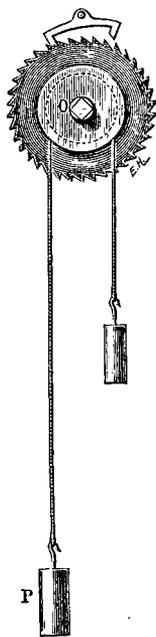


Fig. 232.

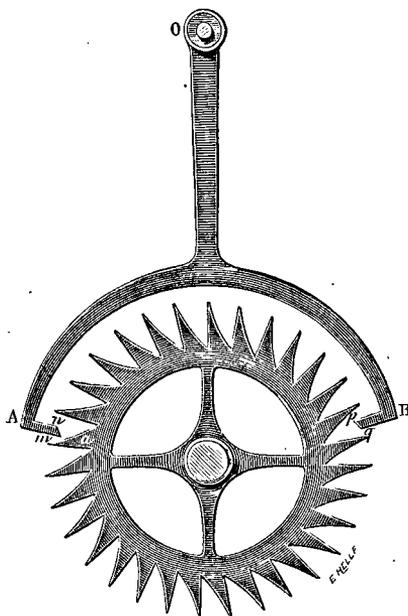


Fig. 233.

du pendule dure une seconde, chaque mouvement de l'aiguille correspond à une seconde. Le régulateur agit sur la dernière roue du rouage ou *roue d'échappement* par un mécanisme appelé *échappement*.

Échappement à ancre. — La roue d'échappement porte de longues dents légèrement recourbées, une pièce en forme d'ancre oscille avec le pendule (fig. 233). Quand le pendule oscille de gauche à droite, le

bras A de l'ancre se rapproche de la roue, s'engage entre deux dents et arrête la roue. Le pendule revient de droite à gauche et entraîne le bras A, la dent a s'échappe et la roue tourne, mais le bras B se rapproche à son tour, s'engage entre deux dents et arrête la roue. Puis le bras B s'écarte, la roue tourne, et ainsi de suite.

Le mouvement du moteur, en même temps qu'il est réglé par le pendule, entretient les oscillations de ce dernier. A cet effet, les deux extrémités A et B de l'angle présentent du côté de la roue des surfaces planes mn , pq , inclinées en sens contraires, que les dents pressent en s'échappant; le pendule reçoit ainsi une impulsion qui entretient son mouvement.

312. Pendule compensateur. — Le mouvement d'une horloge n'est régulier que si le pendule conserve une longueur constante, car la durée des oscillations croît avec la longueur (114). Supposons une horloge réglée à la température de 15° ; si la température s'élève, la longueur du pendule augmente et l'horloge retarde. On sait en effet que les horloges retardent en été et avancent en hiver. On évite ces variations par l'emploi de pendules compensateurs.

Le pendule compensateur le plus fréquemment employé est le pendule à gril.

Pendule à gril. — Le système qui relie la lentille pesante au point de suspension est formé par une tige de fer F qui porte un cadre rectangulaire; sur sa base s'élèvent deux tiges de laiton L portant en haut une traverse d'où partent deux tiges de fer descendantes. Ces deux tiges sont à leur tour reliées en bas par une traverse d'où s'élèvent deux nouvelles tiges de laiton réunies par une dernière traverse à laquelle on suspend une tige de fer F qui soutient la lentille (fig. 234).

Par cette disposition, la dilatation des tiges de fer F se fait de haut en bas et tend à abaisser la lentille, tandis que la dilatation des tiges de laiton L se fait de bas en haut et tend à la relever.

Désignons par a , b , c la longueur des tiges de fer à 0° , par m et n la longueur des tiges de laiton, f et l étant les coefficients de dilata-

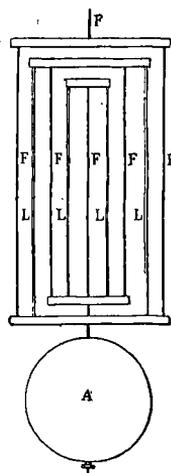


Fig. 234.

tion linéaire du fer et du laiton ; les allongements se compenseront en passant de 0° à t° si l'on a :

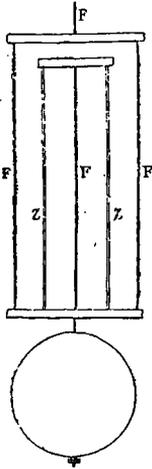


Fig. 235.

$$(a + b + c) ft = (m + n) lt.$$

$$\text{d'où } \frac{a + b + c}{m + n} = \frac{l}{f}.$$

Pour le fer et le laiton, le rapport $\frac{l}{f}$ est égal à 1,6 environ. Le résultat est indépendant de la température, donc la compensation, une fois réalisée pour une température, subsiste à toute température.

On peut employer un plus petit nombre de cadres en les construisant avec des métaux dont la différence de dilatation est plus grande que celle du fer et du laiton, par exemple avec du fer et du zinc (fig. 235).

313. Réduction des hauteurs barométriques. — *Correction relative à l'échelle.* — Le nombre N de divisions lu sur l'échelle métallique du baromètre (ou du cathétomètre) ne serait la hauteur vraie de la colonne mercurielle que si les divisions représentaient des centimètres à la température même de l'observation. Si chaque division vaut 1 centimètre à zéro, elle vaudra $1 + \lambda t$ centimètres à t° (294) ; λ étant le coefficient de dilatation linéaire du laiton ; la hauteur de la colonne soulevée sera :

$$H = N (1 + \lambda t) \text{ centimètres.}$$

La hauteur N doit être augmentée de la *dépression capillaire* ε qu'éprouve le niveau du mercure si le tube barométrique a un diamètre inférieur à 3 centimètres. La hauteur corrigée sera, en centimètres :

$$H = (N + \varepsilon) (1 + \lambda t)$$

Pression atmosphérique en dynes. — La hauteur H de la colonne mercurielle étant connue, on peut se proposer de calculer en dynes

la pression correspondante sur une surface de 1 centimètre carré ou le poids d'une colonne de hauteur H et de base 1 ; D étant la densité du mercure à la température t de l'expérience et g l'intensité de la pesanteur au lieu de l'observation, ce poids sera HDg (189).

Soient D_0 la densité 13,59 du mercure à 0° , et μ le coefficient de dilatation du mercure $\frac{1}{5550}$, la masse de la colonne de mercure sera :

$$HD = H \frac{D_0}{1 + \mu t}$$

A Paris $g = 980,97$,

II $\frac{D_0}{1 + \mu t} 980,97$ est le poids ou la pression cherchée, en dynes.

Hauteur de mercure normal. — Habituellement on ne calcule pas la pression en dynes, on se contente de noter les hauteurs de mercure. Mais le rapport des diverses hauteurs observées n'est égal au rapport des pressions atmosphériques elles-mêmes, pour des observations faites à diverses températures et *dans diverses localités*, que si elles sont toutes évaluées avec un *mercure de poids spécifique constant*. On rend les mesures comparables entre elles en calculant pour chaque mesure la hauteur H_0 de mercure normal qui exerce la pression. Le *mercure normal* est un liquide ayant le poids spécifique que possède le mercure pur à 0° , au niveau de la mer et à la latitude 45° .

Il y a donc à s'occuper de calculer la valeur de g .

Désignons par g l'intensité de la pesanteur au lieu de l'observation (latitude λ , altitude z), par G l'intensité de la pesanteur à 45° et à l'altitude 0 ; nous pouvons exprimer le poids de la même colonne de mercure par HDg ou $H_0 D_0 G$,

$$HDg = H_0 D_0 G$$

$$\text{On déduit de là } H_0 = H \frac{D}{D_0} \cdot \frac{g}{G},$$

$$\frac{D}{D_0} = \frac{1 + \mu t}{1 + \mu t}$$

$$\frac{g}{G} = (1 - 0,00255 \cos 2\lambda) \left(1 - \frac{2z}{R}\right)$$

R est le rayon de la Terre.

Pour rendre comparables les indications d'un baromètre ou des mesures manométriques effectuées en un même lieu, g ne variant pas, il suffit de faire les corrections de température et de capillarité ;

$$H D g = H_0 D_0 g$$

$$H_0 = H \frac{D}{D_0}$$

$$H_0 = \frac{(N + \varepsilon) (1 + \lambda t)}{1 + \mu t}$$

314. Corrections des densités. — La méthode du flacon à l'aide de laquelle nous avons déterminé la densité d'un corps à 0° (163) n'étant limitée, pour la précision, que par la sensibilité de la balance employée, il convient de savoir tenir compte dans les pesées de la poussée de l'air et de la température.

C'est ce que nous allons faire en exprimant que dans les pesées successives l'effort exercé par les corps placés dans l'un des plateaux de la balance fait équilibre à l'effort exercé par la tare dans l'autre plateau.

Nous supprimerons dans les diverses équations le facteur g qui serait commun aux deux membres ; nous supprimerons aussi les facteurs l et l' qui représentent les longueurs des bras de levier du fléau, ces facteurs devant également disparaître des résultats, par division.

Solides. — Appelons V_0 le volume du corps à 0°, d_0 sa densité, e_0 la densité de l'eau à 0°, δ la densité des poids, et a la densité de l'air dans les conditions de l'expérience, t la température de la balance, K le coefficient de dilatation du corps, F le poids en grammes du flacon rempli et plongé dans l'air, M , M' , etc... les poids marqués.

$$\text{Premier équilibre} \quad F + V_0 d_0 - V_0 (1 + Kt) a = \text{Tare.}$$

$$\text{Deuxième équilibre} \quad F + M \left(1 - \frac{a}{\delta}\right) = \text{Tare.}$$

$$\text{Troisième équilibre} \quad F - V_0 e_0 + V_0 d_0 + M' \left(1 - \frac{a}{\delta}\right) = \text{Tare.}$$

Retranchons la deuxième équation de la première, puis la troisième de la première :

$$V_0 d_0 - V_0 (1 + Kt) a = M \left(1 - \frac{a}{\delta}\right)$$

$$V_0 e_0 - V_0 (1 + Kt) a = M' \left(1 - \frac{a}{\delta}\right)$$

Divisons :

$$\frac{d_0 - a(1 + Kt)}{e_0 - a(1 + Kt)} = \frac{M}{M'}$$

$$\text{d'où } d_0 = \frac{M}{M'} e_0 + a(1 + Kt) \left(1 - \frac{M}{M'}\right)$$

Liquides. — Afin de n'avoir à faire qu'une tare et d'opérer à charge constante (127), on commence par faire la tare du flacon vide et d'un poids M_2 supérieur au poids de celui des deux liquides qui est le plus lourd. F est ici le poids en grammes du flacon vide dans l'air.

$$\text{Premier équilibre} \quad F + M_2 \left(1 - \frac{a}{\delta}\right) = \text{Tare.}$$

$$\text{Deuxième équilibre} \quad F + V_0 d_0 - V_0 (1 + Kt) a + M_1 \left(1 - \frac{a}{\delta}\right) = \text{Tare.}$$

$$\text{Troisième équilibre} \quad F + V_0 e_0 - V_0 (1 + Kt) a + M'_1 \left(1 - \frac{a}{\delta}\right) = \text{Tare.}$$

Retrançons la deuxième équation de la première, puis la troisième équation de la première, et, pour nous conformer à nos notations antérieures (163), remplaçons $M_2 - M_1$ par M , et $M_2 - M'_1$ par M'' ,

$$V_0 d_0 - V_0 (1 + Kt) a = M \left(1 - \frac{a}{\delta}\right)$$

$$V_0 e_0 - V_0 (1 + Kt) a = M'' \left(1 - \frac{a}{\delta}\right)$$

Divisons :

$$\frac{d_0 - a(1 + Kt)}{e_0 - a(1 + Kt)} = \frac{M}{M''}$$

$$d_0 = \frac{M}{M''} e_0 + a(1 + Kt) \left(1 - \frac{M}{M''}\right)$$

Souvent on néglige Kt .

315. Efforts exercés par des pièces métalliques sous l'influence des variations de température. — L'effort avec

lequel un corps solide ou liquide qu'on chauffe tend à augmenter de volume est extrêmement considérable, car il est égal à celui qu'il faudrait employer pour le comprimer d'une quantité égale à sa dilatation; on peut en dire autant de l'effort exercé dans la contraction. On cite ordinairement l'exemple suivant d'utilisation de cette force. Les murs

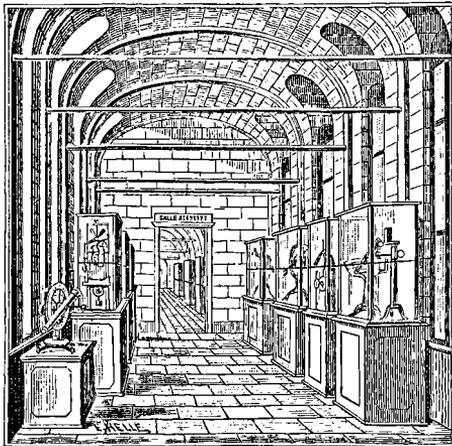


Fig. 236.

latéraux d'une galerie du Conservatoire des Arts et Métiers s'étaient écartés de la verticale sous le poids du plafond qu'ils soutenaient; on fit traverser par des barres de fer les murs dans leur partie élevée (fig. 236); les extrémités de ces barres étaient filetées et terminées au dehors par des écrous qui s'appuyaient sur des plaques de fonte embrassant de larges parties de la surface extérieure des murs.

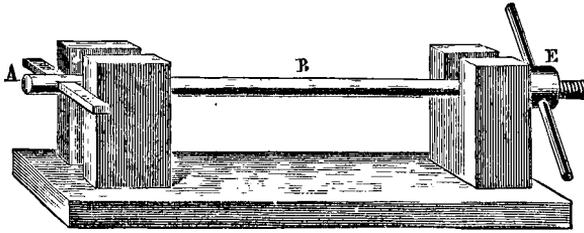


Fig. 237.

Les barres furent chauffées sur toute leur longueur, elles s'allongèrent, et les écrous furent serrés. Le retrait des barres par le refroidissement amena un redressement partiel des murs; les alternatives d'échauffement et de refroidissement furent répétées jusqu'à ce qu'on eût ramené les deux murs à la verticale.

La figure 237 représente une disposition expérimentale reproduisant à peu près les conditions précédentes et destinée, à montrer l'effort énergique exercé par une barre métallique qui se contracte. L'extrémité filetée d'une barre métallique AB, comprise entre deux supports fixes, est munie d'un écrou E que l'on serre au moment où l'on chauffe la barre; la contraction de la barre due au refroidissement arrache les supports de la plate-forme sur laquelle ils sont assujettis.

Dans les ajustements où entrent des métaux susceptibles d'être soumis à des variations de température étendues, la disposition des pièces doit leur permettre de se dilater librement (barreaux des fenêtres grillées, lames de zinc des toitures, poutres des ponts métalliques, tuyaux métalliques qui s'emboîtent, rails des chemins de fer, etc.)

Applications. — 1° A quelle température les thermomètres Fahrenheit et centigrade marquent-ils le même degré?

2° Dans l'échelle de Delisle on marquait 0° au point d'ébullition et 150 à la glace fondante. Convertir 50° Delisle en degrés centigrades.

3° Réduire à 0° une hauteur barométrique égale à 75,5 à 15°.

4° Quelle variation de longueur éprouve en passant de 0° à 40° une longueur de rails en fer ayant 1000 mètres à zéro?

5° On lit un intervalle de 87,2 centimètres à 28° entre deux points sur une échelle de laiton graduée à 0°. Quelle est la vraie distance?

6° Deux barres de laiton et de fer sont juxtaposées et fixées invariablement à une de leurs extrémités. On les place dans la glace et on marque un trait perpendiculaire à la longueur à la fois sur les deux barres et à une distance de 1 mètre de l'extrémité fixée. On chauffe l'ensemble à 100°, le laiton se dilate davantage et les traits s'écartent de 0^m74. Le coefficient de dilatation du fer étant 0.0000118, quel est le coefficient λ de dilatation du laiton?

7° Une sphère de fer de 5,01 centimètres de diamètre à 0° s'appuie sur un anneau de zinc de 5 centimètres de diamètre. A quelle température la sphère passera-t-elle?

8° Dans un four dont on veut obtenir la température, on place une barre de métal ayant à 0° une longueur de 1^m40. La longueur de la barre devient 1^m407. Le coefficient de dilatation du métal est 0,000012. Quelle est la température du four?

9° La densité de l'argent est 10,31 à 0°. Son coefficient de dilatation cubique est 0,000058. Trouver sa densité à 150°?

10° La densité du mercure est 13,6 à 0° : quelle est-elle à 20°?

11° Un tube cylindrique en verre de 1 mètre de longueur à 0° et de 2 centimètres de diamètre est rempli de mercure sur une longueur de 0^m95. A quelle température sera-t-il entièrement plein?

12° Étant donné un vase en verre, y introduire un volume de mercure à 0° tel que la portion de capacité qui restera libre demeure la même à t° qu'à 0°. Coefficient de dilatation du mercure $\frac{1}{5550}$. Coefficient de dilatation cubique du verre $\frac{1}{38700}$.

13° Un tube capillaire a $\frac{1}{5}$ de millimètre de diamètre : quel est le volume V₀ du réservoir qu'il faut lui souder pour avoir un thermomètre dont le degré ait 1 centimètre de longueur?

14° Le tube d'un thermomètre a $\frac{1}{10}$ de millimètre de diamètre, le réservoir est cylindrique et a 1 centimètre de haut sur 2 millimètres de rayon. Quelle est la longueur du degré?

15° Un thermomètre centigrade est plongé jusqu'au degré 25 dans un bain liquide, le mercure s'élève jusqu'au degré 140. Quel degré marquerait ce thermomètre s'il était plongé dans le liquide chaud jusqu'au niveau où s'arrête le mercure? La température extérieure est 15°.

16° Un thermomètre à mercure entièrement plongé dans un liquide de température uniforme marque 95°. Quelle température marquerait-il si l'on plongeait seulement dans le liquide le réservoir et le bas de la tige jusqu'au degré 6? La température extérieure est 12°.

17° On forme un thermomètre à eau avec un thermomètre à tige. Il marque 20° dans la glace fondante, 85° dans un bain liquide à 45°. Calculer la dilatation moyenne de l'eau μ_{45} de l'eau à 0° et 45°.

18° Un thermomètre à échelle arbitraire marque 12° dans la glace fondante et 194° dans la vapeur d'eau bouillante sous une pression de 75 centimètres de mercure. Quel degré marquera ce thermomètre à 40° centigrades?

19° Un vase en verre est rempli à 0° par 120 grammes de mercure et un morceau de fer de 100 grammes. On chauffe à 50°. Quel est le poids du mercure qui sort? Densité du fer, 7,78; densité du mercure 13,59; coefficient de dilatation cubique du fer, $\frac{1}{28200}$, du mercure $\frac{1}{5550}$, du verre $\frac{1}{38700}$.

20° Un aréomètre à graduation uniforme (genre Baumé) marque 0 degré dans l'eau pure à 0°, 40 degrés dans un certain liquide de densité 1,52 à la même température. A quelle division s'arrêtera-t-il dans ce dernier liquide à la température de 60°? Coefficient de dilatation cubique du verre, 0,000026; coefficient de dilatation du liquide, 0,000836. On négligera les effets capillaires et l'on admettra que la densité de l'eau à 0° ne diffère pas sensiblement de 1.

21° Une tige de fer F, verticale, fixée à son extrémité supérieure en un point A, est terminée à sa partie inférieure par un étrier E qui supporte un vase cylindrique de verre M renfermant du mercure. La longueur totale de la tige et de l'étrier est 0^m75.

Le vase de verre a 2 centimètres carrés de section intérieure. Quel poids de mercure faut-il verser pour que le centre de gravité du pendule reste à une distance constante de A (*pendule compensateur de Graham*)? On considérera le poids du fer et le poids du cylindre de verre comme négligeables par rapport au poids du mercure.

DILATATION DES GAZ

Rappelons qu'à *température constante*, les volumes et les pressions d'un gaz qui suit la loi de Mariotte sont liés par l'équation :

$$VH = V'H'$$

DILATATION D'UN GAZ SOUS PRESSION CONSTANTE

316. Relation entre les volumes et les températures. — Portons à t^0 , sous la pression H , une masse de gaz dont le volume est V_0 à 0^0 , chaque unité de volume éprouve la même dilatation a , par conséquent l'accroissement de volume est proportionnel au volume initial, c'est $V_0 a$. Le volume du gaz dilaté a donc pour expression :

$$V = V_0 + V_0 a = V_0 (1 + a)$$

L'expérience prouve que pour les gaz difficilement liquéfiables (hydrogène, air, azote), l'accroissement de volume est proportionnel à l'élévation de température mesurée avec un thermomètre normal (292), par suite $a = \alpha t$

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

α est le *coefficient de dilatation du gaz à pression constante*, c'est l'accroissement de volume de l'unité de volume pour une élévation de température de 1^0 ; $1 + \alpha t$ se nomme le *binôme de dilatation*.

Le volume V' de la même masse de gaz à t'^0 sous la même pression H est lié au volume V_0 par l'équation :

$$V' = V_0 (1 + \alpha t').$$

$$\text{Par suite } \frac{V}{1 + \alpha t} = \frac{V'}{1 + \alpha t'} = V_0$$

$$\text{d'où } \frac{V'}{V} = \frac{1 + \alpha t'}{1 + \alpha t}$$

$$V' = V [1 + \alpha (t' - t)]$$

Sous une même pression, les volumes d'une même masse de gaz à diverses températures t et t' sont donc proportionnels aux *binômes de dilatation*.

317. Relation entre les volumes, les températures et les pressions. — Soit une masse de gaz déterminée occupant un volume V à t^0 sous la pression H , puis un volume V' à t'^0 sous la pression H' .

Le gaz de volume V ramené à 0^0 sous la pression H occupe un volume $\frac{V}{1 + \alpha t}$; le gaz de volume V' ramené à 0^0 sous la pression H' occupe un volume $\frac{V'}{1 + \alpha t'}$, car le *coefficient de dilatation est indépendant de la pression* sous laquelle la dilatation se fait (si les pressions ne sont pas trop différentes).

Nous avons le droit d'appliquer la loi de Mariotte (204) à cette masse de gaz qui occupe à la même température un volume $\frac{V}{1 + \alpha t}$ sous la pression H , puis un volume $\frac{V'}{1 + \alpha t'}$ sous la pression H' .

De là la relation

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

Cette relation permet de trouver le volume V' à la température t' et à la pression H' d'une masse de gaz dont on connaît le volume V à la température t et à la pression H .

$\frac{VH}{1 + \alpha t}$ est le volume du gaz ramené à 0^0 et à l'unité de force élastique.

318. Équation des gaz parfaits. — La relation :

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

est appelée équation des gaz parfaits ; elle exprime que, *sous pression constante*, le volume d'un gaz est proportionnel au binôme de dilatation (loi de Gay-Lussac). Elle exprime d'autre part, qu'à *température constante*, les volumes d'une même masse gazeuse sont inversement proportionnels aux forces élastiques (loi de Mariotte).

Les gaz auxquels s'applique la relation (1) suivent rigoureusement la loi de Mariotte et la loi de Gay-Lussac, on les appelle gaz parfaits. L'oxygène, l'azote, l'air atmosphérique, l'hydrogène, dans les conditions usuelles de température et de pression, se comportent à peu près comme des gaz parfaits.

L'équation des gaz parfaits peut s'écrire :

$$\frac{VH}{1 + \alpha t} = V_0 H_0, \quad (2)$$

où V_0 et H_0 représentent le volume et la pression de la masse de gaz à 0° .

Ajoutons que le coefficient α est sensiblement le même pour les différents gaz (loi de Charles) (au moins pour les gaz difficilement liquéfiables).

Dans les formules qui vont suivre nous ne considérerons que des gaz parfaits ⁽¹⁾.

319. Extension de la loi du mélange des gaz. — Soit un mélange de plusieurs masses d'un même gaz (ou de gaz différents sans action mutuelle) occupant l'une un volume v à t^0 , une autre un volume v' à t'^0 ,... sous la même pression H .

Si nous ramenons ces diverses masses à 0° sous la pression constante H , les volumes respectifs deviennent $\frac{v}{1 + \alpha t}$, $\frac{v'}{1 + \alpha t'}$,... et la somme de ces vo-

(1) L'équation $\frac{VH}{1 + \alpha t} = V_0 H_0$, que l'on écrit souvent $VH = R(1 + \alpha t)$, ne s'applique pas rigoureusement aux gaz réels ; tous les gaz s'en écartent plus ou moins, surtout au voisinage de leur point de liquéfaction. En prenant pour point de départ diverses hypothèses faites sur les forces moléculaires dans les fluides, Van der Waals en 1873 a proposé une formule qui représente les divers phénomènes observés en faisant varier la pression, le volume et la température d'une masse d'un gaz quelconque, même au voisinage du point de liquéfaction.

L'équation de Van der Waals s'écrit :

$$(V - b) \left(H + \frac{a}{V^2} \right) = R(1 + \alpha t)$$

a et b sont deux constantes qui varient avec la nature du gaz. Elles ont une valeur très petite pour l'hydrogène. Pour un gaz parfait, a et b seraient nuls, et l'on retrouverait l'équation $VH = R(1 + \alpha t)$ qui se présente ainsi comme une équation limite.

lumes est le volume total V . La masse totale prendrait à 0^0 , sous la pression H_0 , un volume V_0 donné d'après la loi de Mariotte par l'équation :

$$V_0 H_0 = V H$$

$$\text{on a donc } V_0 H_0 = \left(\frac{v}{1 + \alpha t} + \frac{v'}{1 + \alpha t'} + \frac{v''}{1 + \alpha t''} \right) H.$$

Si la même masse totale de gaz, dans d'autres conditions expérimentales, est formée de plusieurs parties occupant des volumes v_1 à t_1 , v'_1 à t'_1 ..., sous une pression commune H_1 ,

$$\text{on aura de même } V_0 H_0 = \left(\frac{v_1}{1 + \alpha t_1} + \frac{v'_1}{1 + \alpha t'_1} \dots \right) H_1$$

$$\text{Par suite } \left(\frac{v}{1 + \alpha t} + \frac{v'}{1 + \alpha t'} \dots \right) H = \left(\frac{v_1}{1 + \alpha t_1} + \frac{v'_1}{1 + \alpha t'_1} \dots \right) H_1$$

Chacun des deux membres de l'équation représente le volume de la masse totale ramenée à 0^0 et à l'unité de force élastique.

Considérons enfin plusieurs masses d'un même gaz (ou de gaz différents sans action mutuelle) occupant séparément un volume v à t et H , un volume v' à t' et H' , les volumes de ces masses partielles ramenées à 0^0 et à la pression 1 seront :

$$\frac{vH}{1 + \alpha t}, \quad \frac{v'H'}{1 + \alpha t'} \dots$$

Le volume total à 0^0 et à la pression 1 de toutes ces masses sera la somme :

$$\frac{vH}{1 + \alpha t} + \frac{v'H'}{1 + \alpha t'} \dots$$

Supposons la même masse totale subdivisée en masses partielles de volumes v_1 à t_1 et H_1 , v'_1 à t'_1 et H'_1 etc., le volume à 0^0 et à la pression 1 de toutes ces masses sera

$$\frac{v_1 H_1}{1 + \alpha t_1} + \frac{v'_1 H'_1}{1 + \alpha t'_1} \dots$$

Comme le volume total à 0^0 et à la pression 1 doit rester invariable, quelle que soit la distribution initiale, on aura l'égalité :

$$\frac{vH}{1 + \alpha t} + \frac{v'H'}{1 + \alpha t'} + \dots = \frac{v_1 H_1}{1 + \alpha t_1} + \frac{v'_1 H'_1}{1 + \alpha t'_1} + \dots$$

$$\text{ou } \sum \frac{vH}{1 + \alpha t} = \text{cte}$$

320. Relation entre les densités et les températures. —

Soit une masse de gaz sous une pression constante. Son volume augmentant quand la température s'élève, la masse de l'unité de volume diminue. Appelons D_0 la masse spécifique ou la densité du gaz à 0^0 , D sa densité à t^0 , D' sa densité à t'^0 .

Puisque la masse reste constante, quelle que soit sa température,

$$V_0 D_0 = VD,$$

$$\text{or } V = V_0 (1 + \alpha t)$$

$$\text{donc } V_0 D_0 = V_0 (1 + \alpha t) D$$

$$\text{par suite } D = \frac{D_0}{1 + \alpha t}$$

$$\text{de même } D' = \frac{D_0}{1 + \alpha t'}$$

$$\text{et } \frac{D}{D'} = \frac{1 + \alpha t'}{1 + \alpha t}.$$

Sous une même pression, les densités d'un gaz aux températures t et t' sont en raison inverse des binômes de dilatation.

321. Relation entre les densités, les températures et les pressions. — Soit une masse de gaz ayant à t^0 et t'^0 des densités D et D' ; soient H et H' les pressions correspondantes; les densités de cette masse ramenée à 0^0 seront $D(1 + \alpha t)$ sous la pression H , et $D'(1 + \alpha t')$ sous la pression H' ; la loi de Mariotte peut s'énoncer: à une température constante, les densités d'un gaz sont *proportionnelles* aux pressions qu'il supporte (204); on aura donc :

$$\frac{D(1 + \alpha t)}{D'(1 + \alpha t')} = \frac{H}{H'},$$

$$\text{ou } \frac{D(1 + \alpha t)}{H} = \frac{D'(1 + \alpha t')}{H'}$$

Relation qui permettra de calculer la densité à t' et H' quand on connaîtra la densité à t et H .

322. Calcul du volume ou de la densité d'une masse gazeuse, dans les conditions normales de température et de pression. — On dit habituellement qu'un gaz se trouve *dans les conditions normales de température et de pression* quand sa température est 0^0 et que sa force élastique fait équilibre à 76 centimètres de mercure. L'équation des gaz parfaits (318) appliquée à un gaz de volume V à t^0 et H et de volume V_0 à 0^0 et 76, s'écrit :

$$\frac{VH}{1 + \alpha t} = V_0 \cdot 76.$$

Elle donne le volume V_0 de la masse gazeuse à la température 0^0 et à la pression 76.

$$V_0 = \frac{V}{1 + \alpha t} \cdot \frac{H}{76}$$

De même, la relation $\frac{D(1 + \alpha t)}{H} = \frac{D_0}{76}$

permet de calculer la densité D_0 à 0^0 et à la pression 76, quand on connaît la densité D à t' et H .

ACCROISSEMENT DE PRESSION SOUS VOLUME CONSTANT

Relations entre les forces élastiques et les températures

323. La force élastique d'un gaz chauffé de 0^0 à t^0 augmente si le volume V_0 est maintenu constant (272).

Soit Π_0 la force élastique à 0^0 d'une masse de gaz occupant un volume V_0 . L'accroissement de force élastique par l'échauffement est proportionnel à la force élastique initiale⁽¹⁾ et pourra être représenté par $H_0 b$; pour l'hydrogène, on *admet* qu'il est proportionnel à l'élévation de température (d'après la définition du thermomètre normal [292]); par conséquent $b = \beta t$. $H - H_0 = H_0 \beta t$. *Pour les gaz difficilement liquéfiables*, on a aussi $b = \beta t$ et β est sensiblement le même que pour l'hydrogène.

La force élastique H à t^0 sera donc exprimée par :

$$H = \Pi_0 (1 + \beta t).$$

β est le *coefficient d'augmentation de pression à volume constant* ou le centième de l'accroissement de force élastique de l'unité de force élastique entre les deux points fixes de l'échelle centigrade.

Pour la même masse de gaz occupant le volume V_0 , on aura de même à t'^0 :

$$H' = H_0 (1 + \beta t')$$

$$\text{Par suite } \frac{H}{H'} = \frac{1 + \beta t}{1 + \beta t'}$$

(1) On peut supposer la masse totale du gaz décomposée en unités de masse occupant séparément à 0^0 le volume total V_0 ; d'après la loi du mélange des gaz, la force élastique H_0 est la somme des forces élastiques de ces masses partielles, elle est proportionnelle à la masse du gaz. L'accroissement de force élastique par l'échauffement est de la même façon égal à la somme des accroissements des forces élastiques des diverses masses et proportionnel à la masse ou à la force élastique initiale.

H et H' sont les forces élastiques à t^0 et à t'^0 d'une même masse de gaz de volume constant.

324. Relation entre le volume, la température et la pression. — Soit une masse de gaz de volume V à t^0 et H : ramenons-la à 0^0 en la maintenant au volume V , sa force élastique devient $\frac{H}{1 + \beta t}$; si cette même masse de volume V' à t' et H' est ramenée à 0^0 sous le volume V' , sa force élastique devient $\frac{H'}{1 + \beta t'}$. En appliquant la loi de Mariotte à ces deux masses égales de même température :

$$\frac{VH}{1 + \beta t} = \frac{V'H'}{1 + \beta t'} = V_0 \gamma_6.$$

On peut dire que chacun des deux membres représente la force élastique du gaz ramené à 0^0 sous l'unité de volume. En comparant (318) à l'équation (2), on voit que $\beta = \alpha$. On reconnaît que β n'est rigoureusement égal à α que pour les gaz parfaits ⁽¹⁾. Toutefois la différence est très faible pour les gaz peu compressibles et en pratique nous admettons que $\beta = \alpha$.

(1) *Comparaison des coefficients α et β .* — Considérons une masse de gaz occupant à t^0 un volume V_0 sous la pression H . Ramenons-la à 0^0 en conservant son volume V_0 , sa pression deviendra H_0 :

$$H_0 = \frac{H}{1 + \beta t}$$

$$\text{d'où } V_0 H_0 = \frac{V_0 H}{1 + \beta t}$$

Considérons la même masse de gaz à t^0 à la pression H_0 , elle a un volume V . Ramenons-la à 0^0 en maintenant sa pression constante :

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

Multiplions les deux membres par H_0 ,

$$V_0 H_0 = \frac{V H_0}{1 + \alpha t}$$

$$\text{On a donc } \frac{V_0 H}{1 + \beta t} = \frac{V H_0}{1 + \alpha t}$$

or V_0 et H , V et H_0 se rapportent à une même masse de gaz à une même température t ; si la loi de Mariotte est exacte, on aura $V_0 H = V H_0$ et par suite $\beta = \alpha$. D'après l'étude de la compressibilité des gaz à température constante, on sait que $V_0 H$ est un peu inférieur à $V H_0$ (pour l'air, l'acide carbonique, etc.), puisque H est supérieur à H_0 , donc β est inférieur à α .

Toutefois la différence est très faible pour les gaz peu compressibles, et en pratique on peut admettre que $\beta = \alpha$.

325. Extension de la loi du mélange des gaz. — Soit une masse totale de gaz formée de plusieurs parties de volume v à t^0 et H , de volume v' à t'^0 et H' , etc. Ramenons-les séparément à 0^0 et au volume 1, les forces élastiques seront respectivement :

$$\frac{vH}{1 + \beta t}, \quad \frac{v'H'}{1 + \beta t'} \dots$$

la force élastique totale sera la somme :

$$\frac{vH}{1 + \beta t} + \frac{v'H'}{1 + \beta t'} \dots$$

Pour une autre distribution des masses nous avons de même :

$$\frac{v_1 H_1}{1 + \beta t_1} + \frac{v'_1 H'_1}{1 + \beta t'_1} \dots$$

La force élastique de la masse totale à 0^0 sous l'unité de volume devant être la même dans les deux cas, on obtiendra :

$$\sum \frac{vH}{1 + \beta t} = \sum \frac{v_1 H_1}{1 + \beta t_1}$$

Ou, en confondant α et β :

$$\sum \frac{vH}{1 + \alpha t} = C^{10}$$

MESURE DE LA DILATATION DES GAZ

326. Expériences de Gay-Lussac. — L'appareil employé par Gay-Lussac pour mesurer l'accroissement de volume de l'unité de volume d'un gaz *sous pression constante* est un thermomètre à gros réservoir A muni d'un tube capillaire divisé en parties d'égale capacité.

Jaugeage du thermomètre. — On détermine d'abord le rapport $\frac{v_0}{V_0}$ du volume d'une division au volume du réservoir jusqu'au zéro de la graduation, ces deux volumes étant pris à 0^0 .

A cet effet, on pèse l'appareil vide, puis rempli de mercure à 0^0 jusqu'à l'origine des divisions; la différence des masses est M ; on ajoute ensuite du mercure jusqu'à la division b à 0^0 ; m est l'accroissement de la masse; soit D_0 la densité du mercure à 0^0 ,

$$\frac{M}{D_0} = V_0, \quad \frac{m}{D_0} = bv_0, \quad \frac{m}{bM} = \frac{v_0}{V_0}$$

Expérience. — On remplit l'appareil d'air bien sec et on introduit dans le tube capillaire un index de mercure a qui sépare le gaz intérieur de l'air extérieur.

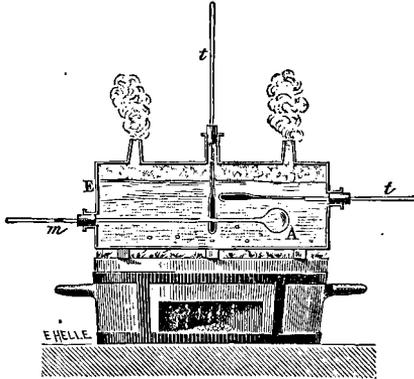


Fig. 238.

On porte ensuite l'appareil dans une caisse E remplie de glace fondante et on dispose la tige horizontalement (fig. 238); la tige étant ouverte à son extrémité, les variations de volume s'opèrent sous la pression extérieure. Le gaz se contracte; soit V_0 le volume qu'il occupe jusqu'à la division où s'arrête l'index a , H la pression extérieure et par suite celle du gaz.

La glace est remplacée par de l'eau que l'on chauffe graduellement jusqu'à l'ébullition; le gaz se dilate, son volume apparent devient $V_0 + nv_0$, et son volume réel $(V_0 + nv_0)(1 + Kt)$; K désigne le coefficient de dilatation cubique du verre (306), la pression extérieure est alors H' (peu différente de H). La température est marquée par des thermomètres t .

Calcul de la dilatation. — 1° Si l'on négligeait la dilatation du verre et la variation de la pression extérieure, la dilatation de l'unité de volume serait $\frac{nv_0}{V_0}$, car nv_0 serait l'accroissement total de volume.

2° Tenons compte de la dilatation du verre et supposons la pression extérieure invariable: nous pouvons écrire que le volume du gaz dilaté à 100° est égal à la capacité intérieure de l'enveloppe à la même température. Soit α_{100} l'accroissement de volume de l'unité de volume du gaz, entre les deux températures fixes de la glace fondante et de l'eau bouillante :

$$V_0(1 + \alpha_{100}) = (V_0 + nv_0)(1 + 100K)$$

$$\alpha_{100} = \frac{(V_0 + nv_0)(1 + 100K) - V_0}{V_0}$$

3° Pour faire le calcul complet en tenant compte à la fois de la dilatation du verre et de la variation de pression extérieure, nous

supposerons ramené à 0°, en lui conservant la pression H', le gaz de la deuxième phase de l'expérience et nous appliquerons la loi de Mariotte à la masse gazeuse ramenée ainsi à 0° dans les deux cas :

$$V_0 H = \frac{(V_0 + nv_0)(1 + 100K)}{1 + \alpha_{400}} H'$$

Cela revient à évaluer pour les deux phases de l'expérience l'expression $\frac{VH}{1 + \alpha t}$ dont nous avons établi antérieurement la constance (317).

$$\text{Nous tirons de là } \alpha_{400} = \frac{(V_0 + nv_0)(1 + 100K) \frac{H'}{H} - V_0}{V_0}$$

On voit qu'il faut connaître $\frac{v_0}{V_0}$ et K; on observe n, T, H et H'.

Le coefficient K est le triple du coefficient de dilatation linéaire.

On peut aussi déterminer K comme nous avons appris à le faire à propos de la dilatation des liquides (304).

Résultats. — Entre 0° et 100°, la dilatation de l'air à pression constante a été trouvée proportionnelle à la température du thermomètre à mercure. En opérant à différentes températures t, t', t'' du thermomètre à mercure, on constate que $\frac{\alpha_t}{t}$ est sensiblement constant.

On a pris pour coefficient de dilatation $\frac{\alpha_{400}}{100}$, α_{400} représentant la dilatation de l'unité de volume d'air entre les deux températures de la glace fondante et de la vapeur d'eau bouillante.

Le coefficient de dilatation a été trouvé le même pour les différents gaz.

Les expériences de Gay-Lussac l'avaient conduit à un coefficient trop fort 0,00375; cela provenait surtout d'une dessiccation imparfaite de l'enveloppe; la vapeur d'eau condensée à la température ordinaire sur les parois du verre ne se dégage que très imparfaitement quand on a fait le vide à la température ordinaire, elle se dégage plus complètement quand on chauffe; en se joignant à la masse gazeuse dans la deuxième partie de l'expérience, elle augmentait l'accroissement de volume attribué à la dilatation.

327. Expériences de Regnault. — Pour l'air et les gaz difficilement liquéfiables, entre les mêmes limites de température, le coefficient de dilatation sous pression constante est numériquement égal au coefficient d'aug-

mentation de pression à volume constant (324). Nous insisterons sur la détermination de l'augmentation de force élastique à volume constant qui présente une importance spéciale en thermométrie.

Coefficient d'augmentation de pression sous volume constant. — Description de l'appareil (fig. 239). — Dans une étuve métallique où l'on

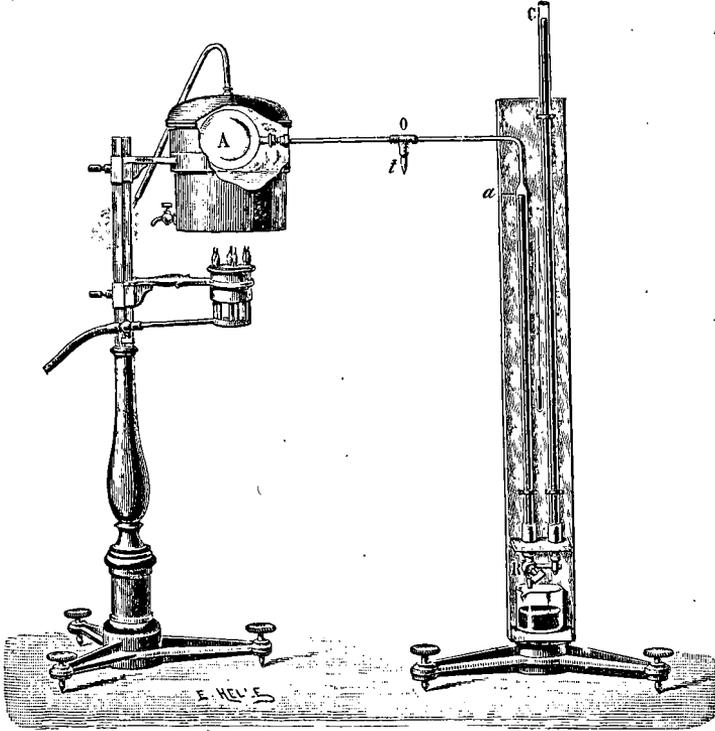


Fig. 239.

peut faire bouillir de l'eau ou mettre de la glace fondante est placé un ballon de verre à col effilé A, d'environ 1 litre de capacité, communiquant par un

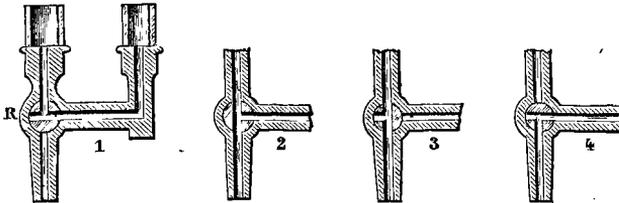


Fig. 240.

tube capillaire avec un manomètre à air libre. Les deux branches du manomètre sont reliées entre elles par une pièce de fer qui porte un robinet à

trois voies R (fig. 240). Le tube capillaire qui va du ballon au manomètre est formé de deux parties qui se raccordent par une tubulure métallique o à trois branches. Dans la troisième branche est mastiqué un tube de verre t par lequel l'appareil est relié à des tubes desséchants. Ces tubes desséchants communiquent eux-mêmes soit avec une machine pneumatique, soit avec un réservoir à gaz.

Remplissage du ballon. — On commence par dessécher la capacité intérieure du ballon. A cet effet, ayant versé du mercure dans le manomètre, on tourne le robinet à trois voies de façon à intercepter la communication entre les deux branches. Puis, l'étuve étant remplie de vapeur d'eau bouillante, on fait le vide dans le ballon par le tube t et on laisse rentrer du gaz sec. Cette double opération du vide et de la rentrée du gaz dans le ballon chauffé à 100° est répétée environ 30 fois, et chaque fois, le gaz sec entraîne un peu de la vapeur d'eau condensée sur le verre.

Première phase de l'expérience. Gaz à 0° . — Le gaz étant rentré une dernière fois, on entoure le ballon de glace fondante et on lui laisse prendre la température zéro tout en maintenant la communication avec le réservoir à gaz. Le gaz du ballon se contracte, il en pénètre une nouvelle quantité qui a traversé les tubes desséchants. Le robinet à trois voies ayant été tourné de façon à faire communiquer entre elles les deux branches du manomètre (position 1, fig. 240), on verse du mercure dans le manomètre jusqu'à ce que le niveau atteigne un point de repère a voisin du tube capillaire. Le niveau est le même dans les deux branches si la pression dans le ballon est la pression extérieure. On fond à la lampe l'extrémité du tube de verre t . On note la pression barométrique II et la température extérieure θ .

Le gaz ainsi isolé est à la pression II, il occupe le volume V_0 du ballon à zéro et le très petit volume v du tube capillaire compris entre la sortie du ballon et le trait de repère a ; ce volume v est à la température θ .

Deuxième phase de l'expérience. Gaz à 100° . — On remplace dans l'étuve la glace par de l'eau que l'on chauffe et que l'on porte à l'ébullition; le ballon est ainsi entouré de vapeur d'eau bouillante. Le gaz se dilate, en même temps qu'il augmente de force élastique et refoule le mercure du manomètre. En versant graduellement du mercure par la branche ouverte du manomètre, on ramène le niveau au trait de repère a . La différence des niveaux du mercure dans les deux branches atteint la hauteur h à la température T de la vapeur d'eau bouillante déterminée d'après la hauteur barométrique (281).

La masse gazeuse occupe maintenant les volumes $V_0(1 + KT)$ à la température T et v à la température θ sous la pression II'.

II' = pression extérieure + h .

Calcul (1). — Dans la première phase de l'expérience, la masse gazeuse est presque tout entière à 0° ; si l'on porte à la même température sans change-

(1) On pourrait appliquer la relation $\sum \frac{vII}{1 + \beta t} = C^{10}$ et écrire immédiatement l'égalité qui donne β .

ment de pression le volume additionnel v qui devient ainsi $\frac{v}{1 + \alpha\theta}$, la masse gazeuse totale à 0^0 aura un volume $V_0 + \frac{v}{1 + \alpha\theta}$, sous la pression H .

Dans la *deuxième phase* de l'expérience, la même masse est presque tout entière à T^0 , si l'on porte à la même température sans changement de pression le volume additionnel v qui devient ainsi $\frac{v(1 + \alpha T)}{1 + \alpha\theta'}$, la masse gazeuse totale à T^0 aura un volume $V_0(1 + KT) + \frac{v(1 + \alpha T)}{1 + \alpha\theta'}$ sous la pression H' . Ramenons cette masse totale à 0^0 sans changer son volume, sa force élastique devient $\frac{H'}{1 + \beta_T}$.

La masse gazeuse se trouvant ainsi à 0^0 dans les deux cas, nous lui appliquerons la loi de Mariotte en multipliant les volumes par les pressions correspondantes :

$$\left(V_0 + \frac{v}{1 + \alpha\theta}\right) H = \left[V_0(1 + KT) + \frac{v(1 + \alpha T)}{1 + \alpha\theta'}\right] \frac{H'}{1 + \beta_T}$$

Les termes en α dans les parenthèses n'ont que très peu d'importance à cause de la petitesse de v : on peut y remplacer α par une valeur approchée telle que celle des expériences de Gay-Lussac, et écrire αT , $\alpha\theta$, $\alpha\theta'$ au lieu de α_T , $\alpha\theta$, $\alpha\theta'$.

V_0 , v ont été jaugés, K a été déterminé en transformant en thermomètre à poids un petit ballon de verre de la même coulée que celui de l'expérience actuelle (304). On résoudra l'équation par rapport à $1 + \beta_T$.

328. Coefficient de dilatation sous pression constante (fig. 241). — Il y a peu de changements à apporter à la disposition précédente pour mesurer le coefficient de dilatation sous pression constante. Le tube BD du manomètre a été divisé en parties d'égale capacité, le manomètre est placé dans un bain d'eau de température connue.

La *première phase de l'expérience* est la même que dans la détermination précédente. On opère à 0^0 , le ballon A est entouré de glace fondante et rempli de gaz sec et pur. Les niveaux du mercure sont amenés sur le même plan horizontal dans les deux branches du manomètre, à la partie supérieure du renflement BD.

Dans la *deuxième phase de l'expérience*, à T , on laisse le gaz se dilater librement sous la pression atmosphérique. Pour cela on fait écouler du mercure par le robinet à trois voies R, de telle sorte que le niveau soit sensiblement le même dans les deux branches. Le gaz dilaté remplit un volume u , à la température τ , dans la courte branche BD du manomètre qui est divisée en parties d'égale capacité. La température τ est la température d'un courant d'eau qui circule dans le manchon qui entoure le manomètre.

La force élastique H du gaz lorsque le ballon est dans la glace et la force élastique H' lorsque le ballon est dans la vapeur d'eau bouillante sont ici des pressions très voisines de la pression atmosphérique.

Calcul. — Dans la *première phase* de l'expérience, la masse du gaz occupe un volume V_0 à 0° et un volume v à θ° sous la pression H ; la masse totale ramenée à 0° sous la pression H occupera un volume $V_0 + \frac{v}{1 + \alpha\theta}$.

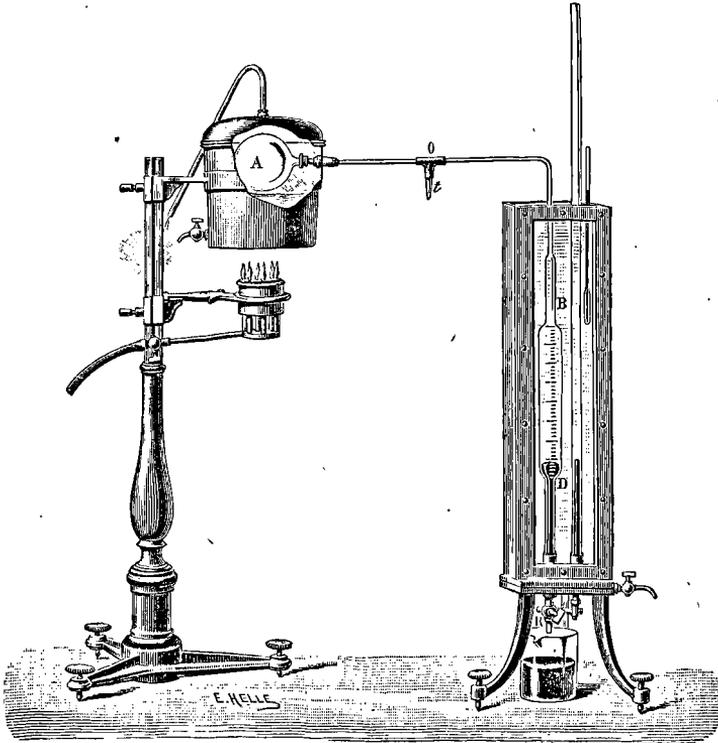


Fig. 241.

Dans la *deuxième phase* de l'expérience, sous la pression H' , la même masse occupe $V_0(1 + KT)$ à T° , v à θ' et u à τ . La masse totale ramenée à 0° sous la pression H' aura un volume

$$\frac{V_0(1 + KT)}{1 + \alpha_T} + \frac{v}{1 + \alpha\theta'} + \frac{u}{1 + \alpha\tau} \quad (1)$$

La masse gazeuse se trouvant ainsi ramenée à 0° dans les deux cas, nous lui appliquons la loi de Mariotte en multipliant les volumes par les pressions correspondantes; nous avons l'équation

$$\left(V_0 + \frac{v}{1 + \alpha\theta}\right) H = \left[\frac{V_0(1 + KT)}{1 + \alpha_T} + \frac{v}{1 + \alpha\theta'} + \frac{u}{1 + \alpha\tau}\right] H'$$

(1) Nous écrivons $\alpha\theta'$ et $\alpha\tau$ au lieu de α_θ et α_τ à cause de la petitesse de θ' et de τ .

On remplace α par la valeur de Gay-Lussac dans $\alpha\theta$, $\alpha\theta'$ et $\alpha\tau$ et on résoud l'équation par rapport à α_T .

329. Résultats. — D'après les expériences de Regnault, la variation de force élastique de l'unité de masse d'un gaz entre la température de la glace fondante et la température de la vapeur d'eau bouillante (sous la pression 76) a sensiblement la même valeur pour les gaz difficilement liquéfiables tels que l'air, l'azote, l'hydrogène. Si l'on définit la température par la variation de force élastique d'un de ces gaz, on a par définition :

$$\beta_T = \beta T, \quad \beta = \frac{\beta_{100}}{100}.$$

Cela admis, on reconnaît que, pour les gaz précédents, la dilatation sous pression constante, α_T est proportionnelle à la température du thermomètre normal ; on peut donc écrire $\alpha_T = \alpha T$,
en outre, $\alpha = \beta$.

$$\alpha = \beta = 0,00367 = \frac{1}{273}.$$

α conserve la même valeur si l'on opère sous une pression supérieure à la pression atmosphérique, par exemple à 2 ou 3 atmosphères ; il en est de même pour β si la pression initiale de la masse gazeuse est supérieure à la pression atmosphérique.

Pour les gaz facilement liquéfiables, tels que l'acide carbonique, l'acide sulfureux, α est plus grand que pour l'air et croît avec la pression, β est aussi plus grand que pour l'air et croît également avec la pression. Enfin pour ces gaz α est un peu supérieur à β .

THERMOMÈTRE NORMAL

330. Comparabilité des thermomètres à liquide. — Nous savons qu'en faisant abstraction de l'enveloppe, des thermomètres à mercure de dimensions différentes sont comparables, c'est-à-dire donnent des indications identiques dans les mêmes conditions de température (276). Il en serait de même si tous les thermomètres étaient construits avec des enveloppes du même verre.

Deux thermomètres à mercure construits avec des verres différents

s'accordent nécessairement d'après leur graduation à 0° et à 100°, on constate que l'accord est très approché entre 0° et 100°, mais les écarts peuvent devenir importants au-dessus de 100°.

331. Comparabilité des thermomètres à gaz. — Des thermomètres à gaz seraient plus complètement d'accord entre eux que ne le sont des thermomètres à mercure si l'on déterminait les températures par l'observation des dilatations apparentes du gaz dans le verre, sous pression constante. En effet, les différences de dilatation des différents verres n'exerceraient ici qu'une influence minime, puisqu'un gaz se dilate environ 150 fois plus, et le mercure seulement 7 fois plus que le verre. Toutefois, ce n'est point par l'observation des dilatations apparentes du gaz que l'on détermine les températures.

332. Thermomètre à gaz sous pression constante. — On avait d'abord admis que les variations du volume absolu d'une masse gazeuse sous *pression constante* étaient proportionnelles aux variations de température. Par suite de cette convention, on posait :

$$v - v_0 = at$$

v_0 étant le volume d'une masse d'air contenue dans un thermomètre à la température de la glace fondante, v son volume à la température t .

Cette équation définit la température t ; on détermine a par l'observation de l'accroissement du volume de cette masse d'air depuis la glace fondante jusqu'à la vapeur d'eau bouillante.

$$v_{100} - v_0 = a \cdot 100; \quad a \text{ est la capacité d'un degré}$$

de là, en divisant :

$$\frac{v - v_0}{v_{100} - v_0} = \frac{t}{100} \quad (1)$$

$$\text{ou } \frac{v - v_0}{v_0} = \frac{v_{100} - v_0}{100v_0} t = \alpha t \quad \text{et } v = v_0(1 + \alpha t)$$

$$\text{en posant } \frac{v_{100} - v_0}{100v_0} = \alpha, \quad \alpha \text{ est le coefficient de dilatation, } a = v_0 \alpha$$

D'après l'équation (1), une élévation de température de 1° est alors celle qui produit sur une masse d'air dont la pression reste constante un accroissement de volume égal à la centième partie de la variation de son volume entre la température de la glace fondante et la température de l'eau bouillante.

La disposition pratiquement adoptée pour le thermomètre à air sous pression constante est celle qui a servi à mesurer la dilatation de l'air (fig. 241), elle ne permet pas au gaz d'être maintenu tout entier après sa dilatation à la température à mesurer; pour cette raison, la masse gazeuse exposée à la température cherchée décroît constamment, et cette température ne peut plus

être définie par l'équation (1) qui suppose invariable la masse de gaz chauffée, en outre, la sensibilité du thermomètre diminue à mesure que la température s'élève.

Pour ces raisons, on préfère définir la température par la variation de force élastique d'une masse de gaz constante. D'ailleurs, une variation de force élastique se mesure avec le cathétomètre et se détermine plus aisément avec précision qu'une variation de volume.)

333. Thermomètre normal. — Une certaine masse d'hydrogène est renfermée dans une enveloppe à 0° où elle occupe un volume déterminé sous une pression égale à 1 mètre de mercure.

On porte l'appareil dans des enceintes à diverses températures, et on maintient le volume constant en faisant varier la pression que le gaz supporte.

On admet qu'à des variations égales de force élastique correspondent des variations égales de température. En vertu de cette convention, la température est définie par l'équation :

$$p - p_0 = bt.$$

La constante b se détermine en observant la variation de force élastique du gaz entre les températures de la glace fondante et de la vapeur d'eau bouillante :

$$p_{100} - p_0 = b \cdot 100$$

b est la variation de pression pour un degré; de là, on déduit en divisant :

$$\frac{p - p_0}{p_{100} - p_0} = \frac{t}{100} \quad (2)$$

$$\text{ou } \frac{p - p_0}{p_0} = \frac{p_{100} - p_0}{100 p_0} t = \beta t \quad \text{et } p = p_0 (1 + \beta t)$$

$$\text{en posant } \frac{p_{100} - p_0}{100 p_0} = \beta.$$

β est le coefficient d'augmentation de pression à volume constant, $b = p_0 \beta$, on a $\beta = \alpha$ pour les gaz parfaits (324).

La constante $\frac{p_{100} - p_0}{100 p_0}$ ayant été déterminée, il suffira d'observer $p - p_0$ pour obtenir la température par l'équation (2).

D'après l'équation (2), un degré de température est l'élévation de température qui produit sur une masse d'hydrogène, qui avait dans la glace fondante une force élastique de 1 mètre de mercure, et qui est assujettie

à conserver un volume constant, une variation de force élastique $\frac{p_{100} - p_0}{100}$ égale à la centième partie de la variation de force élastique entre la température de la glace fondante et la température de la vapeur d'eau bouillante.

(En réalité, avec l'appareil employé (fig. 238), l'équation thermométrique est un peu plus compliquée, car l'enveloppe se dilate; en outre, entre le gaz chauffé et le manomètre se trouve un volume v de gaz non chauffé.)

L'équation thermométrique s'écrit (327) :

$$\left(V_0 + \frac{v}{1 + \alpha\theta} \right) p_0 = \left[V_0 (1 + \text{KT}) + \frac{v' (1 + \alpha T)}{1 + \alpha\theta} \right] \frac{p_T}{1 + \beta T}$$

On remplace α et β par 0,00367, et on résout l'équation par rapport à T . L'échelle des températures est indéfinie pour les températures croissantes, car on ne connaît pas les limites de la dilatation d'un gaz. Dans l'autre sens, on ne peut pas dépasser $t = -273^0$, au moins théoriquement, d'après la formule $p = p_0 (1 + \beta t)$.

DENSITÉ DES GAZ

334. Pour calculer la masse M d'un volume V de gaz, il faut connaître la densité ou la masse d'un centimètre cube de ce gaz.

La mesure de la densité ne se fait directement que pour l'air. Pour les autres gaz, on mesure la densité par rapport à l'air.

On appelle densité d'un gaz par rapport à l'air, à t^0 et à la pression H , le rapport de la masse d'un certain volume de ce gaz à t^0 et H , à la masse du même volume d'air, dans les mêmes conditions de température et de pression. C'est aussi le rapport des poids, en un même lieu, de volumes égaux de gaz et d'air à t^0 et H .

335. Calcul de la masse m d'un volume V d'air à t^0 et H . — Appelons a la masse de l'unité de volume d'air ou la densité de l'air à 0^0 et 76, V_0 le volume que la masse d'air m occuperait à 0^0 et 76, on a : $m = V_0 a$,

V_0 est lié à V (322) par la relation :

$$V_0 = \frac{V}{1 + \alpha t} \cdot \frac{H}{76},$$

$$\text{donc } m = \frac{V}{1 + \alpha t} \cdot \frac{H}{76} a.$$

336. Calcul de la masse M d'un volume V de gaz à t^0 et H .
 — Soient M et m les masses de gaz et d'air qui occupent séparément à t^0 et H un même volume V ; appelons A et a les densités du gaz et de l'air à 0^0 et 76 , désignons par V'_0 et V_0 les volumes de ces masses ramenées à 0^0 et 76 ,

$$M = V'_0 A \qquad m = V_0 a.$$

Si le gaz suit comme l'air les lois de Mariotte et de Gay-Lussac et a le même coefficient de dilatation que l'air,

$$V'_0 = V_0 = \frac{V}{1 + \alpha t} \cdot \frac{H}{76}$$

$\frac{M}{m} = \frac{A}{a} = d_0$, d_0 est la densité du gaz par rapport à l'air à 0^0 et 76 (1)

$$M = m d_0 = V_0 a d_0 = \frac{V}{1 + \alpha t} \cdot \frac{H}{76} \cdot a d_0.$$

337. Poids d'un volume V de gaz à t^0 et H . — En un lieu où l'intensité de la pesanteur est g , le poids du gaz sera :

$$P = Mg = V_0 a d_0 g$$

$$\text{d'où } P = \frac{V}{1 + \alpha t} \cdot \frac{H}{76} a d_0 g.$$

On détermine une fois pour toutes d_0 et a .

338. Mesure de la densité d'un gaz par rapport à l'air. — Pour obtenir la densité d'un gaz *par rapport à l'air*, on détermine à l'aide de la balance la masse de gaz comprise dans un volume V , puis la masse d'air comprise dans le même volume à la même température et à la même pression. Regnault a fait cette détermination à 0^0 et 76 .

(1) Si nous considérons le gaz et l'air à t^0 et H , en appelant A' et a' les densités du gaz et de l'air dans ces conditions,

$$M = VA' \quad m = Va' \quad \text{d'où } \frac{M}{m} = \frac{A'}{a'}$$

$\frac{A'}{a'}$ est la densité du gaz par rapport à l'air à t^0 et H .

Or, pour ces mêmes masses de gaz et d'air à 0^0 et 76 , nous avons trouvé $\frac{M}{m} = \frac{A}{a}$, donc $\frac{A'}{a'} = \frac{A}{a}$, c'est-à-dire que la densité par rapport à l'air d'un gaz qui suit les mêmes lois de dilatation et de compressibilité que l'air, est un nombre constant, indépendant de la température et de la pression.

Expérience de Regnault. — On prend un ballon d'une dizaine de litres A muni d'une garniture à robinets. On le fait communiquer par les robinets à trois voies R et R' : 1° avec un manomètre barométrique ; 2° avec une machine pneumatique ; 3° avec un réservoir à gaz

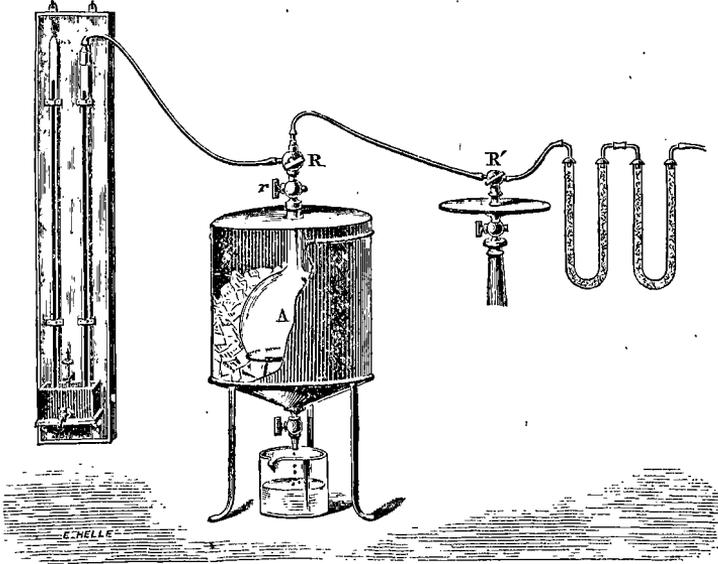


Fig. 242.

par l'intermédiaire de tubes desséchants. On dessèche avec soin ce ballon, en y faisant le vide quatre ou cinq fois de suite et en laissant chaque fois rentrer le gaz sec sur lequel on opère.

On entoure ensuite le ballon de glace fondante en le laissant en communication avec le réservoir à gaz. Le ballon plein de gaz prend la température zéro, et le manomètre relié au ballon donne la pression H (fig. 242). On ferme le robinet *r*.

Le ballon est retiré de la glace, essuyé ; après lui avoir laissé reprendre la température ambiante, on le suspend au-dessous du plateau d'une balance et on fait la tare.

On le replace dans la glace et on raréfie le gaz autant que possible avec une machine pneumatique. Quand le ballon a pris la température zéro, la pression marquée au manomètre étant ϵ , on ferme le robinet *r*. Le ballon est essuyé et quand il a repris la température ambiante, il est reporté sous le plateau de la balance.

Le nombre de grammes M_1 , qu'il faut ajouter du côté du ballon pour rétablir l'équilibre, représente la masse de gaz qui remplissait

le ballon à la pression $H - \varepsilon$. En effet, d'après la loi du mélange des gaz, le mélange d'un volume V de force élastique ε et d'un volume V de force élastique $H - \varepsilon$ donne un volume V de force élastique H .

La masse de gaz qui occuperait le volume du ballon sous la pression 76 serait d'après la loi de Mariotte ⁽¹⁾ :

$$M_1 \frac{76}{H - \varepsilon}.$$

On répète les mêmes opérations avec l'air sec. La masse d'air qui occupe le volume du ballon à 0° et à la pression 76 est :

$$m_1 \frac{76}{H' - \varepsilon'}$$

m_1 représente le nombre de grammes qu'il a fallu ajouter du côté du ballon pour remplacer l'air qui exerçait la pression $H' - \varepsilon'$.

La densité du gaz par rapport à l'air à 0° et 76 sera :

$$d_0 = \frac{M_1}{m_1} \cdot \frac{H' - \varepsilon'}{H - \varepsilon}.$$

Les hauteurs $H' - \varepsilon'$ et $H - \varepsilon$ ont été ramenées à 0° .

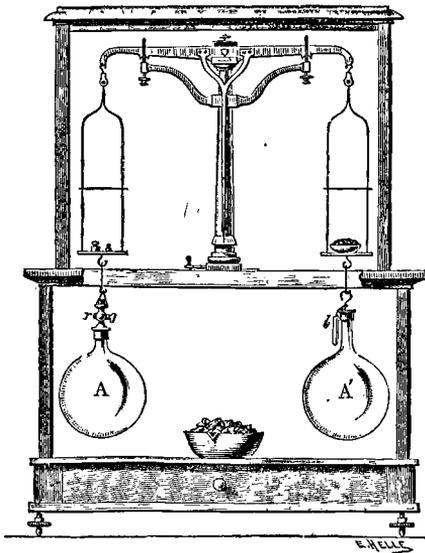


Fig. 243.

Ballon compensateur. — Dans les deux équilibres consécutifs relatifs au même gaz, nous avons admis que la poussée de l'air extérieur sur le ballon était constante. Cette condition ne peut être réalisée, parce que les opérations étant très longues, la pression et la température varient d'un équilibre à l'autre. Regnault évita toute évaluation de la poussée de l'air en suspendant du côté de la tare un ballon de verre A' de même volume

(1) Proportionnalité des forces élastiques aux densités ou aux masses qui occupent un même volume.

extérieur⁽¹⁾ et de même verre que le ballon à gaz A (fig. 243). De cette façon, un équilibre une fois établi dans la balance entre les deux ballons persistait indéfiniment, car la poussée restait la même sur les deux ballons, malgré les variations extérieures, et aussi la condensation de l'humidité sur leur surface extérieure⁽²⁾.

Récemment, en faisant usage d'une balance qui apprécie le dixième de milligramme (au lieu du milligramme), M. Leduc a pu réduire le volume du ballon à environ 2 litres. Il a été alors possible d'y faire le vide avec une machine pneumatique à mercure. Les pressions finales ε et ε' sont extrêmement réduites (moins de $\frac{1}{10}$ de millimètre de mercure). La masse de gaz contenue dans le ballon à la pression ε est si petite qu'il n'y a pas d'erreur appréciable à laisser le ballon dans l'air à la température ambiante quand on y fait le vide au lieu de le porter dans la glace fondante.

339. Détermination de la masse d'un centimètre cube

(1) Les deux ballons doivent éprouver la même poussée quand on les plonge dans l'eau, s'ils ont le même volume extérieur. Si l'égalité n'est pas parfaite, on accroche au plus petit des deux un tube de verre b (fig. 243) dont le volume est égal à la différence.

(2) Pour mieux préciser, nous allons écrire les équations relatives aux deux équilibres pour un même gaz *sans* ou *avec* ballon compensateur.

V_0 volume intérieur du ballon, ad_0 masse de l'unité de volume du gaz à 0° et 76; B verre du ballon, b humidité condensée à la surface extérieure, G poussée extérieure dans le premier équilibre, b' et G' dans le deuxième équilibre.

Sans ballon compensateur.

$$B + b + V_0 ad_0 \frac{H}{76} - G = \text{Tare}$$

$$B + b' + V_0 ad_0 \frac{\varepsilon}{76} + M_1 - G' = \text{Tare.}$$

Retranchons :

$$V_0 ad_0 \frac{H - \varepsilon}{76} = M_1 - (b - b') + G - G'$$

Il faudrait évaluer $b - b'$ et $G - G'$.

Avec ballon compensateur.

$$B + b + V_0 ad_0 \frac{H}{76} - G = \text{Tare} + b - G$$

$$B + b' + V_0 ad_0 \frac{\varepsilon}{76} + M_1 - G' = \text{Tare} + b' - G'$$

Retranchons :

$$V_0 ad_0 \frac{H - \varepsilon}{76} = M_1.$$

d'air. — Pour calculer la masse et le poids d'un gaz de température, pression et volume donnés par les expressions :

$$M = \frac{V}{1 + \alpha t} \cdot \frac{H}{76} a d_0$$

$$Mg = \frac{V}{1 + \alpha t} \cdot \frac{H}{76} a d_0 g,$$

il ne suffit pas d'avoir déterminé la densité du gaz par rapport à l'air, il faut encore connaître la masse a du centimètre cube d'air à 0^0 et à la pression 76 (76 centimètres de mercure normal).

La masse d'air qui occupait le volume du ballon à 0^0 et 76 a été trouvée (338) égale à

$$m_1 \frac{76}{H' - \varepsilon'} \quad \text{c'est } V_0 a.$$

$H' - \varepsilon'$ sera converti en hauteur de mercure normal (313). En divisant cette masse par V_0 , nous aurons a .

Pour obtenir V_0 , on remplit le ballon d'eau à 0^0 , on pèse cette eau ; en divisant le poids par e_0 , on obtient V_0 .

Jaugeage du ballon. — Pour jauger le ballon avec la précision qu'exige une détermination aussi importante, on procède comme il suit : on le remplit d'eau pure bien privée d'air, dans la glace fondante ; on ferme le robinet et on fait la tare à une température inférieure à 8^0 (309) (pour éviter la rupture du ballon, qui aurait lieu si l'eau intérieure venait à prendre un volume supérieur à son volume à 0^0).

Le ballon vidé et séché est rempli d'air sec à la température et à la pression extérieures t_2 et H_2 , fermé et accroché de nouveau au plateau de la balance. Il faut un nombre de grammes N pour rétablir l'équilibre.

La masse d'air sec qui remplit le ballon à t_2 et H_2 est :

$$\frac{V_0 (1 + K t_2)}{1 + \alpha t_2} \cdot \frac{H_2}{76} a$$

$$\text{ou } m_1 \frac{H_2}{H' - \varepsilon'} \cdot \frac{(1 + K t_2)}{1 + \alpha t_2}$$

$$\text{puisque } m_1 \frac{76}{H' - \varepsilon'} = V_0 a.$$

Désignons par e_0 la masse de l'unité de volume d'eau à 0^0 . Les équations d'équilibre sur la balance seront :

$$B + V_0 e_0 - G = \text{Tare.}$$

$$B + \frac{m_1 H_2}{H' - \varepsilon'} \cdot \frac{1 + K t_2}{1 + \alpha t_2} + N - G' = \text{Tare.}$$

$$\text{Retranchons : } V_0 e_0 = N + \frac{m_1 H_2}{H' - \varepsilon'} \cdot \frac{1 + K t_2}{1 + \alpha t_2}$$

en négligeant $G - G'$, petite variation de poussée que le ballon a éprouvée dans l'air en passant des conditions de température et de pression du premier équilibre aux conditions du deuxième.

On aura V_0 , puisque e_0 et le deuxième membre sont connus.

La masse d'un centimètre cube d'air à 0° et 76 est 0,001293.

340. Détermination de la densité des gaz qui attaquent les métaux. — On obtient la masse d'un volume V de chlore en remplissant d'air sec, puis de chlore un flacon bouché à l'émeri, de capacité V connue par un jaugeage.

1° On remplit le flacon de chlore, on observe la température t et la pression H , et on fait la tare du flacon.

2° Le ballon est ensuite rempli d'air sec, le nombre de grammes N qu'il faut ajouter au même plateau de la balance pour rétablir l'équilibre représente l'excès de masse du chlore sur l'air sec :

$$\frac{V}{1 + \alpha t} \cdot \frac{H}{76} 0,001293 d - \frac{V}{1 + \alpha t} \cdot \frac{H}{76} 0,001293 = N$$

Cette équation donnera d , densité du chlore par rapport à l'air.

341. Variations avec la température et la pression de la densité d'un gaz par rapport à l'air. — La densité d'un gaz par rapport à l'air est le quotient de la densité de ce gaz par la densité de l'air, dans les mêmes conditions de température et de pression.

Soient M et m des masses de gaz et d'air occupant le même volume V_0 à 0° et 76.

$$d_0 = \frac{A}{a} = \frac{\frac{M}{V_0}}{\frac{m}{V_0}}$$

Considérons les mêmes masses de gaz et d'air à t et H , la densité par rapport à l'air à t° sera :

$$d = \frac{A'}{a'} = \frac{\frac{M}{\bar{V}}}{\frac{m}{v}} = d_0 \frac{v}{\bar{V}}$$

en désignant par V et v les volumes occupés dans les nouvelles conditions par les masses précédentes de gaz et d'air.

Si le gaz suit les lois de Mariotte et de Gay-Lussac aussi bien que l'air, on a :

$$\frac{VH}{1 + \alpha t} = V_0 76$$

$$\text{et } \frac{vH}{1 + \alpha t} = V_0 76$$

par suite $V = v$ et $d = d_0$

Si le gaz ne se dilate et ne se comprime pas comme l'air, sa densité par rapport à l'air variera..

Densités à température constante. — Si le gaz se comprime comme l'air, $VH = vH$, $V = v$ et $d = d_0$.

Si le gaz se comprime plus que l'air quand la pression est croissante, on a $VH < V_0 76$ et $vH = V_0 76$, comme on a $\frac{V}{v} < 1$, d est supérieur à d_0 et va en croissant avec H .

Densités à pression constante. — $d = d_0$ si le coefficient de dilatation du gaz est égal à celui de l'air. Si le gaz se dilate davantage,

$$v = V_0 (1 + \alpha t)$$

$$V = V_0 (1 + \alpha' t) \quad \text{où } \alpha' > \alpha ;$$

$$V \text{ est supérieur à } v, \quad \frac{V}{v} > 1$$

et d est inférieur à d_0 .

L'expérience fait voir qu'à partir d'une certaine température et d'une certaine pression, la densité d'un gaz devient constante quand la température s'élève et que la force élastique décroît; cela prouve que le gaz suit alors les mêmes lois de dilatation et de compressibilité que l'air. Il se rapproche de l'état parfait quand il s'éloigne de son point de liquéfaction.)

Applications. — 1° A quelle température x faut-il chauffer une masse de gaz à 0° pour que son volume double?

2° 15 litres d'air sont refroidis de 27° à 7°; quelle est leur diminution de volume?

3° Quel serait le coefficient de dilatation des gaz en prenant pour unité de température un degré du thermomètre Fahrenheit? $\alpha = \frac{1}{273}$ avec la graduation centigrade.

4° Le volume d'une masse de gaz à 15° est 400 centimètres cubes; à quelle température t le volume sera-t-il 500 centimètres cubes, la pression restant invariable?

5° Quel est à 20° le volume d'un kilogramme de platine? Quelle perte de poids éprouve-t-il dans l'air? Densité du platine, 22.

6° Un ballon de 3^l,660 renferme 6^{gr},3 d'un gaz à 21° et 75 de pression. Quelle est la densité de ce gaz à 0°?

7° Dix litres d'un gaz à 27° sous la pression 68,4 pèsent 16^{gr},15. Quelle est dans ces conditions la densité de ce gaz par rapport à l'air?

8° Un gaz dont la densité par rapport à l'air est 1,135, est recueilli à 25° sur le mercure dans une cloche graduée dont il occupe 752^{cc}. Le mercure s'élève de 15 centimètres dans la cloche, la pression barométrique est 74. Quelle est la masse du gaz?

9° On veut construire un aérostat capable d'enlever 1000 kilogrammes avec une force ascensionnelle de 10 kilogrammes au départ. Quel sera son volume V si on le gonfle avec de l'hydrogène? Température 15°; pression 75; poids de l'enveloppe et de la nacelle, 100 kilogrammes.

10° A quelle température x faut-il élever l'air d'un ballon à air chaud dont l'enveloppe et la nacelle pèsent 130 kilogrammes, et dont le volume est 200 mètres cubes pour qu'il reste en équilibre dans l'air sec à 0°?

11° Un ballon du volume de 60 mètres cubes est rempli d'hydrogène dont la densité par rapport à l'air est 0,069. Quel doit être le poids de l'enveloppe pour qu'il atteigne une hauteur où la température est 5° et la pression 152^{mm}?

12° La densité de l'hydrogène à 0° et 76 est 9.10⁻⁵ grammes. Quelle est la pression H exercée par 1 gramme d'hydrogène occupant 40 centimètres cubes à 17°?

13° A quelle température l'oxygène sous la pression 19 a-t-il la même densité que l'hydrogène à 0° et 76? Densités de l'oxygène et de l'hydrogène par rapport à l'air : 1,1056 et 0,069.

14° Sous une même pression une masse d'air à 150° occupe le même volume qu'une masse d'hydrogène à 50°. Quel est le rapport de la masse d'air à la masse d'hydrogène? Densité de l'hydrogène par rapport à l'air, 0,0692.

15° Un récipient muni d'un robinet et rempli d'air à 0° et H pèse M. On le porte plein d'air dans une étuve à une température inconnue. Quand on a attendu assez longtemps pour que l'équilibre soit rétabli, on ferme le robinet et on pèse: on trouve un poids m . Quelle est la température de l'étuve? La pression n'a pas varié. On négligera la dilatation du verre.

16° Quel est le rapport des volumes occupés à 1000° et à 500° par une même masse de vapeur de soufre à une même pression H? La densité de vapeur du soufre est 6,6 à 500° et 2,2 à 1000°.

17° Un milligramme d'air à 27° occupe 20^{cc} dans la chambre d'un baromètre qui marque 73. Calculer la hauteur barométrique H, sachant que le volume d'un gramme d'air à 0° et 76 est 773,4 centimètres cubes.

18° On mélange 8 litres d'azote à 74 centimètres de pression, et 3 litres d'oxygène à 76 centimètres, les deux gaz étant à 14°. On porte le tout à 0° et on réduit le volume à 10 litres. Quelle est la pression?

19° Deux ballons dont les volumes sont invariables contiennent, l'un 10 litres d'air à 0° et 75 de pression, l'autre 20 litres d'air à 17° et 80. On fait communiquer les deux ballons et on les porte à 27°. Quelle est la pression nouvelle H?

20° Un récipient, plein d'air à 0° et à la pression 76, est muni d'une soupape ayant une surface de 10 centimètres carrés, chargée d'un poids de 30 kilogrammes. A quelle température faut-il chauffer ce récipient pour que la soupape s'ouvre? On ne tiendra pas compte de la dilatation du récipient.

21° Un vase cylindrique bien clos renferme une masse d'eau au-dessus de laquelle se trouve un espace libre rempli par de l'air sous la pression normale. Le volume de cet espace libre supposé invariable est de 40 centimètres cubes. Deux électrodes de platine plongées dans l'eau permettent d'y faire passer un courant électrique qui décompose 3 grammes d'eau. Calculer la pression du mélange du gaz renfermé dans le vase.

FUSION

342. La fusion est le passage d'un corps de l'état solide à l'état liquide sous l'action de la chaleur. Tous les corps solides se liquéfient quand on les chauffe à une température suffisamment élevée, si toutefois ils ne sont pas décomposés chimiquement avant d'atteindre la température de liquéfaction.

343. Fusion brusque et fusion progressive. — Pour certains corps, comme la cire à cacheter, le verre, le suif, le fer, les propriétés du solide se modifient progressivement: il y a d'abord *ramollissement*, puis passage graduel à l'état de liquide visqueux et enfin de liquide fluide. C'est cette *fusion pâteuse* qui permet de travailler le verre, de l'étirer en fils et de le souffler.

Un grand nombre de corps, comme la glace, l'étain, le plomb, le soufre, passent *brusquement* de l'état solide à l'état liquide à une température déterminée. Le changement d'état n'est probablement pas absolument brusque, mais il a lieu dans un très petit intervalle de température.

Les lois que nous allons énoncer ne s'appliquent qu'aux corps à fusion brusque.

344. Lois de la fusion. — 1° A une pression déterminée, la fusion a toujours lieu à la même température pour un même corps pur. Cette température est appelée **point de fusion**.

2° La température demeure constante pendant toute la durée de la fusion, quelle que soit la chaleur du foyer. La fusion est plus rapide si la chaleur du foyer est plus intense, mais c'est seulement lorsque toute la masse est devenue liquide, que la température continue à s'élever.

Ces lois se vérifient à l'aide d'un thermomètre placé dans la substance du corps en fusion. La constance de la température pendant la fusion de la glace a servi à caractériser le zéro de l'échelle centigrade (281).

345. Point de fusion. — Chaque substance a un point de fusion spécial et caractéristique.

Mercure	-40°	Argent	950°
Glace	0°	Or	1040°
Étain	230°	Cuivre	1050°
Plomb	330°	Platine	1775°
Zinc	410°	Iridium	1950°

Tous les corps solides peuvent être liquéfiés quand on emploie des sources calorifiques suffisantes. Certains corps considérés longtemps comme *réfractaires* ou infusibles, tels que la chaux, fondent à la température très élevée de l'arc voltaïque.

Beaucoup de corps ne peuvent être liquéfiés, parce qu'ils sont décomposés par la chaleur. C'est ainsi que dans les fours à chaux la craie ou carbonate de chaux ne fond pas, elle se décompose par la chaleur en acide carbonique qui se dégage et en chaux vive. Mais en chauffant fortement de la craie enfermée dans un canon de fusil hermétiquement clos, la décomposition n'a plus lieu que pour une très petite partie de la substance parce que l'acide carbonique ne peut

se dégager, et la craie se transforme par fusion en un marbre blanc compact.

346. Chaleur de fusion. — La constance de la température pendant toute la durée de la fusion indique que la chaleur fournie continuellement par le foyer en activité sert à produire la fusion, c'est-à-dire à effectuer le *travail mécanique* de désagrégation moléculaire ⁽¹⁾. Cette chaleur varie avec la substance, elle est proportionnelle au poids de la substance fondue. On appelle *chaleur de fusion* la quantité de chaleur qu'il faut donner à l'unité de masse d'un corps pour le liquéfier à la température de fusion, sans changement de température (437).

347. Changement de volume pendant la fusion. — La plupart des corps augmentent de volume en fondant, leur densité diminue. La glace fait exception, elle diminue de volume en fondant; l'eau à 0° est plus dense que la glace à 0°. Le bismuth, l'argent et la fonte de fer diminuent également de volume en passant à l'état liquide.

348. Variation du point de fusion par la pression. — Sur un corps qui *diminue de volume* en se liquéfiant, comme la glace, un accroissement de pression *abaisse* le point de fusion. Cet abaissement est trop faible pour avoir une influence dans la détermination du point zéro d'un thermomètre. Sous une pression de 16 atmosphères, la glace fond à — 0°,12.

La fig. 244 représente un tube d'acier à parois très résistantes, fermé inférieurement par un bouchon à vis et pouvant recevoir à la partie supérieure un piston plongeur également à vis. Le tube est rempli d'eau que l'on fait congeler dans un mélange réfrigérant, on pose sur le bloc de glace une boule métallique et on visse le piston; on l'enfonce ensuite graduellement, ce qui permet d'atteindre une pression de plusieurs

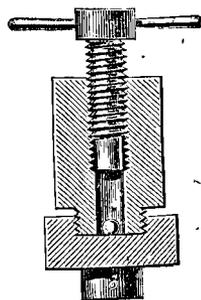


Fig. 244.

(1) La chaleur de fusion est employée à effectuer des travaux mécaniques (501) : 1° travail moléculaire interne; 2° travail externe de refoulement de la pression atmosphérique. L'accroissement de volume qui accompagne ordinairement la fusion étant très faible, ce travail externe est presque négligeable. Pour la glace qui se contracte en fondant, le travail externe est effectué par la pression extérieure et contribue à réaliser le travail interne.

milliers d'atmosphères. Si l'on dévisse ensuite le piston, l'eau redevient solide, mais on trouve au fond du tube la boule en contact avec le bouchon inférieur.

Il résulte de cette expérience que la pression a fait fondre la glace, la boule a traversé le liquide, l'eau s'est de nouveau congelée au moment de la décompression. On a pu ainsi faire fondre la glace au-dessous de -20° .

Pour les corps qui augmentent de volume en se liquéfiant, la pression élève le point de fusion.

349. Regel. — L'abaissement du point de fusion de la glace par

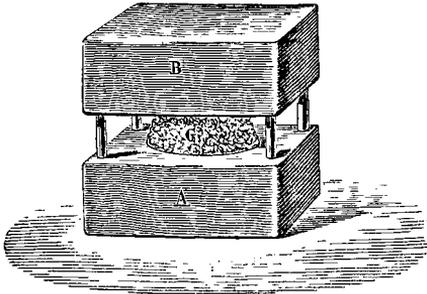


Fig. 245.

la pression explique la plasticité que ce corps présente sous de fortes pressions. Si l'on comprime à la presse hydraulique des fragments de glace G serrés entre deux moules en bois dur (fig. 245), la pression détermine la fusion d'une petite quantité de glace sur les surfaces en contact, la température s'abaisse par suite de l'absorption de

chaleur due à la fusion. Quand on cesse la pression, l'eau de fusion dont la température est inférieure à 0° ne peut rester liquide, elle se solidifie et réunit les divers fragments en une masse parfaitement limpide

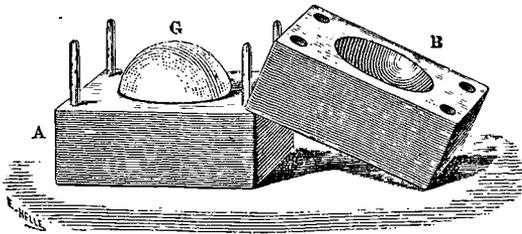


Fig. 246.

ayant la forme exacte du moule (fig. 246). Il y a eu fusion et regel. L'enfant qui pétrit une boule de neige répète l'expérience du regel.

On se rend compte par la plasticité de la glace des mouvements des glaciers.

SOLIDIFICATION

350. La *solidification* est le phénomène inverse de la fusion. C'est le passage de l'état liquide à l'état solide par refroidissement. Les liquides se solidifient quand on les refroidit suffisamment; l'eau se solidifie à 0° , le mercure à -40° , l'alcool à une température extrêmement basse.

351. Lois de la solidification. — En laissant de côté les substances telles que le verre qui passent par un état pâteux, les lois de la solidification sont les suivantes :

1° *La température de solidification d'un corps est fixe, elle est la même que la température de fusion.* La glace fond à 0° , l'eau se congèle aussi à 0° .

2° *Pendant toute la durée de la solidification, la température reste invariable, si intense que soit le refroidissement, et elle ne continue à s'abaisser qu'après la solidification complète.*

352. Chaleur de solidification. — En se solidifiant, un liquide dégage de la chaleur. La *chaleur de solidification* est la chaleur qu'il faut enlever à l'unité de masse d'un corps amené au point de solidification pour le faire passer de l'état liquide à l'état solide sans variation de température. La chaleur de solidification est égale à la chaleur de fusion (346).

353. Changement de volume au moment de la solidification. — La plupart des substances *diminuent de volume* en se solidifiant et par suite augmentent de densité. Les fragments solidifiés s'enfoncent dans le liquide.

Comme nous l'avons déjà indiqué à propos de la fusion, l'eau, le bismuth, l'argent, la fonte de fer font exception et *augmentent de volume* en se solidifiant. C'est à cette particularité que la fonte doit d'être précieuse pour le moulage, son expansion lui fait remplir exactement les détails du moule.

La glace, en vertu de sa plus faible densité 0,92, flotte au-dessus de l'eau au lieu de tomber au fond. L'accroissement de volume de l'eau qui se solidifie explique la rupture des tuyaux de conduite qu'on a laissés remplis d'eau et dont le contenu vient à geler en entier. La

figure 247 montre un tube d'acier rempli d'eau et hermétiquement clos, fendu par la congélation de son contenu.



Fig. 247.

354. Surfusion. — Tandis qu'un corps solide ne peut pas être porté au-dessus de son point de fusion sans fondre, un corps peut rester liquide à une température très inférieure à son point de fusion. On peut ainsi refroidir de l'eau jusqu'à -12° sans qu'elle se solidifie, si on la soustrait à toute agitation, si elle est purgée d'air par ébullition et si on la couvre d'une couche d'huile pour la préserver du contact de l'air.

Le soufre fond et se solidifie à 111° , cependant des globules de soufre fondu peuvent rester liquides jusqu'à la température ordinaire si on les refroidit lentement et sans agitation dans une dissolution de chlorure de zinc assez concentrée pour avoir la même densité que le soufre.

Le phosphore blanc fond à $44^{\circ}2$. Fondu dans un tube au-dessous d'une petite couche d'eau, il peut être refroidi jusqu'à 20° sans cesser d'être liquide.

Les liquides maintenus à l'état liquide au-dessous de leur point de solidification sont dits en surfusion.

355. Solidification d'un liquide surfondu. — On produit infailliblement la solidification d'un liquide surfondu en amenant au contact du liquide une *parcelle de la même substance à l'état solide*. Le phosphore surfondu se solidifie au contact d'une parcelle de phosphore blanc, un fragment de phosphore rouge est sans action. Une action mécanique suffisamment énergique, *choc, agitation*, produit la solidification instantanée d'un liquide surfondu.

Quand un liquide en surfusion vient à se solidifier, la solidification a lieu brusquement et avec dégagement de chaleur : la température remonte jusqu'à un point qui ne peut être supérieur au point de fusion, mais qui peut lui être inférieur. Si la solidification n'est pas complète, la température remonte jusqu'au point de fusion.

En raison des phénomènes de surfusion, on peut dire que la température de solidification normale ou la température de fusion est la température

maximum à laquelle un corps peut exister à l'état solide. Au-dessus il est toujours liquide. Au-dessous il peut être solide ou liquide. Toutefois, si peu qu'on l'abaisse au-dessous de la température de fusion, une parcelle de solide provoque la solidification immédiate du liquide. C'est sur cette propriété qu'on s'appuie pour *déterminer exactement le point de fusion* d'une substance. Après l'avoir fait fondre en la chauffant un peu au-dessus du point de fusion, on la laisse se refroidir très lentement et à mesure que le thermomètre descend, on essaie de solidifier la masse en y projetant une parcelle du solide. La solidification n'a pas lieu, tant que la température n'est pas un tant soit peu inférieure à la température de fusion.

356. Dissolution dans les liquides. — La dissolution d'un corps solide dans un liquide est une *liquéfaction qui a lieu à toute température*. Tous les corps ne sont pas solubles, et un corps n'est habituellement soluble que dans certains liquides. C'est ainsi que le sucre se dissout dans l'eau et est insoluble dans l'alcool ; la graisse, insoluble dans l'eau, se dissout dans la benzine. La masse de la matière dissoute par l'unité de masse du liquide croît le plus souvent avec la température.

Ce passage à l'état liquide donne lieu à une absorption de chaleur. Si la dissolution est accompagnée d'un effet chimique, deux actions contraires interviennent : l'*action chimique* qui est le plus souvent une source de chaleur, et la *liquéfaction* qui absorbe de la chaleur ; l'abaissement de température résultant sera parfois insensible, il pourra même y avoir élévation de température. Mais s'il n'y a pas d'action chimique, ou si la *chaleur dégagée par l'action chimique est inférieure à la chaleur absorbée par la dissolution*, celle-ci ne pouvant être empruntée qu'au mélange, la température s'abaisse : on a un mélange réfrigérant.

357. Mélanges réfrigérants. — Un mélange réfrigérant contient au moins un corps solide, pour qu'il y ait un refroidissement dû à la dissolution. Un mélange d'eau et d'*azotate d'ammoniaque* à poids égaux produit un abaissement de température d'environ 10°.

Un mélange fréquemment employé est formé de 3 parties de *glace* pilée et 1 partie de *sel marin* ; il permet d'obtenir — 20°. Avec 4 parties de *chlorure de calcium* en poudre et 3 parties de *neige*, on peut descendre à — 50°, et congeler le mercure. Dans ces mélanges, l'absorption de chaleur est due à la fusion du sel et surtout à la fusion de la glace ; la présence du sel active par une action chimique la fusion de la glace.

Citons encore un mélange d'*acide chlorhydrique* (2 parties) et de

sulfate de soude (3 parties). La présence de l'acide chlorhydrique accélère la dissolution du sulfate de soude.

358. Cristallisation. — Lorsque le retour à l'état solide d'un solide liquéfié a lieu assez lentement, les molécules se groupent en formant des solides de forme géométrique régulière, à faces planes et appelés *cristaux*. La cristallisation, comme toute solidification, est accompagnée d'un dégagement de chaleur.

La cristallisation peut avoir lieu sans l'intervention d'un dissolvant : 1° *par fusion* : ce procédé s'applique surtout à des corps dont le point de fusion n'est pas très élevé, comme le soufre ; 2° *par sublimation* : ce procédé s'applique à des corps qui passent directement de l'état gazeux à l'état solide, comme l'arsenic. Ces deux dernières méthodes sont des méthodes de *cristallisation par voie sèche*.

La cristallisation après dissolution, méthode *par voie humide*, est la plus fréquemment employée.

A une température donnée, la masse solide que peut dissoudre un liquide dépend de la nature du solide et du liquide. Une solution saturée, renfermant tout le solide que le liquide est capable de dissoudre, laisse déposer une partie du solide quand on diminue *par évaporation* le poids du dissolvant (cristallisation du sel marin par évaporation).

Pour un solide et un liquide donnés, la masse solide dissoute croît le plus souvent avec la température. Une solution saturée étant préparée à chaud, si on la laisse se refroidir, le liquide froid ne peut pas conserver dissous tout le solide qu'il contenait à chaud et en laisse déposer une partie (cristallisation du sulfate de cuivre *par refroidissement*).

359. Sursaturation. — Lorsqu'un liquide saturé d'un solide plus soluble à chaud qu'à froid ne laisse pas déposer en se refroidissant une partie du solide dissous, on dit que la solution est *sursaturée*.

La sursaturation est un phénomène analogue à la surfusion.

La sursaturation s'observe facilement avec le *sulfate de soude*. Dans un tube fermé à l'une de ses extrémités et effilé à l'autre, on introduit une solution concentrée de sulfate de soude (fig. 248) et après avoir porté le liquide à l'ébullition pour entraîner les cristaux de sulfate de soude qui provoqueraient la cristallisation, on ferme à la lampe l'extrémité effilée C. Par le refroidissement, la solution ne laisse rien

déposer, mais si l'on brise la pointe, la cristallisation commence par la surface et se propage jusqu'au fond du tube. Lorsque l'entrée de l'air ne produit pas la cristallisation, on la détermine infailliblement *en projetant dans le liquide sursaturé une parcelle d'un cristal de sulfate de soude* autour de laquelle de nouveaux cristaux se forment en rayonnant. C'est par la chute de petits cristaux de sulfate de soude flottant dans l'air que l'on explique la cristallisation au contact de l'air. La solution se maintient sursaturée si elle est mise à l'abri des poussières de l'air; un courant d'air tamisé sur du coton ne produit pas la cristallisation. La sursaturation est facile à obtenir avec plusieurs sels de soude, acétate, hyposulfite, etc.

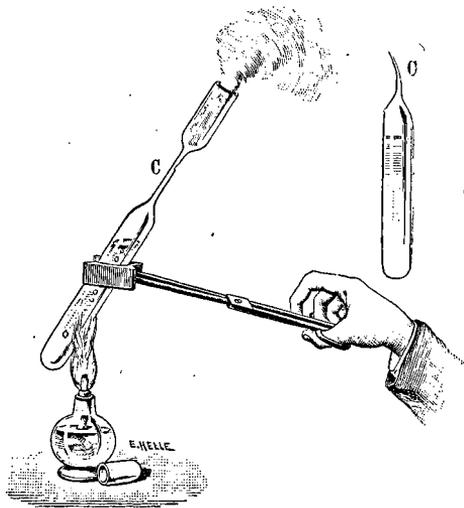


Fig. 248.

Une dissolution d'*azotate de chaux* sursaturée à chaud ne cristallise pas quand on la laisse refroidir lentement. La sursaturation persiste ici au contact de l'air, car l'azotate de chaux est un sel déliquescent qui ne peut se rencontrer dans l'air à l'état de poussières solides. La cristallisation a lieu encore immédiatement au contact d'un petit cristal d'azotate de chaux.

La cristallisation d'une solution sursaturée produit un dégagement sensible de chaleur.

VAPORISATION

360. La *vaporisation* est le passage d'un corps à l'état gazeux. On donne le nom de *vapeur* au corps gazeux qui a pris naissance. La transformation d'un liquide en vapeur a lieu à toute température. Les

liquides qui se réduisent en vapeur à une température peu élevée sont dits liquides *volatils*. Nous étudierons la formation et les propriétés des vapeurs dans le vide et dans un gaz.

VAPORISATION DANS LE VIDE

361. On introduit avec une pipette recourbée quelques gouttes d'un liquide volatil dans la chambre d'un baromètre (fig. 249) ; le liquide, moins dense que le mercure, monte au sommet de la colonne et disparaît presque instantanément en même temps que la colonne barométrique s'abaisse brusquement. La dépression du mercure indique la présence dans le baromètre d'un corps exerçant comme un gaz une force élastique et que l'on appelle une **vapeur**. La force élastique de cette vapeur se maintient fixe si la température ne varie pas, elle fait équilibre à la différence $H - H' = CD$ entre la hauteur H de la colonne mercurielle soulevée dans un baromètre ordinaire B , et la hauteur H' plus petite soulevée dans le baromètre à vapeur.

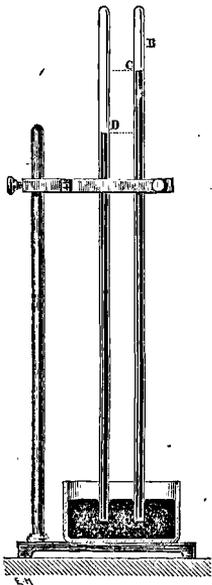


Fig. 249.

Quelques nouvelles gouttes de liquide, introduites dans le baromètre à vapeur, se vaporisent immédiatement et le niveau du mercure subit une nouvelle dépression due à un accroissement de la force élastique de la vapeur. En renouvelant l'expérience, il arrive un moment où le liquide introduit cesse de se vaporiser et mouille les parois de la chambre barométrique; en même temps le mercure du baromètre à vapeur ne s'abaisse plus et conserve un niveau constant.

Il est établi par ce qui précède que dans le vide un liquide donne *instantanément* naissance à une vapeur qui exerce une force élastique analogue à celle d'un gaz. Toutefois, à une même température, la force élastique d'une vapeur suit des lois différentes suivant qu'il y a ou qu'il n'y a pas excès du liquide générateur.

I. Vapeur saturante. — La quantité de liquide introduite étant suffisante pour qu'après la vaporisation instantanée du début, *il reste*

une couche de liquide au sommet du mercure, l'espace qui surmonte le mercure renferme toute la vapeur qu'il peut contenir, il est dit *saturé* et la vapeur est dite *saturante*. Le baromètre à vapeur étant plongé dans une cuvette profonde, si l'on vient à le soulever ou à l'abaisser (fig. 250), la *hauteur du mercure soulevé au-dessus du niveau dans la cuvette ne varie pas*, ce qui prouve que, malgré la variation de capacité de la chambre barométrique, la vapeur conserve une force élastique constante.

À la température de l'expérience, la vapeur ne peut exister sous une pression supérieure à cette force élastique, car si on essaie de comprimer la vapeur en abaissant le tube pour diminuer la capacité de la chambre barométrique, une partie repasse à l'état liquide : on voit en effet augmenter la petite couche liquide qui surmonte le mercure. En continuant à abaisser le tube, la condensation se poursuit et finit par devenir totale. La *masse vaporisée n'est pas invariable*, elle est proportionnelle à la capacité de la chambre barométrique et sa *densité est constante*, comme celle d'un gaz sous une pression déterminée.

Si l'on soulève le tube à vapeur d'une façon continue, la couche liquide diminue, mais la force élastique demeure invariable tant qu'il subsiste un excès de liquide, jusqu'au moment où la capacité de la chambre barométrique est devenue suffisante pour que tout le liquide y soit vaporisé ; on se trouve alors dans le cas où la vapeur n'est plus au contact de son liquide et n'est plus saturante.

II. Vapeur non saturante. — En soulevant dans la cuvette profonde un baromètre à vapeur qui ne contient pas un excès du liquide générateur, le volume de la vapeur et la hauteur de la colonne soulevée varient en même temps, de telle façon que la force élastique de la vapeur, mesurée par la différence $II - H'$, suit sensiblement la loi de Mariotte. La vapeur se comporte alors comme un gaz.

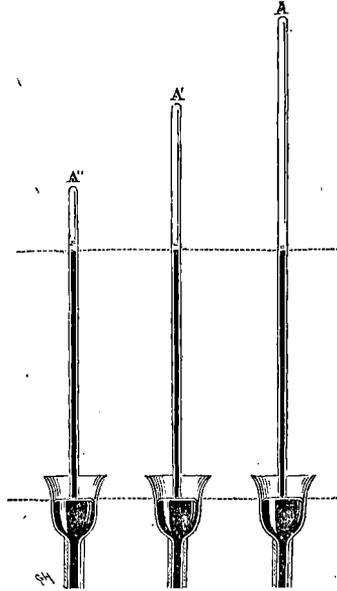


Fig. 250.

En enfonçant le tube barométrique de manière à diminuer graduellement le volume de la vapeur, sa force élastique augmente d'une façon continue, mais il arrive un moment où une goutte de liquide apparaît au-dessus du niveau du mercure. Le mercure cesse alors de baisser dans le tube barométrique, *la force élastique de la vapeur est maximum*. Nous avons vu plus haut que la vapeur à la température de l'expérience ne pouvait exister sous une pression supérieure à cette force élastique.

La pression d'une vapeur non saturante est toujours moindre que la force élastique de la vapeur saturante à la même température.

En résumé, une vapeur non saturante suit à peu près la loi de Mariotte quand on fait varier son volume; elle suit aussi la loi de Gay-Lussac quand on fait varier sa température. Son coefficient de dilatation diffère peu de celui des gaz.

362. Forces élastiques maxima de différents liquides à une même température. — Plusieurs baromètres sont disposés

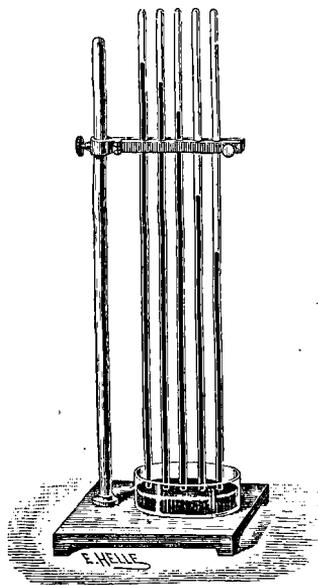


Fig. 251.

les uns à côté des autres dans une même cuvette (fig. 251), le baromètre de gauche est laissé sec, on fait passer de l'eau dans le suivant, de l'alcool dans le 3^e, du sulfure de carbone dans le 4^e, de l'éther dans le 5^e; les quantités de liquide introduites étant suffisantes pour qu'il y en ait un petit excès. On voit le mercure s'abaisser brusquement dans les divers tubes et de quantités *inégaux*: la dépression est plus forte du côté de l'éther que du côté de l'alcool, plus forte du côté de l'alcool que du côté de l'eau. La différence des niveaux dans le baromètre sec et dans un baromètre à vapeur représente la force élastique de la vapeur correspondante. A 20°, la force élastique de la vapeur d'éther est à peu près 25 fois plus grande que celle de la vapeur d'eau.

Les forces élastiques maxima de différents liquides à une même température sont donc différentes.

Presque tous les liquides sont volatils et donnent à toute tempéra-

ture des vapeurs ayant une force élastique. Pourtant, à la *température ordinaire*, la glycérine, les huiles grasses et l'acide sulfurique monohydraté sont *fixes* et ne donnent pas de vapeurs appréciables.

Pour le mercure, la force élastique de la vapeur est assez petite à la température ordinaire pour qu'on puisse la *négliger* dans les observations barométriques et manométriques.

363. La force élastique maximum d'une vapeur croît avec la température. — On fait reposer sur une cuvette à mercure un baromètre sec et un baromètre renfermant une vapeur en contact avec un excès de son liquide ; on entoure les deux tubes d'un même manchon rempli d'eau que l'on porte à diverses températures. A mesure que l'eau du manchon s'échauffe, la différence entre les niveaux dans les deux tubes va en croissant. En même temps que la colonne du baromètre à vapeur se déprime, la masse de vapeur augmente, car la petite couche du liquide qui surmonte le mercure diminue.

Inversement, si, la pression restant la même, on refroidit, une partie se condense et la force élastique diminue jusqu'à devenir égale à la force élastique maximum relative à la température nouvelle.

La force élastique maximum d'une vapeur de nature déterminée ne dépend que de la température.

364. Principe de la paroi froide. — Quand une enceinte occupée par une vapeur *ne présente pas la même température en tous ses points*, la vapeur tend à prendre des forces élastiques différentes aux points qui n'ont pas la même température ; mais l'équilibre ne s'établit que lorsque la force élastique de la vapeur est devenue dans toute l'enceinte égale à la force maximum f correspondant au *point le plus froid*. Il est en effet nécessaire pour l'équilibre que la force élastique soit la même dans toute l'étendue de l'enceinte. De plus, cette force élastique ne peut être supérieure à f , car si au point le plus froid elle était supérieure à f , la vapeur s'y condenserait jusqu'à ce qu'elle redevînt égale à f . La vapeur se condense en effet dans la partie froide et ce n'est que lorsque *tout le liquide s'y est rendu par distillation* que l'équilibre a lieu ; la force élastique est alors égale à f dans toute l'enceinte.

La figure 252 représente deux récipients contenant de l'eau maintenue à des températures différentes : B à 90° et A à 10° ; le robinet r qui les fait communiquer étant ouvert, tout le liquide de B passe en A.

Quand l'équilibre de pression s'est établi, la force élastique de la vapeur d'eau dans les deux récipients est la force élastique maximum correspondant à la température de 10°.

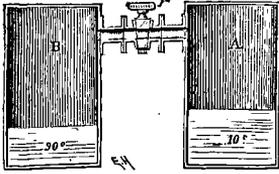


Fig. 252.

Ce principe est appliqué dans diverses circonstances : 1° dans le condenseur de la machine à vapeur ; 2° dans le tube de Faraday pour liquéfier les gaz.

MESURE DES FORCES ÉLASTIQUES MAXIMA DE LA VAPEUR D'EAU

365. Mesure entre 0° et 100°. — **Appareil de Dalton.** — On détermine la force élastique maximum de la vapeur d'eau à des températures comprises entre 0° et 100° en disposant deux baromètres sur une même cuvette en fonte C pleine de mercure et placée sur un fourneau (fig. 253). L'un des baromètres B est sec, l'autre A contient de la vapeur d'eau en contact avec un excès de son liquide. Les deux baromètres sont maintenus dans un manchon de verre rempli d'eau. Des thermomètres donnent la température de l'eau du manchon. Un agitateur D permet d'obtenir une température uniforme.

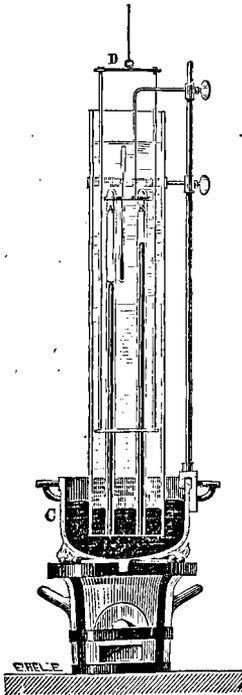


Fig. 253.

Expérience. — La force élastique F de la vapeur accrue de la pression de la petite couche d'eau en excès fait équilibre à une colonne de mercure égale à la différence des hauteurs dans les deux tubes barométriques. On mesure avec un cathétomètre, aux températures croissantes, la différence progressive des niveaux du mercure dans les deux tubes barométriques, et on convertit cette différence en *hauteur de mercure normal* (313). On en retranche une hauteur de mercure équivalente à la couche d'eau du baromètre mouillé (ε épaisseur de cette couche,

d densité du mercure, la hauteur de mercure équivalente est $\frac{\varepsilon}{d}$).

A la température d'ébullition de l'eau, le mercure descend dans le baromètre à vapeur jusqu'au niveau dans la cuvette. En effet, à la température d'ébullition d'un liquide, sa force élastique maximum fait équilibre à la pression extérieure. Pour l'eau, par définition, la température est 100° si la pression extérieure est 76.

Cet appareil ne peut donc servir à la mesure de la force élastique maximum d'une vapeur au-dessus de la température d'ébullition du liquide.

Incertitudes. — Pour obtenir dans le manchon une température uniforme, il fallait mélanger les différentes couches avec un agitateur ; le manchon reposant sur le mercure, l'agitation se transmettait aux colonnes des baromètres et il fallait attendre le repos pour faire les lectures. En outre, le manchon en verre soufflé donne lieu à des erreurs dans la visée des niveaux, car les parois, dont l'épaisseur est irrégulière, abaissent ou relèvent les rayons lumineux comme le feraient des lames prismatiques.

Appareil de Regnault. — Regnault a remplacé le manchon de verre par une caisse en tôle de petite hauteur, présentant une fenêtre fermée par une glace plane à faces parallèles. Cette caisse est remplie d'eau que l'on chauffe à diverses températures mesurées par un thermomètre t plongé dans l'eau (fig. 254).

En visant avec un cathétomètre les niveaux du mercure à travers la glace plane, on relève exactement à chaque température la différence des niveaux.

Un agitateur AA' sert à mélanger les différentes couches de la caisse, mais comme la caisse n'entoure que la partie supérieure des tubes, la cuvette C est indépendante du bain d'eau et l'agitation ne se transmet pas aux colonnes des baromètres.

Afin d'obtenir par l'agitation une température sensiblement uniforme,

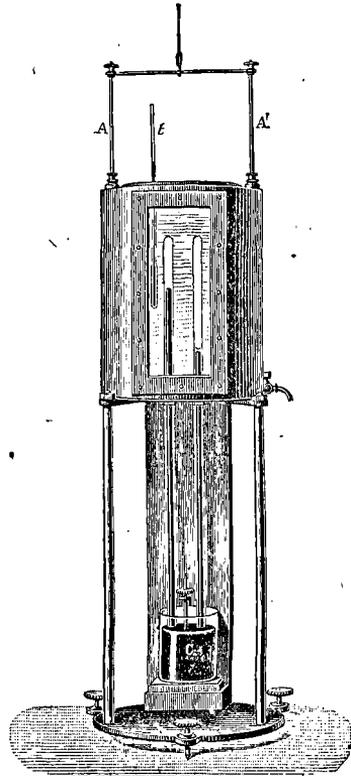


Fig. 254.

Regnault réduisit la hauteur de la caisse en tôle à environ 20 centimètres et n'opéra avec cet appareil que jusqu'à 60° environ, car au delà de cette température la force élastique de la vapeur déprimait le mercure du baromètre mouillé au-dessous du fond de la caisse.

366. Forces élastiques de la vapeur d'eau aux températures élevées. — **Expériences de Regnault.** *Principe de la méthode.* — L'expérience démontre que la force élastique de la vapeur d'un liquide en ébullition est égale à la pression que supporte le liquide (380), et que la pression et la température d'ébullition sont en relation telle que la température de la vapeur reste invariable tant que la pression qui s'exerce sur le liquide est maintenue constante.

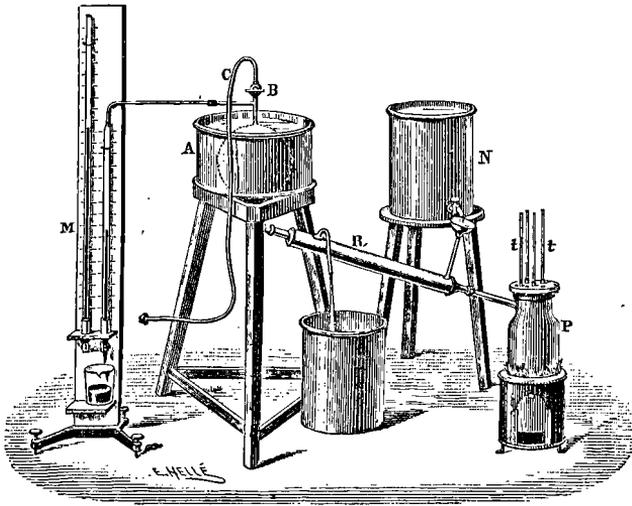


Fig. 255.

Regnault fit bouillir de l'eau dans une atmosphère artificielle, sous une pression déterminée à l'avance : cette pression était la *force élastique maximum* de la vapeur à la *température* à laquelle l'ébullition avait lieu.

Description de l'appareil. — De l'eau distillée est renfermée dans un vase en cuivre rouge P qui repose sur un fourneau et communique avec un récipient dans lequel on peut comprimer ou raréfier à volonté de l'air. Ce récipient est entouré d'un bain d'eau A qui

maintient sa température constante, il porte un ajutage à deux branches qui se rend d'une part à un manomètre à mercure M et communique d'autre part par un tube C avec une machine pneumatique ou avec une machine de compression (fig. 255).

Le col de la chaudière est relié au récipient par un tube incliné entouré d'un cylindre R où circule un courant d'eau froide qui condense et fait retomber dans la chaudière les vapeurs émises par l'eau⁽¹⁾.

La température de la vapeur au-dessus du liquide est donnée par des thermomètres *t* contenus dans des tubes de fer verticaux qui renferment du mercure. Ces tubes, fermés par le bas, partent de la paroi supérieure de la chaudière et préservent les réservoirs des thermomètres des déformations qu'ils auraient subies par la pression de la vapeur (fig. 256).

Marche des expériences. — Pour effectuer une mesure, on établit dans le récipient une *pression fixe* et on chauffe la chaudière. La *constance des thermomètres* (380) prévient de l'ébullition de l'eau, on lit la température et on mesure la force élastique correspondante qui est égale à la différence des niveaux du mercure dans les deux tubes du manomètre, accrue de la pression atmosphérique.

En faisant varier la pression de l'atmosphère artificielle dans laquelle l'eau bout, on obtient l'ébullition à des températures différentes auxquelles correspondent les forces élastiques mesurées.

Cette méthode est applicable à toutes les températures. Pour observer les forces élastiques de la vapeur d'eau au-dessous de 100° on raréfie l'air dans le récipient; on le comprime pour opérer au-dessus de 100°. Le même appareil peut être employé pour les liquides autres que l'eau.

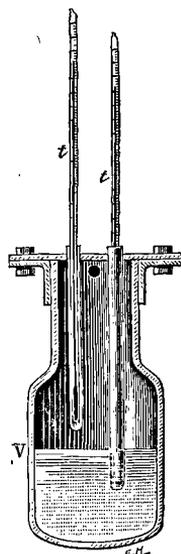


Fig. 256.

(1) Le principe de la paroi froide ne s'applique pas ici; il ne s'adresse en effet qu'à une enceinte où un équilibre fixe s'est établi dans toutes les parties; dans l'appareil de Regnault l'équilibre ne s'établit pas dans le tube incliné qu'entoure le réfrigérant R; c'est par l'intermédiaire de couches vaporisées à diverses températures et en mouvement continu de vaporisation et de condensation que la force élastique de la vapeur dans la chaudière P soutient le mercure soulevé dans le manomètre et la pression atmosphérique.

Résultats. — Les forces élastiques maxima de la vapeur d'eau ont été observées de 0° à 230°.

0°.....	0cm,460
20°.....	1,739
50°.....	9,198
100°.....	76
121°.....	2.76
153°.....	5.76
180°.....	10.76
230°.....	28.76

On voit que la force élastique maximum de la vapeur d'eau croît suivant une loi beaucoup plus rapide que la proportionnalité à la température.

Regnault a représenté les résultats de ses expériences par une formule empirique :

$$\log f = a + b\alpha^t + c\beta^t, \text{ où } a, b, c, \alpha, \beta \text{ sont des}$$

constantes particulières à la vapeur d'eau qu'on obtient par 5 expériences.

A une force élastique f en centimètres de mercure correspond une pression par centimètre carré exprimée en dynes par $f \cdot 13,59 \cdot 981$.

Sachant que la pression atmosphérique correspondant à 76 centimètres de mercure est égale à 1033.981 dynes, on représente encore la pression exercée sur un centimètre carré par la vapeur d'eau à t^0 par $1033 \cdot 981 \cdot \frac{f}{76}$.

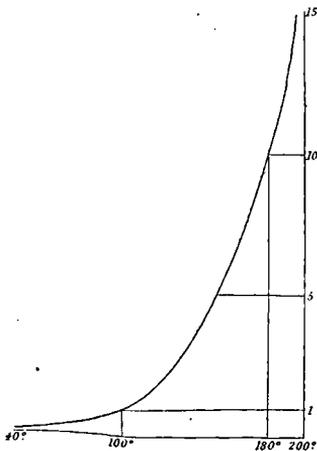


Fig. 257.

Entre 100° et 230° la relation empirique $p = \left(\frac{t}{100}\right)^4$ donne les forces élastiques d'une façon suffisamment approchée pour les usages industriels : p est exprimé en kilogrammes par centimètre carré, t en degrés. D'après cette relation, à 100°, $p = 1$ kilog; à 200°, $p = 16$ kilog.

La courbe de la figure 257 représente la marche, rapidement croissante, de la force élastique de la vapeur d'eau. Les températures sont portées sur l'axe horizontal, les pressions en atmosphères sont comptées sur l'axe vertical.

367. Force élastique maximum de la vapeur émise par la glace ⁽¹⁾ **au-dessous de 0°.** — La glace émet des vapeurs au-dessous de 0° : la mesure des forces élastiques de ces vapeurs a été faite par une application du théorème de la paroi froide.

Deux tubes barométriques plongent dans une même cuvette; le tube du baromètre à vapeur A est recourbé à sa partie supérieure en une courte branche C qui plonge dans un mélange de neige et de chlorure de calcium. Un thermomètre *t* donne la température du mélange (fig. 258).

Il n'est pas nécessaire que la chambre à vapeur soit portée entièrement à la température du mélange réfrigérant. La petite quantité d'eau qui y a été introduite distille de la partie chaude à la partie refroidie où elle vient se congeler; la distillation terminée, il ne reste plus d'eau liquide. Cependant le niveau *a* dans le baromètre à vapeur est plus bas que le niveau *b* dans le baromètre vide. La force élastique de la vapeur dans toute la chambre barométrique, mesurée par la différence des niveaux *ab* dans les deux branches, est la force élastique de la vapeur émise par la glace, dans la courte branche, à la température du mélange réfrigérant.

Cette force élastique n'est pas négligeable : à -10° , elle est $2^{\text{mm}}08$.

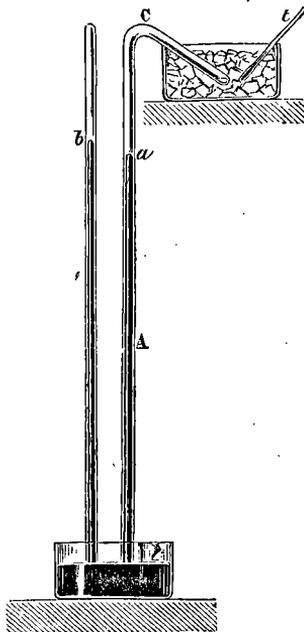


Fig. 258.

368. Forces élastiques maxima des dissolutions salines ou acides. — Lorsqu'un liquide contient en dissolution une substance quelconque, non volatile, le liquide émet seul des vapeurs; la force élastique de ces vapeurs est inférieure à la force élastique maximum du liquide pur, et d'autant moindre que la dissolution est plus concentrée. C'est ainsi qu'un mélange d'eau et d'acide sulfurique placé sous une cloche émet à une température *t* de la vapeur d'eau pure dont la force élastique atteint une valeur déterminée, inférieure à la force élastique maximum de la vapeur d'eau à la même température.

(1) Certains corps solides comme l'iode, l'arsenic, le camphre, les matières odorantes, les métaux à une température élevée, donnent directement des vapeurs sans passer par l'état liquide; on dit qu'ils se *subliment*. La glace est dans ce cas.

VAPORISATION DANS LES GAZ

369. Loi du mélange d'un gaz et d'une vapeur. — Quand une vapeur se forme dans un espace déjà occupé par un gaz, la force élastique du mélange de gaz et de vapeur est égale à la somme des forces élastiques qu'exerceraient le gaz et la vapeur s'ils occupaient séparément le volume du mélange. C'est une extension de la loi du mélange des gaz (219).

Une vapeur *non saturante* suit la loi de Mariotte comme un gaz : par suite, le gaz et la vapeur se comportent comme deux gaz.

Lorsque la vapeur est *saturante*, la force élastique qu'elle exerce dans le gaz est égale à la force élastique maximum qu'elle exercerait dans le vide à la même température. Ce *second cas* de la loi se vérifie avec l'appareil de Gay-Lussac.

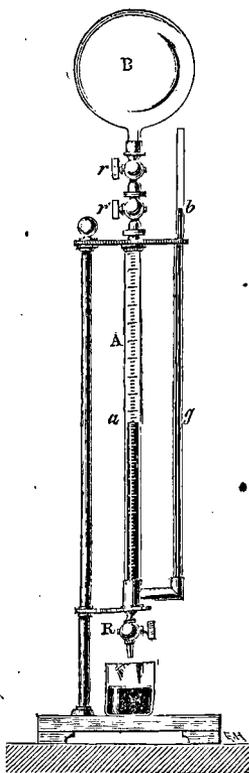


Fig. 259.

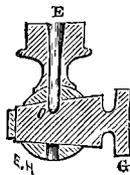


Fig. 260.

370. Vérification pour le cas d'une vapeur saturante. — Appareil de Gay-Lussac.

Description. — C'est un large tube de verre A divisé en parties d'égale capacité et terminé en haut et en bas par une garniture en fer à robinet. La garniture inférieure est munie d'un robinet R et porte une tubulure latérale sur laquelle est mastiqué un tube de verre *g* plus étroit, mais plus long que le tube A et servant de manomètre à air libre. Le robinet R permet de faire écouler le mercure que l'on verse dans les deux tubes (fig. 259).

La garniture supérieure est munie d'un robinet *r'* surmonté d'un pas de vis qui peut recevoir soit un ballon, soit un entonnoir muni d'un robinet à goutte G. Au lieu d'être percée de part en part, la clé de ce robinet (fig. 260) est creusée seulement d'une petite cavité *o*. Quand cette cavité regarde le haut, elle reçoit du liquide de l'entonnoir E; tournée de 180°, elle regarde le bas et

laisse tomber son contenu dans le tube A. A chaque tour de la clé, on puise une goutte de liquide dans l'entonnoir et on l'introduit dans le tube A sans permettre l'accès de l'air intérieur ni la sortie de l'air extérieur.

Expérience. — Au début, l'appareil ayant été bien desséché par un courant d'air sec, on ouvre le robinet r' et on verse du mercure jusqu'au sommet du tube A, le mercure se met de niveau dans les deux branches. Cela fait, on visse sur la garniture supérieure un ballon B contenant de l'air sec à la pression atmosphérique. On ouvre r , r' et R. Du mercure s'écoule, son niveau descend dans les deux tubes, mais plus vite en g où s'exerce la pression atmosphérique; car, en A l'air dilaté qui occupe maintenant le ballon et le tube possède une force élastique inférieure à la pression atmosphérique.

Avant que le tube g soit vidé, on ferme R, puis r et r' . La force élastique de l'air isolé en A est inférieure à la pression atmosphérique. On le ramène à la pression atmosphérique en versant du mercure dans la branche g jusqu'à ce que le niveau soit devenu le même de part et d'autre. On repère alors la division du tube A à laquelle affleure la colonne d'air.

On dévisse le ballon B, et pour introduire un liquide dans l'appareil, on visse sur la garniture supérieure l'entonnoir qui porte le robinet à goutte. On introduit du liquide dans le tube A : ce liquide se vaporise et le mercure monte en g' , par l'effet de la force élastique des vapeurs formées. On continue à introduire du liquide à l'aide du robinet à goutte jusqu'à ce que l'on aperçoive sur le mercure une couche de liquide non volatilisé. A ce moment, les niveaux restent stationnaires dans les deux branches, et le gaz du tube A est saturé de vapeur.

Pour mesurer sur l'appareil la force élastique de la vapeur⁽¹⁾ on ramène le gaz à son volume initial en versant du mercure par la branche g de façon à rétablir en A le niveau primitif. L'air ayant repris son volume, sa pression fait encore équilibre à la pression extérieure. La différence de niveau en a et en b est alors uniquement due à la force élastique de la vapeur. On mesure cette différence, on note sur un thermomètre la température à laquelle l'expérience

(1) D'après le volume actuel du gaz, connaissant le volume et la pression du début, on pourrait calculer la pression nouvelle du gaz sec, suivant la loi de Mariotte. En retranchant cette pression de la pression totale du mélange, la différence représenterait la force élastique de la vapeur.

vient d'être faite, et l'on trouve que la hauteur ab est précisément égale à la force élastique maximum de la vapeur dans le vide à la même température.

Résultat. — Une vapeur acquiert dans un gaz, à une température déterminée, la même force élastique maximum que dans le vide; toutefois, sa formation est plus lente et d'autant plus lente que la pression du gaz est plus forte. On voit qu'un gaz ralentit la production de la vapeur, mais n'en change pas la quantité dans un espace donné.

Si plusieurs vapeurs qui n'exercent pas d'action dissolvante l'une sur l'autre sont mélangées, chacune d'elle se comporte comme si elle était seule. La force élastique de la vapeur émise par le mélange est sensiblement égale à la somme des forces élastiques des vapeurs isolées.

DENSITÉ DES VAPEURS

371. Pour calculer la masse M d'un volume V de vapeur, il faut connaître la densité ou la masse d'un centimètre cube de cette vapeur.

La mesure de la densité a été faite directement pour l'air (339). Pour les vapeurs, comme pour les gaz, on mesure la densité par rapport à l'air.

On appelle **densité d'une vapeur par rapport à l'air** le rapport des masses ou des poids de volumes égaux de vapeur et d'air pris dans les mêmes conditions de température et de pression.

Pour obtenir la densité δ d'une vapeur par rapport à l'air, on détermine par une pesée sa masse M , on mesure en outre son volume V , sa température T et sa pression H , ce qui permet de calculer la masse m d'un égal volume d'air dans les mêmes conditions (335).

$$m = V \frac{1}{1 + \alpha T} \cdot \frac{H}{76} \cdot 0,001293.$$

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

la masse d'un volume donné de vapeur à T^0 et à la pression H est :

$$M = m\delta = V \frac{1}{1 + \alpha t} \cdot \frac{H}{76} \cdot 0,001293 \cdot \delta.$$

Au point de vue de la détermination expérimentale, il y a lieu de distinguer le cas d'une *vapeur non saturante*, éloignée de son point de saturation, exerçant une force élastique inférieure à la force élastique maximum et le cas d'une *vapeur saturante*, au contact d'un excès de son liquide, exerçant une force élastique maximum.

372. Densité d'une vapeur non saturante ou surchauffée. — En opérant à la même température, mais à diverses pressions, on voit que la densité d'une vapeur diminue quand la pression diminue. En opérant à la même pression, mais à diverses températures, on reconnaît que la densité décroît quand la température s'élève.

En résumé, la densité d'une vapeur par rapport à l'air tend par des valeurs décroissantes vers une valeur limite correspondant à un état éloigné de son point de saturation, à partir duquel elle se comporte comme un gaz parfait (318) et suit exactement les lois de Mariotte et de Gay-Lussac. C'est cette *densité limite* que l'on appelle spécialement densité de la vapeur : c'est une constante indépendante de la température et de la pression pour des températures et des pressions suffisamment éloignées du point de saturation.

Cette densité limite ou *densité théorique* est proportionnelle au poids moléculaire de la substance,

La densité d'un gaz par rapport à l'hydrogène est égale à la moitié de son poids moléculaire (1).

On obtient la densité d'un gaz par rapport à l'air en multipliant sa densité par rapport à l'hydrogène par la densité 0,0069 de l'hydrogène par rapport à l'air.

DENSITÉS PAR RAPPORT A L'AIR		DENSITÉS PAR RAPPORT A L'HYDROGÈNE	
Air.....	1	Hydrogène.....	1
Oxygène.....	1,1056	Oxygène.....	16
Eau.....	0,622	Eau.....	9
Alcool.....	1,61	Alcool.....	23
Mercure.....	6,97	Mercure.....	100
Iode.....	8,71	Iode.....	127

373. Densité d'une vapeur saturante. — La densité par rapport à l'air d'une vapeur saturante croît avec la force élastique maximum, c'est-à-dire avec la température. Elle est constamment supérieure à celle qu'on déduirait de l'application des lois de Mariotte et de Gay-Lussac. A 100°, pour la vapeur d'eau saturante elle est égale à 0,640.

Aux températures inférieures à 50°, on prend, sans erreur appréciable, pour densité de la vapeur d'eau par rapport à l'air le nombre 0,622 ou environ $\frac{5}{8}$, que la vapeur soit ou non saturante.

374. Masse d'un volume V d'air humide. — Une masse d'air humide à t^0 sous la pression H, renferme de la vapeur d'eau de force

(1) Le poids moléculaire d'un corps se déduit immédiatement de sa formule chimique.

élastique f . D'après la loi du mélange des gaz, l'air sec exerce la pression $H - f$.

La masse M de l'air humide est égale à la somme des masses de l'air sec m et de la vapeur d'eau m' .

$$\text{Masse de l'air sec : } m = V \frac{1}{1 + \alpha t} \cdot \frac{H - f}{76} \cdot 0,001293$$

Pour le calcul de la masse de la vapeur d'eau (336), la pression H du gaz doit être remplacée par la force élastique f de la vapeur et la densité d du gaz par rapport à l'air par la densité de la vapeur par rapport à l'air.

$$\text{Masse de la vapeur d'eau : } m' = V \frac{1}{1 + \alpha t} \cdot \frac{f}{76} \cdot 0,001293 \cdot 0,622.$$

Si la vapeur est saturante, f est la force élastique maximum de la vapeur à la température t .

Faisons la somme $m + m'$, et remplaçons 0,622 par $\frac{5}{8}$:

$$M = m + m' = V \frac{1}{1 + \alpha t} \cdot \frac{H - \frac{3}{8}f}{76} \cdot 0,001293.$$

Applications. — 1° Quel accroissement de volume éprouve 1 gramme d'eau à 100° en passant à l'état de vapeur saturante à la même température? A 100°, la densité par rapport à l'air de la vapeur d'eau saturante est 0,640.

2° Quel serait dans le problème précédent l'accroissement de volume calculé en prenant $\frac{5}{8}$ pour densité de la vapeur d'eau par rapport à l'air?

3° Une certaine masse de vapeur d'eau a pour volume 15 litres, pour température 50° et pour force élastique 12 millimètres. On réduit son volume à 10 litres, que devient sa force élastique? La force élastique maximum de la vapeur d'eau à 50° est $F_{50} = 92$ millimètres.

4° Le volume d'une certaine masse de vapeur d'eau à 50° est 10 litres, et sa force élastique 75 millimètres; on réduit son volume à 5 litres. Quel est le poids de la vapeur condensée ($F_{50} = 92$ millimètres)?

5° Une chambre de 120 mètres cubes de capacité est remplie d'air saturé d'humidité à la température de 15°. Calculer la masse d'eau qui sera déposée quand la température s'abaissera à 0°.

Tension maximum de la vapeur d'eau à 15°, 12^{mm}7, à 0°, 4^{mm}7; densité de la vapeur d'eau par rapport à l'air, 0,622; masse du litre d'air à 0° et 76 1^{re}293.

6° Calculer la masse de la vapeur d'eau contenue dans 20 litres d'air saturé d'humidité à 20° ($F_{20} = 17$ ^{mm},4).

7° Un mètre cube d'air à 20° contient 10 grammes de vapeur d'eau. Quelle est la force élastique de cette vapeur?

8° Quel est le volume d'air saturé à 20° qui renferme 1 kilogramme de vapeur d'eau? ($F_{20} = 17$ millimètres 4.)

9° Quel est le poids de 20 litres d'hydrogène saturé de vapeur d'eau à 50°? La pression du gaz étant 47^{cm},2 ($F_{50} = 92$ millimètres).

10° On mélange 100 litres d'air saturé d'humidité à 15° et 100 litres d'air saturé à 0°. Le volume du mélange est 200 litres à 7°5. Calculer la masse de la vapeur condensée.

11° Un aérostat contient 10 mètres cubes de gaz hydrogène sec à 15°; il est plongé

dans un air dont la pression est 75,6 et la température 15° , la tension de la vapeur d'eau de l'air est 6^{mm} . L'aérostat pèse 5 kilos 600. On demande quel poids il faudra attacher à l'aérostat pour qu'il se tienne en équilibre.

ÉVAPORATION

375. La vaporisation se fait par évaporation à toute température ou par ébullition à une température déterminée.

Dans l'évaporation, la surface libre du liquide produit seule des vapeurs; dans l'ébullition, la vapeur se forme dans la masse en bulles qui s'élèvent en agitant le liquide et se dégagent à sa surface.

376. Évaporation en vase clos. — Dans un espace limité, un liquide s'évapore tant que la vapeur formée n'a pas atteint sa force élastique maximum à la température de l'expérience, ou tant que l'espace n'est pas saturé.

377. Évaporation dans une atmosphère illimitée. — Dans ce cas, l'espace ne peut être saturé : aussi, la plupart des liquides qu'on abandonne à eux-mêmes dans une atmosphère illimitée se vaporisent graduellement et finissent par disparaître. Des lacs ont pu ainsi se dessécher par évaporation.

Rapidité de l'évaporation dans une atmosphère illimitée. — Dans une atmosphère illimitée, la rapidité de l'évaporation dépend de diverses circonstances dont on apprécie l'influence en pesant le liquide avant et après l'opération, de manière à connaître la masse m de vapeur formée en une seconde.

L'évaporation est proportionnelle à la surface d'évaporation, c'est-à-dire à la surface de contact S du liquide et de l'atmosphère ambiante. On active l'évaporation de l'eau de la mer dans les marais salants en la distribuant dans des bassins de grande surface et peu profonds.

L'évaporation est sensiblement proportionnelle à $F - f$. On représente ici par f la force élastique actuelle de la vapeur dans l'atmos-

phère et par F sa force élastique maximum à la même température⁽¹⁾.

D'après cela, dans un air absolument sec, l'évaporation de l'eau sera proportionnelle à F puisque f est nulle. Dans un air saturé d'humidité, l'évaporation de l'eau sera nulle, mais l'évaporation de l'éther, par exemple, se fera comme si l'air était sec.

La vitesse d'évaporation d'un liquide *croît avec sa force élastique maximum*. A température égale, l'éther se vaporise plus vite que l'eau.

L'évaporation croît avec la température. — Cela résulte de ce que l'élévation de température fait croître la force élastique maximum de la vapeur. Un objet mouillé se sèche rapidement s'il est chauffé.

L'évaporation croît avec l'agitation de l'air. — L'évaporation est lente dans un air parfaitement calme.

L'agitation de l'air a pour effet d'entraîner la vapeur saturée qui couvre le liquide et d'amener au contact de sa surface de nouvelles couches d'air plus sèches et par conséquent capables de recevoir de nouvelles quantités de vapeur. On sait qu'un linge mouillé sèche rapidement s'il est exposé au vent.

L'évaporation varie sensiblement en raison inverse de la pression. — Dans le vide, l'évaporation a lieu assez rapidement pour paraître instantanée; dans l'atmosphère, elle est d'autant plus lente que la pression H est plus forte; on admet que la rapidité de l'évaporation est inversement proportionnelle à H .

Résumé. — Les lois précédentes relatives à la rapidité de l'évaporation dans une atmosphère illimitée sont résumées par l'expression

$$m = \frac{BS(F - f)}{H}.$$

B est un coefficient qui dépend de la nature du liquide et croît avec l'agitation de l'atmosphère.

378. Froid produit par l'évaporation. — Un liquide volatil, en s'évaporant, absorbe une quantité de chaleur qui dépend de sa nature et qui est proportionnelle au poids vaporisé. Si l'on verse sur la main quelques gouttes d'éther, le liquide s'évapore et on éprouve un froid très appréciable. De même, on ressent une vive sensation de

(1) Cette loi n'est exacte que si la différence $F - f$ est faible.

froid quand on sort de l'eau, surtout si l'on est placé dans un courant d'air. Cela tient à l'évaporation de la mince couche d'eau dont le corps est couvert. L'eau qui a traversé les pores des alcarazas s'évapore en absorbant de la chaleur prise au liquide intérieur qui se refroidit.

Le froid fourni par l'évaporation d'un liquide volatil est fréquemment employé pour obtenir des températures très basses.

Un liquide non volatil, tel que l'huile, versé sur la main, ne produit pas d'impression de froid.

ÉBULLITION

379. Si l'on chauffe graduellement un liquide à l'air libre, il se produit d'abord une évaporation à la surface et un échauffement de la masse; puis, à un certain moment, la température s'élevant, des bulles formées sur les parois les plus chaudes du vase s'élèvent dans le liquide et viennent crever à la surface (fig. 261), ce qui accroît notablement la vaporisation. Mais dès lors, *la température ne s'élève plus* et il y a ébullition. L'ébullition est une *vaporisation caractérisée par la constance de la température et la production de bulles de vapeur au sein du liquide.*

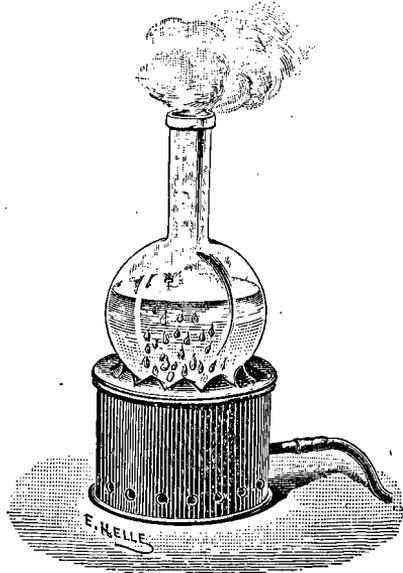


Fig. 261.

380. LOIS DE L'ÉBULLITION.
 — 1° *A une pression donnée, l'ébullition a lieu à une température déterminée, constante pour chaque liquide. Cette température s'appelle le point d'ébullition. Le point d'ébullition sous la pression atmosphérique moyenne 76 s'appelle le point d'ébullition normal.*

POINTS D'ÉBULLITION DE DIVERS LIQUIDES SOUS LA PRESSION 76

Acide sulfureux.....	—10°	Acide sulfurique monohydraté.....	325°
Éther sulfurique.....	35°,5	Mercure.....	350°
Alcool absolu.....	78°,5	Soufre.....	440°
Eau distillée.....	100°	Cadmium.....	830°
Phosphore.....	290°	Zinc.....	950°

2° Pendant l'ébullition, malgré l'action continue du foyer, la température d'un liquide homogène reste constante.

Ces deux lois se vérifient en observant un thermomètre plongé dans le liquide.

La constance de la température pendant l'ébullition prouve l'existence d'une **chaleur de vaporisation**. La chaleur du foyer sert à effectuer le changement d'état; si la chaleur fournie par la source augmente, la température du liquide ne s'élève pas davantage, mais la rapidité de sa vaporisation augmente.

3° Pendant l'ébullition, la force élastique de la vapeur dégagée est égale à la pression qui s'exerce sur le liquide.

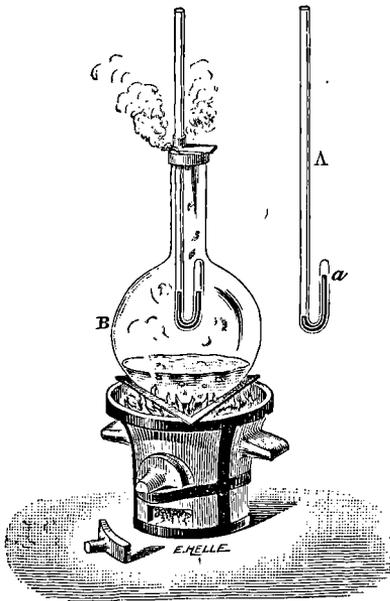


Fig. 262.

On comprend qu'une bulle de vapeur qui vient crever à la surface ne peut avoir une force élastique inférieure à la pression extérieure puisqu'elle se condenserait, ni une force élastique supérieure puisqu'elle s'est dilatée librement.

On démontre cette loi de l'ébullition en faisant bouillir de l'eau dans une cornue de verre, dont le col refroidi par un manchon où circule de l'eau froide, communique avec un ballon où l'on diminue la pression (c'est la reproduction réduite de l'appareil employé par Regnault pour la mesure des pressions de la vapeur d'eau (fig. 255)). Un thermomètre plongé dans la cornue donne la température d'ébullition, un

manomètre fait connaître la pression. Cette pression est précisément

égale à la force élastique maximum trouvée avec un baromètre à vapeur (365) à la température marquée par le thermomètre.

La démonstration se fait à la pression atmosphérique avec un appareil plus simple. Dans un ballon B contenant de l'eau on suspend un tube recourbé A dont la petite branche fermée est pleine de mercure; on fait passer en a un peu d'eau qui a été privée d'air par ébullition. L'eau du ballon B étant portée à l'ébullition, la vapeur produite en a déprime le mercure et *les deux niveaux s'établissent dans un même plan horizontal* (fig. 262).

Accroissement de volume. — Le volume de la vapeur est notablement supérieur à celui du liquide. Un litre d'eau à 100° et sous la pression moyenne 76 produit 1646 litres de vapeur. Réciproquement, cette vapeur, en se condensant, se réduit à un litre.

381. Description du phénomène de l'ébullition de l'eau.

— Quand on chauffe de l'eau ordinaire dans un vase de verre, on voit d'abord se dégager des bulles très fines; ce sont des *bulles d'air dissous*. Plus tard, la température s'élevant, il apparaît sur les parois les plus directement chauffées par le foyer des bulles plus grosses qui montent en diminuant de volume et disparaissent avant d'avoir atteint la surface; ce sont des *bulles de vapeur*, dont la force élastique, à l'instant de leur formation, est égale à la pression de l'air extérieur accrue de la pression de la colonne liquide qui les surmonte, mais elles se refroidissent en rencontrant des couches moins chaudes et se condensent, car leur force élastique, à la température qu'elles prennent, devient inférieure à la pression qu'elles subissent de l'extérieur. Cette condensation des premières bulles de vapeur est accompagnée d'un bruissement spécial appelé *chant* du liquide. Quand toute la masse liquide est devenue suffisamment chaude, une bulle formée au fond du vase ou sur les parois, ne se condense plus, elle grossit au contraire en s'élevant, car la colonne liquide qu'elle supporte diminue à mesure qu'elle monte. La force élastique de la bulle de vapeur diminue en même temps que son volume augmente. Arrivée à la surface, elle n'a plus qu'une force élastique égale à la pression extérieure et la température correspondant à cette force élastique.

CONDITIONS QUI FONT VARIER LE POINT D'ÉBULLITION

Le point d'ébullition d'un liquide varie sous diverses influences.

382. Abaissement du point d'ébullition sous de faibles pressions. — Lorsque la pression extérieure diminue, le liquide atteint à une température plus basse une force élastique maximum égale à la pression extérieure. Nous avons vu en effet qu'on pouvait abaisser le point d'ébullition en diminuant la pression (366). La même expérience se fait souvent sous une autre forme. Sous la cloche d'une machine pneumatique on place un vase renfermant de l'eau à 50° environ et un thermomètre. Si on raréfie l'air sous la cloche, le liquide entre en ébullition lorsque la pression a été réduite au point d'être égale à la force élastique maximum de la vapeur d'eau à la température marquée par le thermomètre (92 millimètres à 50°).

Ajoutons que pour purifier par distillation un liquide que la chaleur décompose facilement, on diminue la pression au-dessus de lui pour produire l'ébullition à basse température.

Ce fait de l'abaissement du point d'ébullition avec la pression se vérifie d'ailleurs à la surface du globe où l'eau bout à des températures plus basses à mesure que l'altitude augmente.

Tandis que sous une pression de 76 centimètres l'eau bout à 100°, au Puy-de-Dôme où la pression est de 63 centimètres, le point d'ébullition est 95°; à Quito, sous une pression de 55^{cm},3 le point d'ébullition est 91°35; sur le Mont-Blanc, l'ébullition a lieu à 84°. On a pu utiliser l'observation du point d'ébullition pour mesurer la hauteur des montagnes; la détermination du point d'ébullition de l'eau fait en effet connaître d'après la table des forces élastiques maximum (366) la pression atmosphérique qu'on aurait obtenue par une observation barométrique.

383. Élévation du point d'ébullition avec la pression. — Si la pression dépasse 76 centimètres, il faut élever la température du liquide au-dessus du point d'ébullition normal pour atteindre une force élastique maximum supérieure à 76 centimètres.

Dans la graduation des thermomètres, on doit tenir compte des variations avec la pression du point d'ébullition de l'eau pour la détermination précise du point 100 (281). Le niveau où s'arrête le

mercure dans la vapeur d'eau bouillante ne représente en effet le point 100 que si la pression extérieure est 76 centimètres. Si elle est différente, la table des forces élastiques maximum fait connaître la température qui correspond à la pression observée. A 100°, une différence de 27 millimètres dans la pression correspond à une variation d'environ 1° et on admet, sans erreur appréciable, que pour de plus petits écarts, il y a proportionnalité.

L'eau n'entrerait en ébullition qu'à 120°, si on exerçait à la surface libre une pression de 2 atmosphères.

384. Influence de la profondeur du liquide sur la température d'ébullition. — Puisque la vapeur, pour se former, doit avoir une force élastique au moins égale à la pression qui s'exerce sur elle, cette pression croît à l'intérieur du liquide avec la distance au niveau libre ; la température marquée par un thermomètre pendant l'ébullition augmentera donc avec la profondeur à laquelle le thermomètre est plongé.

La différence entre le point d'ébullition de l'eau à la surface et dans l'intérieur d'un vase atteint 1° à une profondeur d'environ 37 centimètres. La force élastique de la vapeur d'eau fait en effet équilibre à une colonne de mercure de 76 centimètres à 100° et à une colonne de $76 + 2,7$ à 101° ; cet accroissement de force élastique correspond à une hauteur d'eau $2,7 \cdot 13,6 = 36,72$.

385. Influence de la pureté du liquide. — Les solutions salines ont un point d'ébullition plus élevé que l'eau pure : l'eau saturée de chlorure de sodium bout à 108°,5, l'eau saturée de chlorure de calcium à 179°,5.

Le point d'ébullition de l'eau s'élève donc quand elle tient en dissolution des substances étrangères. Il s'agit de la température d'un thermomètre plongé dans le liquide, car la température de la vapeur au-dessus de la surface libre est toujours 100° sous la pression 76 (281).

386. Influence de la présence d'un gaz. — Pour que l'ébullition ait lieu à la température à laquelle la force élastique de la vapeur est égale à la pression qui surmonte le liquide, *il est nécessaire qu'il y ait des gaz dans le liquide*, sinon le point d'ébullition s'élève. Les bulles d'air adhérentes aux parois du vase se comportent comme des *noyaux de formation* des bulles de vapeur. Dans un ballon

de verre soigneusement lavé à l'acide sulfurique, le point d'ébullition de l'eau est de 1^o ou 2^o plus élevé que dans un vase de métal dont les parois retiennent mieux l'air à leur surface.

Dans l'eau absolument purgée de gaz, l'ébullition n'a lieu que très difficilement. On fait un mélange en proportions convenables d'huile de lin et d'essence de girofle ayant un peu au-dessus de 100^o une densité égale à celle de l'eau; en introduisant des gouttes d'eau dans ce liquide, elles forment des sphères qui y restent suspendues sans se mélanger avec lui. On a pu élever leur température jusqu'à 180^o sans qu'il y eût ébullition. Si on vient à les toucher avec une baguette de verre, une violente vaporisation a lieu instantanément, la petite quantité d'air adhérente au verre fournissant à la vapeur le gaz dont elle a besoin pour se former.

Lorsque dans un ballon de verre lavé à l'acide sulfurique on a fait bouillir de l'eau assez longtemps pour chasser tout l'air, l'ébullition a lieu au-dessus de 100^o. L'ébullition cesse quand on retire le ballon du feu, bien que la température soit encore supérieure à 100^o. Mais l'ébullition se reproduit avec violence si l'on y fait passer un courant électrique qui produit des bulles de gaz en décomposant l'eau (fig. 263). L'ébullition cesse quand on interrompt le courant. On opère plus simplement en projetant dans l'eau une limaille métallique

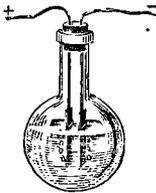


Fig. 263.

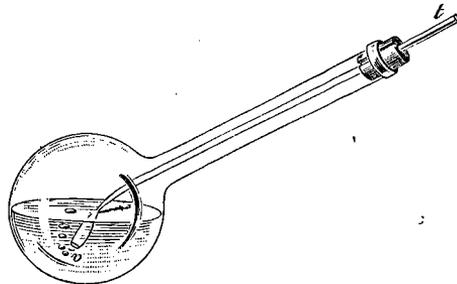


Fig. 264.

qui apporte avec elle de l'air adhérent à sa surface. Cette limaille perd sa propriété de provoquer l'ébullition si l'air qu'elle renferme a été dégagé par une ébullition très prolongée.

L'ébullition se reproduit encore si, au lieu de projeter de la limaille dans l'eau du ballon, on y descend une petite cloche de verre renversée, formée à l'extrémité d'un tube de verre *t* étranglé à la lampe (fig. 264) et contenant un peu d'air. C'est exclusivement à l'extrémité de la petite cloche *v* que se produisent les bulles de vapeur et chacune

des bulles entraîne avec elle une très petite quantité de gaz. Une masse d'air extrêmement faible suffit pour entretenir l'ébullition à 100° pendant un temps très long. L'ébullition cesse si on retire la cloche.

Nous voyons en définitive que si une atmosphère gazeuse manque à l'intérieur du liquide, l'ébullition peut être retardée. On peut donc dire que la température d'ébullition normale d'un liquide est la température *minimum* à laquelle le corps peut exister à l'état de vapeur sous la pression normale. L'état liquide est nécessaire au-dessous de cette température.

Influence de la viscosité du liquide. — La résistance qu'une vapeur éprouve pour écarter les molécules, croît avec la cohésion du liquide. L'ébullition de certains liquides visqueux, tels que l'acide sulfurique, est accompagnée de soubresauts.

387. Détermination du point d'ébullition d'un liquide. —

On détermine d'une façon précise le point d'ébullition d'un liquide en plongeant un thermomètre, non dans le liquide lui-même dont la température peut être supérieure au point d'ébullition pour différentes raisons (profondeur du liquide, expulsion des gaz, sels en dissolution), mais *dans la vapeur*. Il convient que la vapeur, avant de s'échapper au dehors, entoure le col A du ballon et préserve le thermomètre *t* de tout refroidissement (fig. 265). Pendant l'ébullition, la température du thermomètre reste fixe (380).

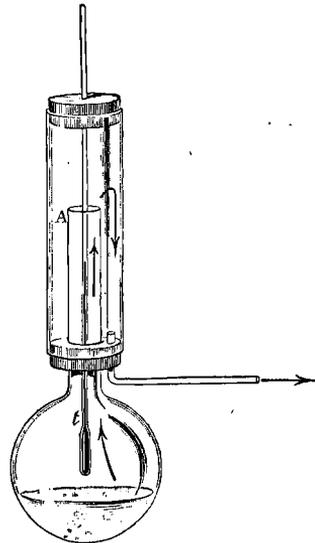


Fig. 265.

388. Ébullition en vase clos. — Un liquide chauffé dans un vase clos dont toutes les parties sont à la même température donne des vapeurs qui ne se condensent pas comme elles le font à l'air libre ou dans un appareil à distillation; elles ajoutent leur force élastique à la pression du gaz qui surmonte le liquide.

L'ébullition ne peut avoir lieu, car l'espace libre au-dessus du liquide est immédiatement saturé par la vapeur qui prend une force élastique égale à la force élastique maximum à la température de l'expérience et *s'oppose à toute vaporisation ultérieure*, même superficielle. En

continuant à chauffer, la température s'élève graduellement sans ébullition. C'est ce que l'on montre avec la marmite de Papin.

389. Marmite de Papin. — Cet appareil est une chaudière cylindrique en bronze, à parois très résistantes, remplie d'eau incomplètement et fermée par un couvercle fortement pressé par une vis (fig. 266).

La pression de la vapeur d'eau augmentant très vite à mesure que la température s'élève, le couvercle porte une ouverture fermée par une soupape de sûreté sur la tête de laquelle s'appuie un levier du troisième genre chargé d'un poids. La distance du poids au point fixe du levier est réglée de telle façon que la soupape se soulève quand la force élastique de la vapeur atteint une certaine limite. D'après la figure, la soupape se soulèverait si la pression dépassait 5 atmosphères. Sous cette pression, l'eau atteint une température de 153° .

Quand on ouvre la soupape, l'eau s'élanche en vapeur et se dilate en refoulant l'air extérieur. Cette dilatation est accompagnée d'un refroidissement qui abaisse notablement la température de la vapeur (495). La pression venant en outre à diminuer brusquement à

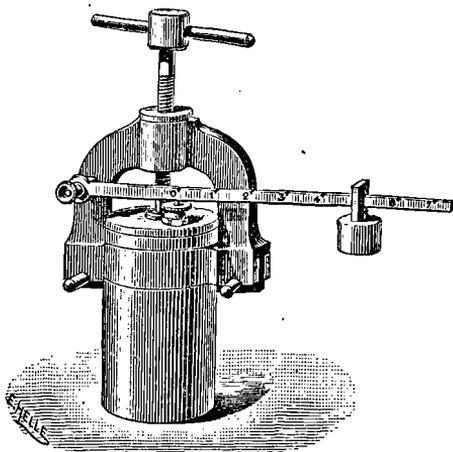


Fig. 266.

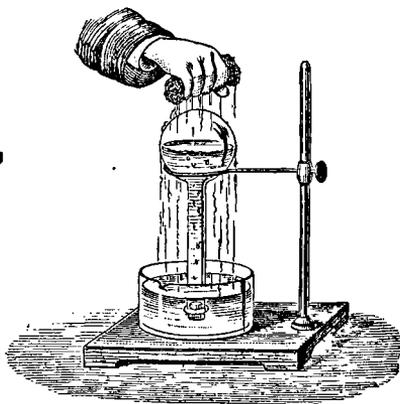


Fig. 267.

l'intérieur de la chaudière, une violente ébullition a lieu. Le point d'ébullition dépend alors de la grandeur de l'ouverture par rapport à la surface de chauffe. La température s'abaisse à 100° si la vapeur peut se dégager assez librement pour que la pression tombe à 76 centimètres.

La marmite de Papin est utilisée pour différentes opérations industrielles où l'on a besoin de *surchauffer* un liquide à une température supérieure à son point d'ébullition normal, par exemple pour dissoudre la gélatine des os dans l'eau.

L'ébullition n'est possible en vase clos que si la température *d'une des parties de l'enceinte* est maintenue au-dessous de la température du liquide (d'après le *principe de la paroi froide*), c'est ce qui a lieu dans les appareils à distillation ; c'est ce que démontre encore l'expérience suivante, due à *Franklin*.

On fait bouillir de l'eau dans un ballon de verre B et quand l'air a été chassé par le dégagement de vapeur, on bouche le ballon, on le retourne et pour éviter toute rentrée d'air on en plonge le col dans un vase E contenant de l'eau (fig. 267). L'ébullition cesse, mais si l'on refroidit la surface du ballon, par exemple en y versant de l'eau, la vapeur se condense, il en résulte une diminution de force élastique qui permet au liquide d'entrer de nouveau en ébullition. L'ébullition a lieu alors à une température d'autant plus basse que le fond du ballon est plus refroidi. Cette ébullition persiste jusqu'au moment où la température de l'eau s'est abaissée au même degré que la portion refroidie.

PHÉNOMÈNES DE CALÉFACTION

390. En jetant un peu d'eau sur une plaque métallique chauffée au-dessus de 150°, on voit cette eau se séparer en gouttes à peu près sphériques qui roulent rapidement sur la plaque et se réduisent assez lentement en vapeur.

Si l'eau a été versée sur une plaque métallique légèrement concave et suffisamment chaude, le liquide ne se divise pas, mais forme une masse à bords arrondis et très mobiles, qui ne disparaît que lentement, sans donner lieu à l'abondant dégagement de vapeurs qui se produirait si la plaque n'était chauffée qu'à 100°, 120° ou même 140°.

Le liquide caléfié forme un ménisque *convexe* (178) sur la plaque comme une goutte de mercure sur le verre et ne *mouille pas la paroi* sur laquelle il repose. On constate de diverses manières que la goutte ne touche pas la plaque. Si la plaque est percée de petits trous, le liquide ne les traverse pas. Dans la caléfaction de l'acide azotique sur une lame d'argent, le métal n'est pas attaqué.

En opérant avec une plaque bien horizontale et de l'eau rendue opaque par un peu d'encre, on voit les rayons lumineux d'une bougie passer entre un globule caléfié et la plaque (fig. 268). En joignant l'un des pôles d'une pile à la plaque et l'autre au globule, le courant électrique est interrompu.

Lorsque la plaque se refroidit, il arrive un moment où le ménisque cesse

d'être convexe, la goutte s'aplatit, mouille le métal (à ce moment le courant électrique passe) et se vaporise brusquement.

Comme le liquide caléfié n'est pas en contact avec le métal chauffé, la chaleur de ce dernier ne parvient que très difficilement au liquide à travers la couche de vapeur interposée, d'ailleurs une abondante évaporation par

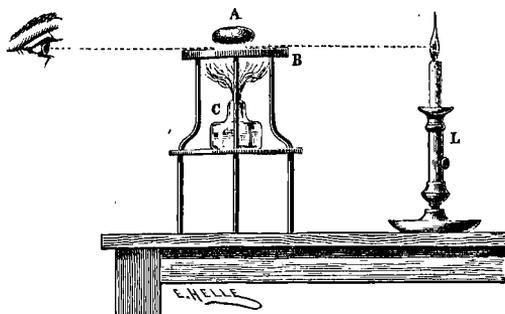


Fig. 268.

toute la surface du liquide abaisse la température du globule. Un thermomètre à petit réservoir plongé dans la goutte caléfiée indique une température *inférieure à celle de l'ébullition*.

Opérons avec un liquide qui bout au-dessous de 0° comme l'acide sulfureux liquide ; quelques gouttes de ce liquide versées dans un creuset de platine chauffé au rouge, restent liquides et n'entrent pas en ébullition, leur température est donc inférieure à -10° ; si l'on y projette quelques gouttes d'eau, cette eau se congèle et en retournant brusquement le creuset on peut en retirer de la glace bien que le creuset soit chauffé au rouge.

La connaissance de la caléfaction a permis d'expliquer certains phénomènes qui paraissaient étranges. Ainsi, c'est par un phénomène de caléfaction que l'on peut plonger impunément la main humide dans un bain de fonte de fer en fusion : le liquide qui mouille la main empêche le contact entre le métal fondu et la peau.

DISTILLATION

391. *Distiller un liquide, c'est le réduire en vapeurs que l'on condense ensuite par le refroidissement.* Un appareil à distillation est une enceinte où deux parties sont maintenues à des températures T et t . Une vapeur formée dans la région de température plus élevée T va se condenser dans la région froide de température t . L'équilibre ne peut exister que lorsque toute la vapeur formée s'est accumulée dans la partie froide (364) où s'exerce la force élastique de la vapeur à la température t .

392. La distillation permet de purifier un grand nombre de liquides ; on l'applique à débarrasser l'eau ordinaire des sels qu'elle tient en dissolution. La vapeur condensée fournit une eau pure, les sels sont restés dans la chaudière.

393. **Appareil à distillation.** — L'appareil employé industriellement pour les distillations est appelé *alambic*. Une chaudière en cuivre A, nommée *cucurbite*, contient le liquide à distiller ; elle est

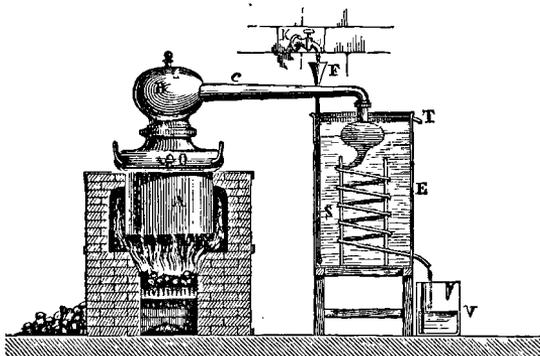


Fig. 269.

chauffée sur un fourneau. Dès que le liquide est en ébullition, sa vapeur monte dans un *chapeau* B en forme de dôme qui ferme la chaudière et passe dans un tuyau S appelé *serpentin*, contourné en spirale et placé dans un réfrigérant E plein d'eau froide. La vapeur se condense au contact des parois froides du serpentin (fig. 269).

Comme la vapeur abandonne en se liquéfiant une grande quantité de chaleur, le serpentin échauffé ne condenserait plus la vapeur si l'on n'avait soin de faire arriver au fond du réfrigérant un courant continu d'eau pure par un entonnoir F et un tube. L'eau échauffée monte dans le réfrigérant, en vertu de sa plus faible densité et s'écoule par un trop-plein T disposé à la partie supérieure de l'appareil.

394. **Chaleur absorbée et dégagée dans la distillation.** — Au point de vue des chaleurs absorbées et dégagées, la distillation nous présente : 1° une absorption de chaleur nécessaire pour produire la vapeur. Chaque unité de masse du liquide exige pour passer à l'état de vapeur saturée à T^0 une quantité de chaleur égale à la *chaleur de vaporisation* à T ; 2° un dégagement de chaleur au moment

de la liquéfaction de la vapeur. Chaque unité de masse de la vapeur restituée en se condensant la même chaleur de vaporisation.

On voit que la vapeur se comporte comme si elle transportait de la chaleur du foyer au réfrigérant. Le chauffage des habitations par circulation de vapeur peut être comparé à une distillation de l'eau en grand.

Une absorption de chaleur par la vaporisation a lieu à toute température.

395. Congélation de l'eau dans le vide. — On verse quelques

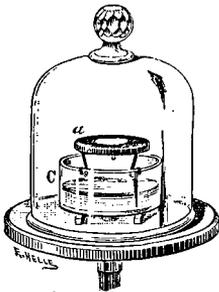


Fig. 270.

gouttes d'eau sur une capsule de liège *a* au-dessus d'un cristalliseur C contenant de l'acide sulfurique. Le tout est disposé sous la cloche d'une machine pneumatique (fig. 270). On fait le vide. La pression *H* diminuant, la vaporisation s'accélère (377), l'acide sulfurique absorbe la vapeur dégagée, ce qui diminue *f*; la chaleur de vaporisation est empruntée à l'eau elle-même qui se congèle en une petite lentille de glace.

396. Applications. — On utilise dans diverses circonstances, soit le refroidissement dû à la vaporisation d'un liquide, soit le dégagement de chaleur provenant de la condensation d'une vapeur.

Production du froid par la vaporisation. — En aspirant avec une pompe la vapeur de l'eau contenue dans une carafe, et en absorbant dans un bain d'acide sulfurique cette vapeur à mesure qu'elle se forme, on produit une évaporation rapide de l'eau. Le liquide emprunte à lui-même la chaleur nécessaire à sa vaporisation et se congèle.

L'appareil de la figure 271 sert ainsi à produire la *congélation de l'eau par une évaporation rapide*.

C'est une machine pneumatique à un seul corps de pompe. Le récipient est une carafe C contenant de l'eau. Le corps de pompe P est relié au récipient par un tuyau A sur le trajet duquel se trouve un réservoir R contenant de l'acide sulfurique qui absorbe à mesure qu'elle se forme la vapeur émise par l'eau de la carafe.

Un levier L met à la fois en mouvement la tige T du piston qui fait le vide et la tige *t* d'un agitateur qui mélange les couches d'acide sulfurique et facilite l'absorption de la vapeur d'eau.

Production du froid par la vaporisation de l'ammoniaque liquide.
 — Un récipient cylindrique A rempli aux trois quarts d'une solution saturée d'ammoniaque communique par un tube avec un vase creux C

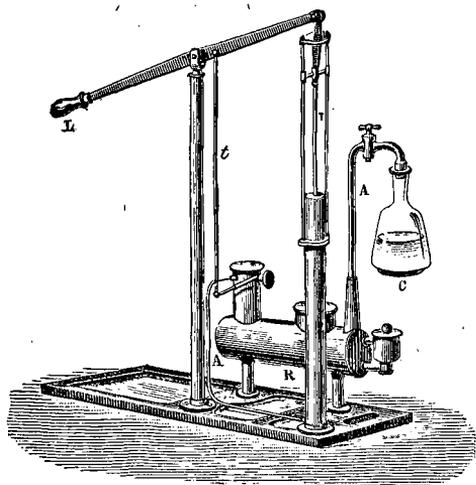


Fig. 271.

qui forme avec le récipient une enceinte fermée (fig. 272). On chauffe le récipient sur un foyer F, l'ammoniaque se dégage et va se liquéfier en C. En plon-

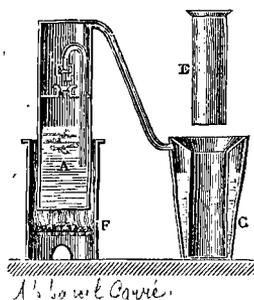


Fig. 272.

geant ensuite dans l'eau froide le récipient A, l'ammoniaque liquéfiée se vaporise à son tour sans l'intervention d'un foyer et produit un froid considérable dans le congélateur C auquel la chaleur de vaporisation est empruntée.

Si l'on a introduit dans la cavité du vase C un cylindre E plein d'eau, cette eau se congèle.

La vaporisation des gaz liquéfiés bouillant sous la pression normale à leur température d'ébullition produit des froids très considérables. On utilise ces froids pour la liquéfaction des gaz.

Dégagement de chaleur par la condensation d'une vapeur. — La propriété des vapeurs d'abandonner une grande quantité de chaleur en se liquéfiant est fréquemment utilisée pour échauffer des récipients contenant des liquides.

397. Distillations fractionnées. — En soumettant à la distillation un mélange de liquides *inégalement* volatils, les premières parties qu'on recueille seules renferment en plus forte proportion le liquide le plus volatil. En recommençant l'opération sur le résultat de cette première distillation, on obtient un produit dans lequel

domine encore plus fortement le liquide le plus volatil. Cette méthode conduit graduellement à un liquide à peu près pur. Elle est employée pour *rectifier* l'alcool, c'est-à-dire pour le débarrasser de l'eau avec laquelle il est mélangé. Les distillations fractionnées servent à séparer les divers produits du goudron.

Essai des liquides alcooliques. — Si la liqueur ne contient que de l'eau et de l'alcool, on emploie directement l'alcoomètre centésimal. Lorsque la liqueur renferme des substances dissoutes qui modifient la densité, on commence par effectuer une distillation. A cet effet, on emplit, avec le liquide alcoolique à essayer, une éprouvette graduée jusqu'à un trait marqué; on transvase dans la chaudière d'un petit appareil distillatoire, on rince l'éprouvette avec un peu d'eau que l'on verse ensuite dans la chaudière, on distille, on arrête la distillation quand le tiers du liquide a passé. On ajoute de l'eau distillée pour reproduire le volume primitif et on détermine avec un alcoomètre centesimal la proportion d'alcool du nouveau mélange.

LIQUÉFACTION DES VAPEURS

398. On donne plus spécialement le nom de **vapeurs** aux fluides élastiques obtenus par la vaporisation de substances qui sont liquides ou solides à la température ordinaire,

Deux moyens sont employés pour liquéfier une vapeur : la compression et le refroidissement.

Compression. — A une température donnée, on soumet la vapeur à une pression supérieure à la force élastique maximum qui correspond à cette température. Au-dessus du point d'ébullition normal (363) du liquide, il faut une pression supérieure à la pression atmosphérique.

Refroidissement. — A une pression déterminée, on refroidit la vapeur jusqu'à une température pour laquelle la force élastique maximum est inférieure à la pression exercée. A la pression atmosphérique, on liquéfie une vapeur en la refroidissant au-dessous du point d'ébullition normal de son liquide.

Rappelons que la liquéfaction d'une vapeur est accompagnée d'un

dégagement de chaleur, car la vapeur abandonne en se condensant la chaleur fournie précédemment au liquide pour le vaporiser.

LIQUÉFACTION DES GAZ

399. *Tous les gaz ont été liquéfiés* : ils peuvent être tous regardés comme la vapeur d'un liquide. Ce sont des *vapeurs très éloignées de leur point de liquéfaction*.

Les procédés à employer sont ceux qui ont servi à liquéfier les vapeurs : le refroidissement, la compression et enfin la compression et le refroidissement combinés.

400. **Refroidissement sous la pression atmosphérique.** — Prenons pour exemple l'*acide sulfureux*. On produit le gaz dans un ballon B, il se dessèche en traversant une éprouvette E où se con-

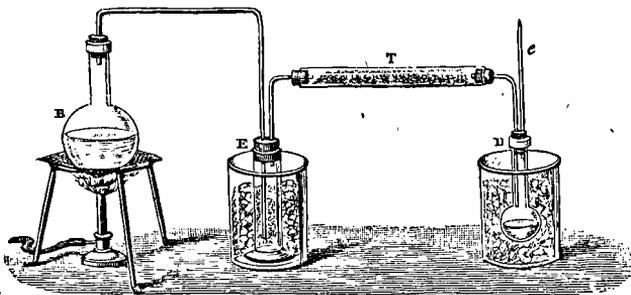


Fig. 273.

dense une partie de la vapeur d'eau et un tube T rempli de chlorure de calcium. Le gaz se rend dans un ballon D à long col plongé dans un mélange réfrigérant formé de glace pilée et de sel marin (fig. 273). Le ballon est terminé par une pointe effilée *e* ouverte dans l'atmosphère. L'acide sulfureux bout à -8° ; en d'autres termes, à -8° la force élastique maximum de sa vapeur est égale à la pression atmosphérique. On le liquéfie en le refroidissant au-dessous de -8° , car sa force élastique maximum devient alors inférieure à la pression atmosphérique.

On liquéfie donc un gaz *sous la pression atmosphérique* en le refroidissant *au-dessous du point d'ébullition normal* de son liquide.

401. Compression à la température ordinaire. — Au-dessus du point d'ébullition normal du liquide qui forme le gaz, la force élastique du gaz croît rapidement, mais on peut espérer qu'en comprimant suffisamment le gaz à la température ordinaire, on arrivera, à dépasser la force élastique maximum relative à cette température.

L'appareil de Pouillet a permis en effet de liquéfier un grand nombre de gaz par simple compression.

C'est un récipient en acier A renfermant du mercure et au-dessus de l'huile et dans lequel s'enfonce un piston plongeur à vis P (fig. 274). Ce récipient communique par un tuyau avec une boîte en acier sur laquelle sont assujettis deux tubes de deux mètres de long très résistants et bien calibrés. On introduit par le haut des tubes des gaz secs : dans l'un T de l'air pour apprécier la pression par sa variation de volume, dans l'autre T le gaz à liquéfier. On scelle ensuite au chalumeau l'extrémité des tubes et on exerce avec le piston à vis une pression croissante.

A 10° l'acide sulfureux se liquéfie sous une pression de 2 atmosphères $1/2$; à 10° la force élastique maximum de la vapeur d'acide sulfureux est en effet inférieure à 2 atmosphères $1/2$; l'acide carbonique à la même température se liquéfie sous une pression d'environ 45 atmosphères.

402. Compression et refroidissement combinés. — Dans la méthode de Faraday, on produit le gaz dans une des branches A d'un tube recourbé en V, à parois très résistantes (fig. 275); le gaz se comprime lui-même et se liquéfie dans l'autre branche B qui est refroidie. Il y a liquéfaction si la pression devient supérieure à la force élastique maximum

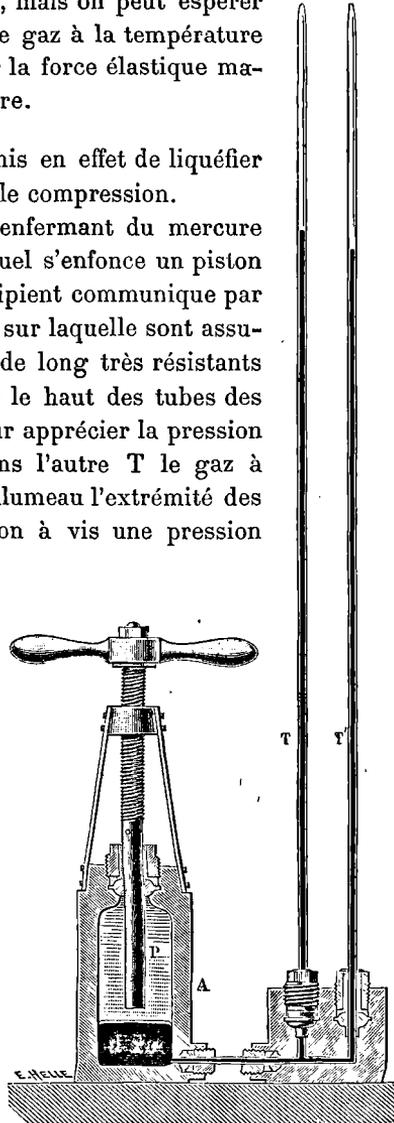


Fig. 274.

correspondant à la température du mélange réfrigérant (*principe de la paroi froide*). Le liquide se rassemble dans la branche froide.

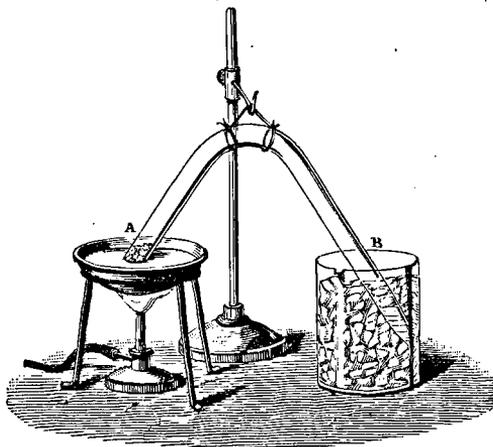


Fig. 275.

Prenons pour exemple la liquéfaction de l'*ammoniaque*. Dans l'une des branches du tube recourbé on introduit du chlorure d'argent ammoniacal qui dissout à froid un grand volume d'ammoniaque et le dégage à chaud. On a fait plonger dans un mélange réfrigérant l'autre extrémité du tube après l'avoir préalablement fermée à la lampe. En chauffant la branche qui contient le chlorure, l'ammoniaque se dégage et exerce une pression qui devient très grande dans le petit volume du tube.

L'appareil de liquéfaction de *M. Cailletet* (fig. 277) est un tube de verre *T*, à parois résistantes, recourbé à sa partie inférieure et prolongé en haut par un tube capillaire. Ce tube, rempli de gaz pur et sec, est fermé en *P* à sa partie supérieure⁽¹⁾ et transporté dans un bain de mercure que contient une cuve en acier *B*; sur cette cuve

(1) Pour remplir le tube de gaz, on le place horizontalement, on y introduit quelques gouttes de mercure *a* et on y fait passer un courant de gaz (fig. 276); l'air est chassé,

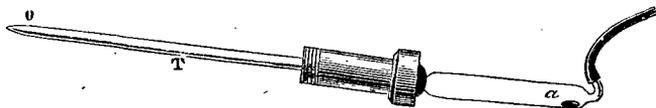


Fig. 276.

on ferme à la lampe l'extrémité *O* de la partie capillaire et on redresse le tube: le mercure ferme l'orifice inférieur du tube recourbé.

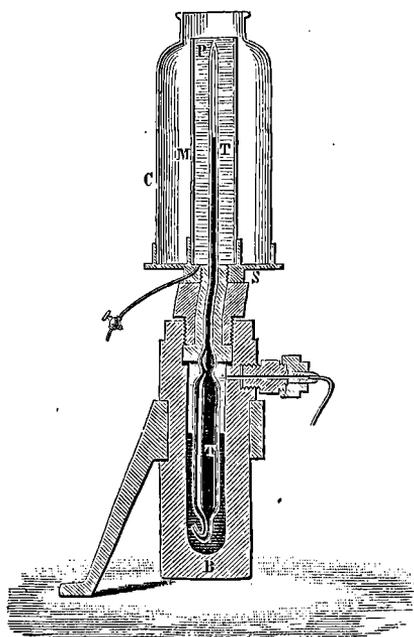


Fig. 277.

on visse une monture en bronze, afin d'avoir une fermeture hermétique. La cuve communique par un tuyau en acier *t* avec une pompe aspirante et foulante (fig. 278) qui injecte de l'eau et transmet la pression au mercure qui la transmet au gaz; cette pression est mesurée par un manomètre métallique *M*. Le mercure comprimé baisse dans la cuve et s'élève jusque dans la partie supérieure du tube capillaire. On facilite la liquéfaction du gaz en entourant le tube capillaire d'un manchon *M* qui contient un mélange réfrigérant (fig. 277).

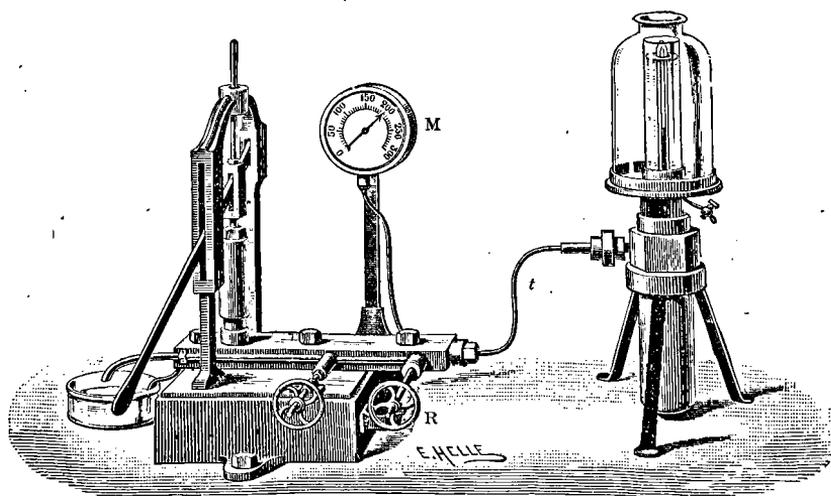


Fig. 278.

LIQUÉFACTION DES GAZ PERMANENTS

403. Gaz permanents. — Jusqu'en 1877, sept gaz : *oxygène, hydrogène, azote, oxyde de carbone, bioxyde d'azote, formène et acétylène* avaient résisté à des froids de près de -100° combinés à des pressions de plusieurs centaines d'atmosphères. Ces gaz étaient appelés **permanents**.

Examen des conditions
404. Température critique. — L'étude de la compressibilité de l'acide carbonique à des températures croissantes a montré qu'il y avait pour chaque gaz une température au-dessus de laquelle il ne peut exister à l'état liquide.

La pression à laquelle il faut soumettre l'acide carbonique pour le liquéfier croît avec la température, c'est 48 atmosphères à 13° , 61 atmosphères à 21° . *Au-dessus de 31° , la liquéfaction n'est plus possible, si forte que soit la pression et si petit que devienne le volume du gaz.* L'intérieur du tube à compression reste alors rempli par un fluide homogène, sans qu'on voie à un moment donné se produire une séparation en deux couches distinctes. Cette température de 31° au-dessus de laquelle l'acide carbonique ne peut plus exister qu'à l'état gazeux est la *température critique* de l'acide carbonique⁽¹⁾.

(1) Soit une masse d'acide carbonique gazeux égale à l'unité : représentons son volume sur l'axe horizontal, sa pression sur des perpendiculaires à l'axe horizontal. Chaque état du gaz correspondra à un point figuratif particulier (fig. 279). Comprimons le gaz à 15° par exemple, son volume diminue, le point figuratif se déplace jusqu'en M où la liquéfaction commence, elle a lieu sous une pression égale à la force élastique maximum à 15° . Pendant la liquéfaction, le volume diminue sous une pression constante, la courbe figurative est une droite horizontale. En N la liquéfaction est complète, un accroissement de pression comprime le liquide seul, la variation de volume devient alors extrêmement faible, et la courbe figurative est rapidement ascendante. Comme il s'agit de l'unité de masse, MN est la différence des *volumes spécifiques* du gaz et du liquide. A mesure que la température s'élève, la liquéfaction est retardée et la droite M'N' qui représente la diminution du volume spécifique par la liquéfaction diminue de longueur.

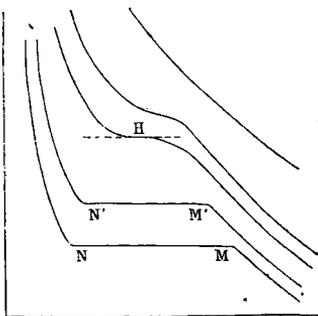


Fig. 279.

A 31° les points M' et N' se confondent en H. Au-dessus de 31° la liquéfaction n'est plus possible, la courbe est continue et le gaz suit à peu près la loi de Mariotte.

L'ordonnée du point H est la *pression critique*.

Au-dessous de la température critique, la liquéfaction est produite par une pression inférieure à la pression critique.

Chaque gaz ou vapeur a une température critique qui lui est propre.

405. Conditions à réaliser pour liquéfier un gaz. — Les gaz permanents avaient été refroidis et comprimés, mais on les avait laissés au-dessous de leur température critique qui est extrêmement basse et, même sous des pressions énormes, ils avaient conservé l'état gazeux.

La compression seule est donc impuissante à liquéfier un gaz, s'il n'a pas été d'abord refroidi au-dessous de sa température critique. Au-dessous de ce point, on pourra le liquéfier en exerçant une pression convenable.

La température critique peut servir à distinguer un gaz d'une vapeur. — L'acide carbonique peut être appelé vapeur au-dessous de sa température critique et gaz au-dessus de cette température. A l'état de gaz il ne pourrait être liquéfié par compression.

Refroidissement par la détente. — Les moyens de refroidissement employés pour liquéfier les gaz permanents avaient été insuffisants pour les amener au-dessous de leur température critique. M. Cailletet eut l'idée de recourir à l'abaissement de température très considérable que peut produire la *détente brusque* d'un gaz dans une enceinte dont les parois conduisent mal la chaleur⁽¹⁾. Faisant usage de l'appareil décrit précédemment (fig. 278) où le tube capillaire rempli de gaz fortement comprimé et parfaitement sec n'est entouré d'aucun mélange réfrigérant pour rester bien visible, on opère la détente brusque en ouvrant un robinet à vis R⁽²⁾. Si la pression tombe de 300 à 1 atmosphère, la température du gaz s'abaisse de plus de 200° et sa force

(1) Un gaz que l'on comprime dans l'appareil de la fig. 36 s'échauffe beaucoup (494); l'élévation de température peut être assez grande pour enflammer un morceau d'amadou fixé à la partie inférieure du piston (*briquet à air*).

Inversement, il y a refroidissement par la détente. Si l'on place sous la cloche d'une machine pneumatique une capsule pleine d'eau et si l'on fait le vide, on voit se produire un brouillard; cela tient à ce que la raréfaction de l'air est accompagnée d'un refroidissement qui condense la vapeur d'eau contenue dans la cloche.

Un gaz liquéfié qu'on laisse revenir à la température ordinaire détermine sur les parois du réservoir qui le renferme une pression égale à sa force élastique maximum à cette température. Cette pression peut être énorme. A 15°, la pression ainsi exercée par l'acide carbonique liquide est de 50 atmosphères. En ouvrant le robinet d'un récipient qui contient ce liquide, il sort un jet très vif d'acide carbonique gazeux et cette vaporisation produit un froid tel que le gaz se solidifie partiellement en forme de neige.

(2) Le robinet R se manœuvre à l'aide d'un volant. A côté, on voit dans la figure un autre volant qui commande un piston plongeur destiné à forcer la pression dans l'appareil (fig. 278).

élastique maximum devient inférieure à la pression atmosphérique. On voit apparaître un *brouillard* qui remplit le tube capillaire, ce brouillard est dû à des gouttelettes provenant d'une liquéfaction partielle que produit le refroidissement de la détente. Ce brouillard disparaît rapidement par suite du réchauffement du gaz par les parois du tube. Tous les gaz réputés permanents ont présenté dans ces circonstances les mêmes signes de liquéfaction.

406. Liquéfaction persistante des gaz permanents. — On obtient les gaz dits permanents en masses *liquides persistantes* en combinant la compression et le refroidissement.

Prenons pour exemple la liquéfaction de l'oxygène.

Le gaz est comprimé dans le tube de l'appareil Cailletet, mais ici ce tube est recourbé en T et plongé dans une éprouvette E où l'on fait évaporer rapidement de l'éthylène liquide sous une pression inférieure à la pression atmosphérique en faisant le vide avec une machine pneumatique (fig. 280). Le tube est ainsi refroidi au-dessous de la température critique de l'oxygène qui est -118° . Par une compression suffisante on le liquéfie. Autour de l'éprouvette on met en C du chlorure de calcium destiné à empêcher un dépôt de rosée sur le tube et à permettre de voir le liquide. On a liquéfié l'oxygène en un liquide transparent à -132° par une pression de 25 atmosphères ; à -132° la force élastique de la vapeur d'oxygène est donc inférieure à 25 atmosphères. Le *point d'ébullition normal* de l'oxygène est -181° . A cette température, la force élastique maximum de l'oxygène liquide est égale à la pression atmosphérique.

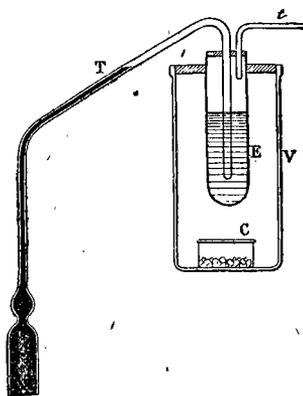


Fig. 280.

	Température critique	Point d'ébullition normal
Azote.....	-146°	-194°
Oxygène.....	-118°	-181°
Acide carbonique.....	$+31^{\circ}$	-78°
Acide sulfureux.....	$+155^{\circ}$	-10°
Éther éthylique.....	$+196^{\circ}$	$+35^{\circ}$
Alcool éthylique.....	$+259^{\circ}$	$+78^{\circ},3$
Sulfure de carbone.....	$+275^{\circ}$	$+46^{\circ}$
Eau.....	$+370^{\circ}$	$+100^{\circ}$

407. Continuité de l'état liquide et de l'état gazeux. — A la température critique, la courbe des forces élastiques maximum d'une vapeur présente une ordonnée infinie. Au-dessous de cette température, la force élastique maximum de la vapeur est finie, et sous cette pression, la substance peut exister à l'état gazeux ou à l'état liquide. A mesure qu'on se rapproche du point critique, la pression à laquelle l'état liquide est obtenu croît rapidement et sous cette pression les propriétés physiques du liquide et du gaz (*densité, dilatation, indice de réfraction*), tendent à devenir les mêmes. Au point critique, la *surface de séparation entre le liquide et sa vapeur disparaît*.

Un tube scellé, à parois épaisses renfermant de l'acide carbonique liquide, offre à basse température une séparation nette du liquide et de sa vapeur. A 30° , la surface libre du liquide devient incertaine; elle disparaît à 31° , et au-dessus on n'a plus qu'un seul fluide d'apparence uniforme. Le liquide reparait quand on refroidit le tube au-dessous de 31° .

408. Applications des gaz liquéfiés. — En raison de leur température très basse, les gaz liquéfiés serviront à de nombreuses applications. Les expériences intéressantes auxquelles donne lieu l'emploi de l'air liquéfié font concevoir tout le parti qu'on peut tirer de sa préparation industrielle.

Une goutte d'air liquide versée sur un peu de mercure le transforme immédiatement en un bloc solide. En plongeant dans de l'alcool un tube qui renferme de l'air liquide, on voit l'alcool se solidifier. Un morceau de fer maintenu dans l'air liquide pendant quelques minutes devient assez friable pour s'effriter au moindre choc. Dans les mêmes conditions, le cuivre reste malléable. Ajoutons qu'il suffit de recueillir les premières parties du gaz obtenu dans l'évaporation de l'air liquide pour obtenir de l'oxygène presque pur. L'air liquide est en effet un mélange d'oxygène et d'azote liquides : l'oxygène est plus volatil et bout à -181° , tandis que l'azote ne bout qu'à -194° .

HYGROMÉTRIE

409. Vapeur d'eau de l'atmosphère. — L'évaporation incessante qui se produit à la surface des masses d'eau répandues sur le

globe fournit à l'atmosphère de grandes quantités de vapeur d'eau qui se trouve dans l'air à l'état de *nuages* dans les hautes régions et à l'état de vapeur invisible autour de nous. Cette vapeur d'eau invisible se condense à la surface d'une carafe froide, sur la face intérieure des vitres d'une chambre en hiver; c'est elle qui produit l'augmentation de poids de certaines substances telles que la chaux vive ou l'acide sulfurique.

La masse de vapeur d'eau qui se trouve dans l'atmosphère est *variable*; elle exerce une influence importante sur beaucoup de phénomènes : formation des brouillards, des nuages, de la rosée, etc. Ces phénomènes ne dépendent pas seulement de la masse m de vapeur d'eau contenue à un instant donné dans un certain volume d'air, mais aussi de la masse M qui y serait contenue à la même température si l'air était saturé. L'air est dit humide quand il est près d'être saturé; la différence $M - m$ est alors petite, et un petit abaissement de température provoque la condensation de la vapeur; il est dit sec dans le cas contraire.

410. But de l'hygrométrie. — Le problème de l'hygrométrie consiste à *déterminer la masse de vapeur d'eau contenue à un moment donné dans un centimètre cube d'air.*

État hygrométrique. — Cette masse étant connue, on peut calculer le rapport $\frac{m}{M}$ qui existe entre cette masse et celle qui serait contenue dans le même volume d'air saturé à la même température; ce rapport par lequel on caractérise habituellement l'état d'humidité de l'air s'appelle *état hygrométrique de l'air.*

Dans l'air saturé $\frac{m}{M} = 1$; dans l'air absolument sec on aurait $\frac{m}{M} = 0$.

La vapeur d'eau de l'air exerce, comme un gaz, une force élastique f ; à l'aide de cette force élastique et de la densité δ de la vapeur, on calcule, en appliquant la loi de Mariotte, la masse m de vapeur contenue dans un volume V d'air à la température t .

$$m = \frac{V}{1 + \alpha t} \cdot \frac{f}{76} 0,001293 \cdot \delta. \quad (1)$$

La masse M de vapeur saturante contenue dans le volume V , à la température t , se calcule de même au moyen de la force élastique maximum F :

$$M = \frac{V}{1 + \alpha t} \cdot \frac{F}{76} 0,001293 \cdot \delta.$$

D'après ces expressions, on voit que $\frac{m}{M} = \frac{f}{F}$, on peut donc encore définir l'état hygrométrique de l'air : le rapport qui existe entre la force élastique actuelle f de la vapeur d'eau dans l'air et la force élastique F de la vapeur qui y serait contenue si l'air était saturé à la même température.

411. Hygromètres. — Les hygromètres sont des appareils destinés à mesurer, soit la masse m de vapeur d'eau contenue dans un centimètre cube d'air, soit la force élastique f de cette vapeur. On calcule ensuite, si l'on veut, l'état hygrométrique $\frac{m}{M}$ ou $\frac{f}{F}$.

412. Hygromètre chimique. — La méthode chimique consiste à absorber au moyen de réactifs chimiques la vapeur d'eau contenue dans un volume connu d'air et à déterminer par la balance sa masse m . L'équation (1) donnera f .

Appareil (fig. 281). — Des tubes desséchants en forme d'U communiquent par un tube c avec l'enceinte dont on veut apprécier le degré d'humidité. Ces tubes sont traversés par un courant d'air

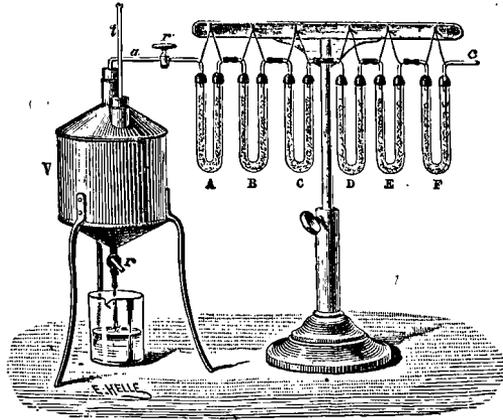


Fig. 281.

appelé par un aspirateur V. L'aspirateur est un vase cylindro-conique d'une cinquantaine de litres portant à sa partie inférieure un robinet r et à sa partie supérieure un tube a qui descend jusqu'au fond du vase et le relie aux tubes desséchants. En faisant écouler l'eau de l'aspirateur par le robinet r , le vide laissé par l'eau est comblé

par l'air extérieur qui gagne l'aspirateur en traversant : 1° des tubes *desséchants* C, D, E, F, remplis de pierre ponce imbibée d'acide sulfurique; 2° Un tube *témoin* B qui ne doit pas varier de poids et indiquer ainsi que toute l'humidité a été cédée aux quatre premiers tubes; 3° un tube A que l'on ne pèse pas, destiné à retenir l'humidité qui pourrait par accident refluer de l'aspirateur.

Expérience. — Pour procéder à l'expérience, on fait d'abord la tare des quatre tubes C, D, E, F, puis on fait écouler très lentement l'eau de l'aspirateur et on recueille cette eau dans un récipient gradué. Quand on a cessé de faire écouler l'eau, on reporte les tubes C, D, E, F sur le plateau de la balance : leur augmentation de poids en grammes m représente la masse de vapeur d'eau contenue dans le volume d'air qui a traversé les tubes.

Calcul. — Appelons V le volume que la vapeur d'eau occupait dans l'enceinte où elle a été puisée par le tube c , et f la force élastique qu'elle y exerçait :

$$m = V \frac{1}{1 + \alpha t} \cdot \frac{f}{76} 0,001293.0,622. \quad (1)$$

L'air sec qui accompagnait la vapeur dans ce volume V à la température t avait une force élastique $H - f$; cet air s'est saturé d'humidité dans l'aspirateur, y a acquis une température t' indiquée par le thermomètre, une force élastique $H - F$ et un volume U ; ce volume U est le volume de l'eau écoulee mesuré par le récipient gradué.

$$\text{La relation } \frac{V(H-f)}{1 + \alpha t} = \frac{U(H-F)}{1 + \alpha t'} \quad (2)$$

nous fera connaître V , on porte sa valeur dans l'expression de la masse m , on a une équation d'où l'on déduit f .

On pourra ensuite calculer $\frac{f}{F}$.

Cette méthode est très précise pourvu que l'air circule très lentement dans les tubes et que l'expérience soit assez longue pour donner un accroissement de poids susceptible d'être évalué avec exactitude; toutefois, cette méthode ne convient pas pour mettre en évidence les variations rapides de la quantité d'humidité : elle ne fait connaître que la *force élastique moyenne* pendant la durée de l'écoulement.

413. Hygromètres de condensation. — *Principe de la méthode.* — Si l'on place dans l'air un vase rempli d'eau que l'on refroidit suffisamment, un dépôt de rosée se forme sur la surface extérieure; il suffit pour cela d'un faible refroidissement lorsque l'air est humide, mais plus l'air est sec, plus il faut abaisser la température du vase pour obtenir le dépôt. Au contact du vase froid, la température des couches d'air voisines s'abaisse graduellement jusqu'à une température t' à laquelle la vapeur d'eau devient saturante, et le moindre refroidissement suffit alors pour produire la condensation de cette vapeur. Comme l'air s'est refroidi sans que la force élastique de la vapeur qu'il contient ait changé, la force élastique maximum à la température t' est égale à la force élastique f que la vapeur d'eau exerçait primitivement à la température t .

Si l'on a déterminé la température t' , la table des forces élastiques maximum donnera f . On pourra ensuite calculer la masse de vapeur d'eau contenue dans l'unité de volume d'air. Les hygromètres de condensation servent à obtenir t' .

La température t'_1 , observée pour le dépôt de rosée est légèrement inférieure à t' , car le dépôt commence un peu avant qu'il soit aperçu, d'où il résulte qu'on a continué à refroidir le vase. En laissant le vase se réchauffer, la vapeur d'eau condensée sur sa surface disparaît; la température de disparition t'_2 est un peu supérieure à t' , car la disparition a commencé un peu avant qu'elle fût manifeste et le réchauffement s'est poursuivi. On prend pour t' la moyenne $\frac{t'_1 + t'_2}{2}$, qui est d'autant plus voisine de t' que t'_1 et t'_2 diffèrent moins.

414. Hygromètre de Daniell. — Le fonctionnement de l'hygromètre de Daniell présente assez d'intérêt pour être décrit; toutefois, la précision de l'appareil laisse à désirer.

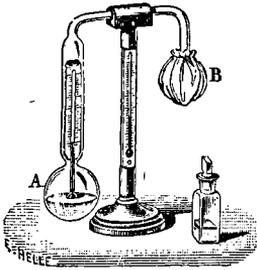


Fig. 282.

Appareil. — Cet hygromètre est un large tube de verre deux fois recourbé à angle droit et terminé par deux sphères creuses : l'une A en verre bleu, l'autre B en verre blanc et entourée d'une mousseline. La boule A contient de l'éther au milieu duquel plonge un thermomètre; cet éther a été porté à l'ébullition avant la fermeture de l'appareil afin de chasser l'air (fig. 282).

Expérience. — Après avoir fait passer la totalité du liquide intérieur dans la boule A, on verse de l'éther sur la mousseline de la boule B; la vaporisation de cet éther refroidit cette boule et amène la condensation de la vapeur

intérieure. De là une diminution de la force élastique de la vapeur contenue en B et une distillation de A vers B qui cause le refroidissement de la boule A. Quand le refroidissement de A est suffisant, la vapeur d'eau atmosphérique se condense à la surface extérieure en formant une *couronne de rosée* à la hauteur du niveau du liquide. A cet instant, la température t'_1 du thermomètre intérieur est la température de l'éther et approximativement celle de la surface de la boule dont la paroi est mince. On laisse l'appareil se réchauffer et on note la température t'_2 à laquelle le dépôt disparaît. On pose

$$t' = \frac{t'_1 + t'_2}{2}.$$

Incertitudes. — En raison de la mauvaise conductibilité du verre, les températures observées ne sont pas exactement les températures de la surface extérieure de la boule bleue, la température t'_1 est trop basse et la température t'_2 trop élevée. En outre, le poids de la vapeur d'eau contenu dans les couches d'air qui entourent l'appareil est *accru* par la présence de l'observateur qui exhale de la vapeur d'eau et par l'éther versé sur la mousseline qui n'est jamais rigoureusement anhydre.

415. Hygromètre d'Alluard. — Le dépôt de rosée se fait sur une face plane bien polie et dorée d'une petite caisse prismatique A en laiton mince. Cette face plane est encadrée par une lame de laiton également polie et dorée O qui ne la touche pas. Le vase A contient de l'éther. A l'aide d'un petit soufflet on insuffle de l'air par le tube HD qui plonge dans l'éther; la vapeur est entraînée par un autre tube GC. L'évaporation de l'éther amène le refroidissement de la face dorée. Un dépôt de rosée s'y produit à un certain moment et donne une teinte mate au métal sur lequel il se forme; la lame qui l'encadre sans la toucher n'est pas refroidie et conserve son éclat; la *comparaison* des deux lames juxtaposées permet de saisir par contraste l'instant où apparaît et l'instant où disparaît le dépôt (fig. 283).

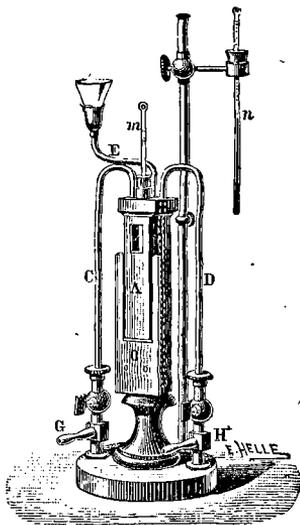


Fig. 283.

Un thermomètre intérieur m marque la température de l'éther qui est aussi celle de la face de laiton, un thermomètre extérieur n fait connaître la température de l'air ambiant. On observe les thermo-

mètres et la face du prisme avec une lunette qui éloigne l'observateur et la vapeur d'eau qu'il exhale (fig. 284).

On prend la moyenne $\frac{t'_1 + t'_2}{2}$ des températures d'apparition et de disparition du dépôt.

En air calme, cet hygromètre fournit des indications très exactes ;

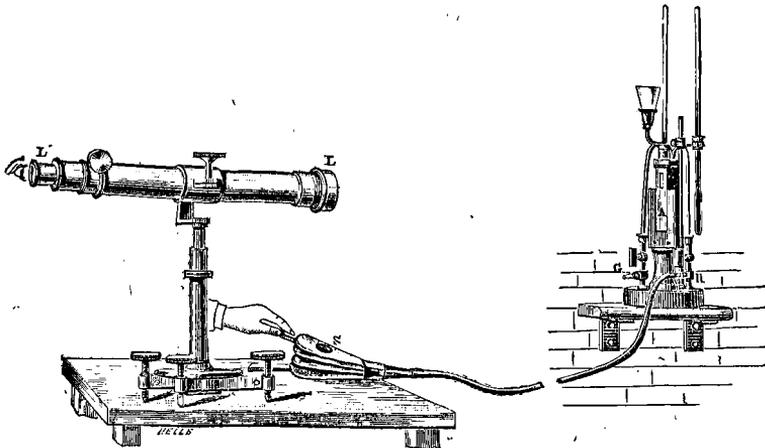


Fig. 284.

s'il est exposé au vent, la vitesse d'évaporation sur la lame A peut être assez grande pour que la rosée n'apparaisse plus.

416. Hygromètres d'absorption. — Un grand nombre de substances animales et végétales dites *hygrométriques* absorbent la vapeur d'eau de l'air et changent de volume avec l'état d'humidité. Le cheveu est une des substances les plus sensibles à cette influence, il s'allonge dans l'air humide et se raccourcit dans l'air sec.

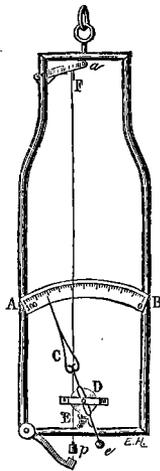


Fig. 285.

417. Hygromètre à cheveu de dé Saussure. — Un cheveu bien dégraissé (fig. 285), long d'environ 30 centimètres est fixé dans une pince par son extrémité supérieure F et sur l'une des gorges d'une poulie à double gorge D par son extrémité inférieure. Sur la seconde gorge de la poulie s'enroule un fil de soie terminé par un poids p de 2 décigrammes destiné à tendre le cheveu. L'axe de la poulie est muni d'une aiguille C dont la pointe est mobile sur un cadran divisé AB. L'aiguille s'abaisse quand le cheveu s'allonge et se relève quand il se raccourcit. L'aiguille est équilibrée par un contrepoids e , et le centre de gravité du système mobile se trouve sur l'axe de rotation

de telle sorte que l'aiguille reste d'elle-même en équilibre dans toutes les positions.

On porte l'instrument dans une cloche pleine d'air desséché par de l'acide sulfurique concentré, et on marque 0 au point où s'arrête l'aiguille. On marque 100 au point où elle s'arrête dans une cloche saturée d'humidité. L'intervalle est divisé en 100 parties égales qu'on appelle *degrés de l'hygromètre*. La position de l'aiguille indique si l'air est voisin de la sécheresse absolue (0) ou de l'humidité extrême (100). Pour transformer cet appareil en appareil de mesure, il faut le graduer en le plongeant successivement dans diverses enceintes où la force élastique de la vapeur d'eau est connue.

Applications. — 1° Un mètre cube d'air à 20° contient 10 grammes de vapeur d'eau. Quel est l'état hygrométrique de cet air? $F_{20} = 17^{\text{mm}}, 4$.

2° Quelle est la masse de 592 centimètres cubes d'air à 15° sous la pression 74 et à l'état hygrométrique 0,84? $F_{15} = 12^{\text{mm}}, 7$.

3° Quelle perte de poids éprouvera par son immersion dans l'air un ballon de 10 litres à 20°, la pression étant 75 et l'état hygrométrique $\frac{3}{4}$?

4° Un mètre cube d'air humide à 20° a un état hygrométrique égal à $\frac{3}{4}$. Quelle est la masse de vapeur d'eau qui se liquéfiera si la température s'abaisse à 0°? $F_{20} = 17^{\text{mm}}, 4$; $F_0 = 4^{\text{mm}}, 6$.

5° En déterminant l'état hygrométrique de l'air par la méthode chimique, on a fait écouler 50 litres d'eau de l'aspirateur à 20°. Le poids de vapeur condensée est 0^{gr}25, la température extérieure 10° et la pression 75. Quel est l'état hygrométrique? $F_{10} = 9^{\text{mm}}, 16$.

6° Un ballon de verre renferme à 30° de l'air à l'état hygrométrique $\frac{1}{2}$ et à la pression 76,5. Il a, à cette température, une capacité intérieure égale à 3 litres. On le refroidit graduellement jusqu'à zéro. Quel est le poids de vapeur d'eau qui se condense et quelle est la pression finale à l'intérieur du ballon? On négligera la dilatation de l'enveloppe. $F_0 = 4^{\text{mm}}, 5$; $F_{30} = 31^{\text{mm}}, 5$; le coefficient de dilatation de l'air et de la vapeur d'eau est 0,00367. Le poids du litre d'air à 0° et 76 est 1^{gr}293, la densité de la vapeur d'eau par rapport à l'air est 0,622.

7° Un récipient de 10 litres de capacité est rempli d'air sec à 0° et 76. On y introduit par un robinet à goutte 3 grammes d'eau et on chauffe le tout à 100°. On demande : 1° quel sera alors l'état hygrométrique de cet air; 2° quelle est la pression totale de cet air humide? On négligera la dilatation de l'enveloppe.

CALORIMÉTRIE

418. Quantité de chaleur. — Un corps combustible dégage de la chaleur en brûlant. Comme il faut constamment brûler une même quantité de charbon pour échauffer un même corps de 0° à t° , on dit que ce corps exige toujours une même quantité de chaleur pour passer de 0° à t° . L'échauffement simultané de 0° à t° de deux, trois corps identiques au premier exige une dépense de charbon double

ou triple, la quantité de chaleur fournie est également double ou triple.

419. Objet de la calorimétrie. — La calorimétrie a pour objet la mesure des quantités de chaleur. On s'occupe en calorimétrie d'évaluer les quantités de chaleur absorbées par un corps dont on élève la température, ou par un corps qui subit un changement d'état, ou par un corps qui entre en combinaison chimique.

420. Calorie. — On mesure les quantités de chaleur au moyen d'une unité appelée calorie. La *calorie est la quantité de chaleur qu'il faut donner à l'unité de masse d'eau* (gramme-masse ou par abréviation gramme) *pour élever sa température de 0° à 1°* (du thermomètre normal à hydrogène et à échelle centigrade).

On appelle quelquefois *Calorie* la quantité de chaleur capable d'élever de 0° à 1° la température d'un *kilogramme* d'eau. Cette *Calorie*, qu'on distingue de l'autre dans l'écriture par une majuscule, peut s'appeler *Calorie du kilogramme*. Une *Calorie* vaut 1000 *calories*.

Dans la suite, nous emploierons exclusivement la calorie du gramme, sauf pour un instant, dans la détermination de l'Équivalent mécanique de la Chaleur et pour certains calculs de mécanique industrielle.

421. PRINCIPES EXPÉRIMENTAUX. — 1° La réalisation d'un *même phénomène* qui absorbe de la chaleur exige toujours la *même quantité de chaleur*.

2° Pour échauffer *du même nombre de degrés* des masses différentes d'un même corps, il faut *des quantités de chaleur proportionnelles à ces masses*.

3° Si une certaine quantité de chaleur est absorbée dans un phénomène, une quantité de chaleur *précisément égale* est dégagée dans le *phénomène inverse*; ainsi, la quantité de chaleur absorbée par un corps qui s'échauffe de t à T est égale à celle qu'il dégage en se refroidissant de T à t .

Ces propositions résultent de l'ensemble des expériences.

422. Définition pratique de la calorie. — Ces principes expérimentaux étant posés, on constate que si l'on mélange 1 kilogramme d'eau à 0° et 1 kilogramme d'eau à 2°, on obtient 2 kilogrammes à 1°.

Cela prouve qu'il faut la même quantité de chaleur pour porter une même masse d'eau de 0° à 1° et de 1° à 2° .

Et encore, si l'on mélange 1 kilogramme d'eau à T° et 1 kilogramme d'eau à 0° , la température du mélange est très voisine de $\frac{T}{2}$. Cela prouve qu'il faut *très sensiblement* la même quantité de chaleur pour échauffer une même masse d'eau de 0° à 1° , de 1° à 2° ... de t° à $(t+1)^{\circ}$ jusqu'à T° . Cela se vérifie jusqu'à 50° environ.

D'après cela, on peut, sans erreur appréciable, appeler *calorie* la quantité de chaleur nécessaire pour élever de t° à $(t+1)^{\circ}$ la température de l'unité de masse d'eau. Il faudra donc $t-t'$ calories pour élever de $t-t'$ degrés la température de 1 gramme d'eau et $m(t-t')$ calories pour élever de $t-t'$ degrés la température de m grammes d'eau.

CHALEURS SPÉCIFIQUES

423. Chauffons dans l'eau bouillante trois boules de même rayon ⁽¹⁾ et également pesantes de cuivre, étain et plomb, et portons-les rapidement sur un gâteau de cire d'épaisseur convenable (fig. 286); la boule de cuivre C le traverse rapidement, la boule d'étain E y pénètre profondément, et la boule de plomb P ne fait qu'y pénétrer légèrement. En se refroidissant jusqu'à la température de la cire, le cuivre a donc abandonné plus de chaleur que l'étain, et celui-ci plus que le plomb. Il faut donc des quantités de chaleur inégales pour porter à la même température des masses égales de différents corps.

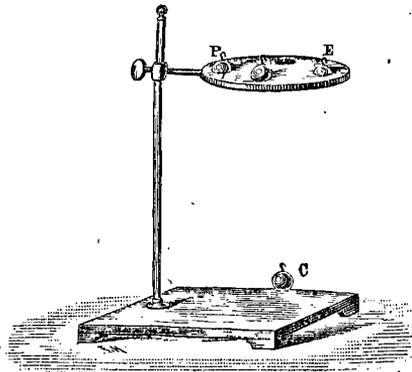


Fig. 286.

On appelle **chaleur spécifique** d'un corps à t° le nombre de calories qu'il faut fournir à un gramme de ce corps pour élever sa température de t° à $(t+1)^{\circ}$.

(1) Les boules formées des substances les plus lourdes sont creuses.

D'après la définition pratique de la calorie, la chaleur spécifique de l'eau à t^0 est 1 (jusqu'à 50^0 environ).

Si l'on représente par Q le nombre de calories nécessaires pour échauffer de 0^0 à t^0 un gramme d'un corps, le quotient $\frac{Q}{t}$ est à peu près constant entre des limites peu étendues, par exemple entre 0^0 et 100^0 , pour un grand nombre de corps : c'est le nombre de calories absorbées par l'unité de masse d'un corps lorsque sa température s'élève de 1^0 ; on l'appelle *chaleur spécifique moyenne* de 0^0 à t^0 .

424. Capacité calorifique. — Soit m la masse d'un corps homogène ; appelons c la chaleur spécifique moyenne de sa substance, le produit mc s'appelle la *capacité calorifique* du corps ou son équivalent en eau ; c'est en effet la masse d'eau qui absorberait le même nombre de calories pour s'échauffer de 1^0 . Si la température du corps croît de t^0 , le nombre de calories absorbées est mct .

425. Détermination des chaleurs spécifiques moyennes. — La méthode la plus employée est la méthode des mélanges.

Méthode des mélanges. — *Principe de la méthode.* — On mélange deux corps de températures différentes, par exemple 3000 grammes de mercure à 100^0 et 1000 grammes d'eau à 0^0 ; il s'établit bientôt un équilibre de température et la température finale du mélange atteint 9^0 .

Si l'opération s'est faite sans perte de chaleur, la chaleur abandonnée par le mercure est égale à la chaleur gagnée par l'eau.

Le mercure s'est abaissé de 91^0 ; si x désigne la chaleur spécifique moyenne du mercure, 3000 grammes de mercure ont perdu :

$$3000 \cdot 91 \cdot x \text{ calories.}$$

D'autre part, le gain de chaleur des 1000 grammes d'eau est :

$$1000 \cdot 9.$$

Nous aurons donc l'égalité :

$$3000 \cdot 91 \cdot x = 1000 \cdot 9$$

$$\text{on en tire } x = 0,033.$$

$$M \quad T \quad \left\{ \theta \right.$$

$$m$$

$$Mx (T - \theta) = m \theta t$$

$$x = \frac{m}{M} \frac{\theta - t}{T - \theta}$$

426. Appareil de Regnault (fig. 287). — Une masse connue de la substance, cassée en petits fragments, est placée dans la concavité annulaire d'une corbeille G en fine toile de laiton (fig. 288). Cette corbeille est suspendue, par trois fils de soie que termine un cordon,

dans une étuve à double enveloppe F maintenue à une température constante par un courant de vapeur d'eau (fig. 289). Quand le ther-

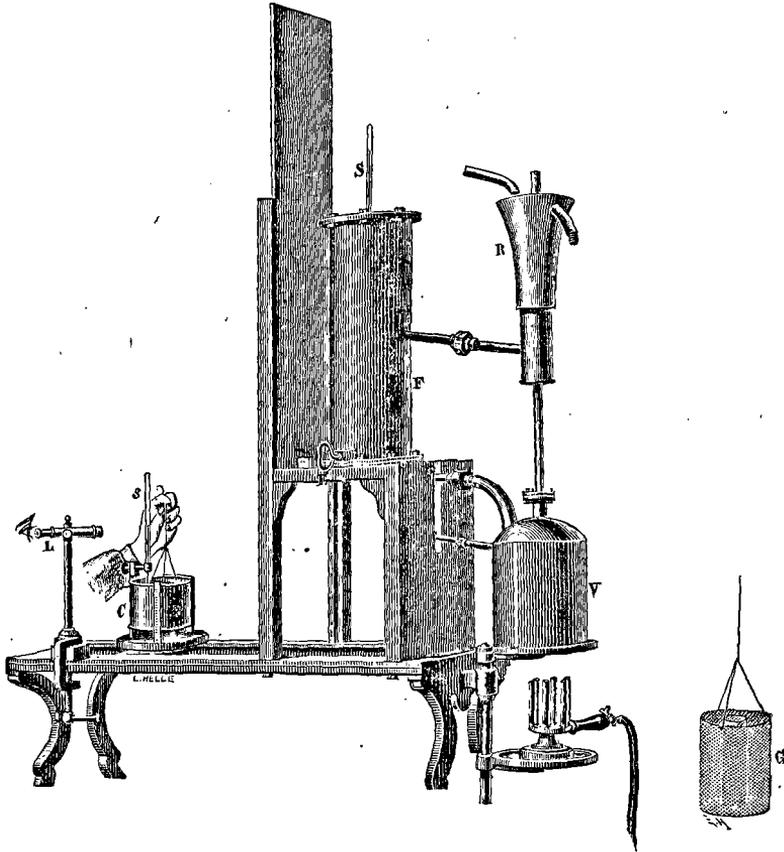


Fig. 287.

Fig. 288.

momètre S logé dans l'axe de la corbeille marque depuis une vingtaine de minutes une température rigoureusement stationnaire T, on fait rapidement glisser sous l'étuve un récipient cylindrique en laiton mince *c* appelé *calorimètre*; le calorimètre contient de l'eau à une température *t* marquée par un thermomètre sensible *s* de petite dimension; on y laisse tomber doucement la corbeille et le corps ⁽¹⁾.

(1) L'étuve est formée de trois cylindres concentriques, la corbeille G et le thermomètre sont logés dans le cylindre central. Un tiroir E, facile à manœuvrer, permet de laisser descendre dans le calorimètre au moment voulu, la corbeille et son contenu. La vapeur qui circule dans l'étuve est produite par une chaudière V; un réfrigérant R condense la vapeur à sa sortie et la fait retomber dans la chaudière.

On éloigne ensuite le calorimètre de l'étuve et tout en agitant la corbeille et le corps dans le liquide, on observe avec une lunette L le thermomètre plongé dans l'eau dont la température passe rapidement de la température t à une température maximum θ .

427. Calcul. — Le corps et la corbeille ont perdu $T - \theta$ degrés, le calorimètre et son contenu ont gagné $\theta - t$.

Soient M la masse du corps, x sa chaleur spécifique, m_1 la masse de la corbeille, c la chaleur spécifique du lait, la chaleur abandonnée par le corps et la corbeille est :

$$(Mx + m_1c)(T - \theta).$$

Désignons par E la masse de l'eau du calorimètre, par m , m' , m'' les masses du calorimètre, du verre et du mercure du thermomètre, par c , c' , c'' les chaleurs spécifiques du lait, du verre et du mercure. La capacité calorifique de l'ensemble du calorimètre, de l'eau et du thermomètre est :

$$M' = E + mc + m'c' + m''c'' \text{ (1)}.$$

$M'(\theta - t)$ est la chaleur gagnée par le calorimètre et son contenu.

Dès que le calorimètre s'est échauffé au-dessus de la température du milieu ambiant, il perd de la chaleur par la conductibilité de ses supports, par rayonnement, par évaporation et par contact de l'air.

On écrit que la chaleur abandonnée par tout ce qui s'est refroidi est égale à la chaleur gagnée par ce qui s'est échauffé, accrue de la chaleur R perdue par refroidissement.

C'est ce qu'exprime l'équation :

$$(Mx + m_1c)(T - \theta) = M'(\theta - t) + R.$$

428. Correction de refroidissement. — On rend la perte par *conductibilité* négligeable en supportant le calorimètre par trois *pointes de liège*; on réduit la perte par *rayonnement* en *polissant la surface extérieure* du calorimètre pour diminuer son pouvoir émissif (484) et en l'entourant d'un autre vase en lait *C poli intérieurement* qui renvoie sur le calorimètre la chaleur rayonnante qu'il en reçoit. L'immo-

(1) Habituellement, on ne calcule pas mc , $m'c'$, $m''c''$, mais on détermine cette somme expérimentalement en faisant une deuxième expérience avec des masses M et E différentes; on a ainsi une deuxième équation qui donne en bloc la somme $mc + m'c' + m''c''$.

bilité de la couche d'air comprise entre les deux vases de laiton réduit la déperdition par *le contact de l'air* (fig. 289).

Malgré ces précautions, le calorimètre se refroidit, et c'est pour cela que le thermomètre, après avoir atteint un maximum θ au moment de l'équilibre de température, accuse ensuite un décroissement lent.

(Voici comment on effectue la correction du refroidissement, quand on ne néglige pas R.

Un aide a noté la température du calorimètre de 10 en 10 secondes.

On calcule pour chacun de ces intervalles de temps les excès moyens $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$ de la température du calorimètre sur le milieu ambiant. D'après la loi du refroidissement de Newton (467), pour des intervalles de temps égaux et très petits, les abaissements de température d'un corps qui se refroidit sont proportionnels à ses excès de température sur le milieu ambiant, lorsque les excès sont petits.

La somme des abaissements de température successifs du calorimètre sera :

$$A\tau_1 + A\tau_2 \dots = A\Sigma\tau = \delta.$$

Pour déterminer A, on fait une expérience auxiliaire en portant le calorimètre et son contenu à une température un peu différente de celle de l'expérience principale, et on observe l'abaissement de température δ' pour une durée de 2 minutes et un excès moyen τ' du calorimètre sur le milieu ambiant.

L'équation $\frac{\delta'}{12} = A\tau'$ permet de calculer A. (L'intervalle de 2 minutes vaut 12 intervalles de 10 secondes.)

La perte de chaleur par refroidissement est :

$$R = (M' + Mx + m_1c) \delta.$$

L'équation corrigée devient donc :

$$(Mx + m_1c) (T - \theta) = M' (\theta - t) + (M' + Mx + m_1c) \delta$$

$$\text{posons } \theta' = \theta + \delta$$

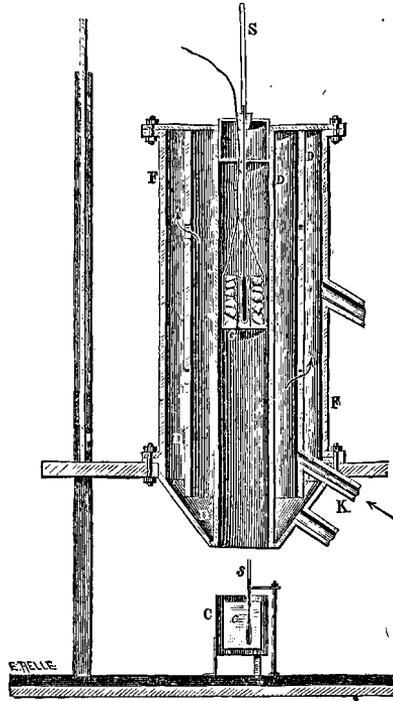


Fig. 289.

θ' est la température d'équilibre accrue de l'abaissement de température par refroidissement. L'équation

$$(Mx + m_1c)(T - \theta') = M'(\theta' - t)$$

permettra de calculer x .

429. Calorimètre de M. Berthelot (fig. 290). — Afin de réduire au

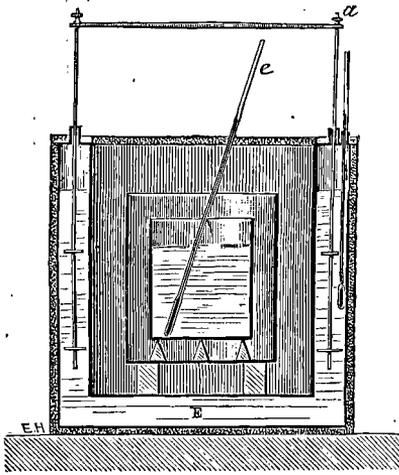


Fig. 290.

minimum les pertes par refroidissement, M. Berthelot a enfermé l'ensemble des deux vases du calorimètre dans une enceinte à double paroi recouverte entièrement de feutre épais et renfermant une masse de 10 litres d'eau environ, dont la température reste très sensiblement constante pendant la durée d'une expérience. Le calorimètre se trouve de la sorte protégé dans les mesures contre le rayonnement de l'observateur et on peut lire sans lunette le thermomètre e du calorimètre. En outre, la perte de chaleur par refroidissement est rendue très faible et très régulière. Rien n'est changé d'ailleurs à la marche qui a été décrite précédemment pour la correction du refroidissement.

430. Méthode de la fusion de la glace. — **Puits de glace** (fig. 291). — On a creusé une cavité dans un bloc de glace B

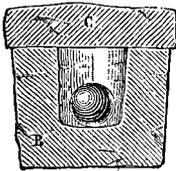


Fig. 291.

à 0° et on y applique une lame de glace C formant couvercle. Dans la cavité préalablement essuyée on introduit un corps de masse M , de température T et de chaleur spécifique x . Ce corps fait fondre m unités de masse de glace et descend lui-même à zéro en perdant MxT calories.

Un gramme de glace à 0° absorbant 80 calories (441) pour passer à l'état d'eau à 0° , la masse fondue aura absorbé $Mm \cdot 80$ calories.

Puisque la chaleur perdue par le corps est égale à la chaleur gagnée par la glace, l'équation

$$MxT = m \cdot 80$$

donnera x .

L'eau de fusion est recueillie avec du papier buvard dont l'augmentation de masse est égale à m .

Cette méthode est rendue incertaine par la difficulté d'effectuer avec précision la pesée de la glace fondue et aussi parce que la température intérieure du bloc de glace peut être inférieure à zéro si le bloc n'a pas été entouré pendant longtemps de glace fondante en fragments.

431. Calorimètre de Bunsen. — La méthode de la fusion de la glace devient *très précise* par l'emploi du calorimètre de Bunsen où l'on substitue à la pesée de la glace fondue l'observation de la *diminution de volume* que la glace à 0° éprouve en passant à l'état liquide sans changement de température. Cette méthode n'exige aucune correction.

Description de l'appareil. — L'une des branches d'un tube en U présente un renflement cylindrique A à la partie supérieure duquel est soudé un tube en verre mince C. En haut de l'autre branche est fixé par un bouchon b un tube fin t recourbé horizontalement et divisé en parties d'égale capacité. Le tube horizontal, la branche étroite du tube en U et la partie inférieure du renflement contiennent du mercure, le reste du renflement est plein d'eau distillée purgée d'air (fig. 292).

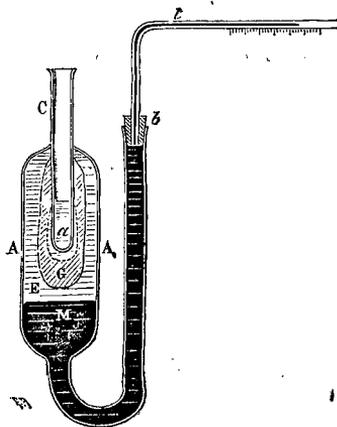


Fig. 292.

On détermine la solidification de l'eau, au moins en partie, par un courant d'alcool refroidi à -20° environ, que l'on fait circuler dans le tube central C. En se congelant autour du tube, l'eau augmente de volume et refoule le mercure.

L'appareil est ensuite placé dans une caisse métallique où on l'entoure de glace fondante pour le soustraire aux influences calorifiques extérieures.

Expérience. — On introduit dans le tube central C qui contient un peu d'eau à 0° une masse M d'une substance de chaleur spécifique x , chauffée à T° ; ce corps en passant à 0° produit autour du tube C la fusion d'une certaine quantité de glace; la contraction du mélange d'eau et de glace G fait rétrograder le mercure de N divisions dans le tube divisé.

Soit n le nombre de divisions parcourues par la colonne de mercure du tube divisé pour une calorie reçue par le mélange d'eau et de glace, $\frac{N}{n}$ sera le nombre de calories dégagées dans l'expérience précédente et on aura

$$MxT = \frac{N}{n}.$$

La constante n se détermine en versant dans le tube central une masse d'eau m à θ^0 , cette eau abandonne $m\theta$ calories en passant à 0^0 et produit ainsi un déplacement N' ; le déplacement dû à une calorie sera $\frac{N'}{m\theta} = n$.

Les mesures peuvent se succéder avec cet appareil jusqu'à fusion entière du bourrelet de glace G qui entoure le tube central.

432. Chaleur spécifique des liquides. — Le liquide, enfermé dans une fiole de verre mince, est chauffé à une température T et plongé dans un calorimètre qui atteint une température maximum θ . On écrit l'équation de la méthode des mélanges.

Le calorimètre de Bunsen convient aussi. On verse le liquide de masse M et de température T dans le tube central C . On observe la course N du mercure dans le tube divisé. L'équation $MxT = \frac{N}{n}$ s'appliquera.

433. Chaleur spécifique des gaz. — Dans un récipient de *volume invariable*, supposons enfermée l'unité de masse d'un gaz à t^0 et à la pression atmosphérique. Si nous échauffons le gaz de 1^0 , il absorbe c calories, ce nombre c est la *chaleur spécifique du gaz à volume constant*. La température est devenue $(t + 1)$ et la force élastique du gaz s'est élevée au-dessus de la pression atmosphérique.

Le gaz étant arrivé à cet état, laissons-le se détendre jusqu'à la pression atmosphérique; il se refroidit et pour lui conserver la température $(t + 1)$, il faut lui communiquer une quantité de chaleur l appelée *chaleur de dilatation à température constante*.

Par ces deux changements successifs, le gaz est parvenu au même état que s'il avait été porté directement de t^0 à $(t + 1)^0$ sous pression constante. Il eût fallu lui donner pour cela une quantité de chaleur C , C est appelée *chaleur spécifique sous pression constante*.

La chaleur spécifique sous pression constante est donc supérieure de l à la chaleur spécifique à volume constant c .

434. Résultats. — Pour un même corps, solide ou liquide, la chaleur spécifique *croît avec la température*, La quantité de chaleur nécessaire pour échauffer l'unité de masse ou un gramme d'un corps de 0^0 à t^0 se représente par une expression de la forme $Q = at + bt^2 + ct^3$, où a , b , c sont trois constantes particulières à chaque corps qu'on détermine par trois expériences.

La chaleur spécifique d'une substance à l'état liquide est plus grande que sa chaleur spécifique à l'état solide ou à l'état gazeux.

Si l'on excepte l'hydrogène, *l'eau est la substance qui a la plus grande chaleur spécifique.*

Une même substance chimique se présente quelquefois sous des états physiques différents; à chacun de ces états correspond une chaleur spécifique différente. Tel est le cas du carbone, du soufre, du phosphore, etc.

TABLE DE CHALEURS SPÉCIFIQUES

Argent.....	0,057	Soufre.....	0,203
Cuivre.....	0,095	Diamant.....	0,147
Zinc.....	0,096	Verre.....	0,198
Laiton.....	0,094	Eau.....	1
Fer.....	0,113	Glace.....	0,5
Platine.....	0,032	Essence de térébenthine.....	0,426
Mercure.....	0,033	Alcool.....	0,615

CHALEURS SPÉCIFIQUES DES GAZ SOUS PRESSION CONSTANTE

Air.....	0,237	Hydrogène.....	3,409
Oxygène.....	0,218	Acide carbonique.....	0,215
Azote.....	0,244	Chlore.....	0,121

La chaleur spécifique de l'air à pression constante est 1,41 fois plus grande que sa chaleur spécifique à volume constant.

435. Loi de Dulong et Petit. — *Le produit de la chaleur spécifique d'un corps simple solide par son poids atomique est constant (voisin de 6,4).*

	<i>c</i>	<i>a</i>	<i>ca</i>
Arsenic.....	0,083	75	6,2
Iode.....	0,054	127	6,8
Soufre.....	0,203	32	6,5
Zinc.....	0,0955	65	6,2
Argent.....	0,057	108	6,2

En ne précisant pas davantage les conditions dans lesquelles la chaleur spécifique est prise, on conçoit que le produit *ca* ne peut pas être trouvé rigoureusement constant, car le poids atomique d'un corps est un nombre invariable et sa chaleur spécifique varie avec la température. La chaleur spécifique est d'ailleurs un nombre complexe représentant la chaleur employée non seulement à élever la température, mais à effectuer un travail de dilatation, des changements d'état moléculaire.

En admettant que le poids atomique d'un corps simple est la masse de l'atome de ce corps, la loi précédente exprime que la *capacité*

calorifique des atomes des corps simples à l'état solide est la même pour tous.

(436. **Loi de Wœestyn.** — Si l'on admet que les atomes des corps simples conservent dans une combinaison la capacité calorifique qu'ils ont à l'état libre, la *capacité calorifique d'un composé est égale à la somme des capacités calorifiques des composants* à l'état solide.

D'après cet énoncé, un corps de poids moléculaire A et de capacité calorifique C , composé de n atomes de poids atomique a et de chaleur spécifique c , de n' atomes de poids atomique a' et de chaleur spécifique c' ... aura une capacité calorifique CA exprimée par

$$CA = nca + n'c'a + \dots$$

Cette relation se vérifie d'une façon à peu près satisfaisante. Par exemple, supposons connue la chaleur spécifique d'un sulfure et celle du métal : la relation précédente permettra de calculer la chaleur spécifique du soufre solide; elle est trouvée conforme à la valeur obtenue expérimentalement.

En admettant en même temps la loi de Dulong et Petit, d'après laquelle $ca = c'a'$... on écrira $CA = (n + n' + n'' \dots) ca = (n + n' + \dots) 6,4$. Puisque pour des composés solides de même constitution, $n + n' + \dots$ est constant, nous aurons la loi suivante : *le produit du poids moléculaire des corps composés solides de constitution chimique semblable par leur chaleur spécifique est un nombre constant.* Ce nombre varie avec chaque classe de corps.)

CHALEURS DE FUSION

437. *La chaleur de fusion d'une substance est le nombre de calories L absorbées par l'unité de masse de cette substance, en passant de l'état solide à l'état liquide, à sa température de fusion, sans changement de température.*

En repassant de l'état liquide à l'état solide, l'unité de masse de la même substance abandonne le même nombre de calories L , c'est-à-dire que la chaleur de solidification est égale à la chaleur de fusion,

La chaleur de fusion pour une masse m est mL .

Les chaleurs de fusion se déterminent ordinairement par la méthode des mélanges.

438. **Corps solide à la température ordinaire.** — On prend m grammes du corps à l'état solide; après fusion, on les porte à une température T supérieure au point de fusion τ . Puis on introduit le liquide dans un calorimètre renfermant de l'eau à t^0 . Au contact de l'eau, de T à τ , le liquide perd $mc(T - \tau)$ calories, c étant la chaleur spécifique moyenne du liquide de

T à τ ; le corps se solidifie à τ^0 et abandonne mL calories; il se refroidit ensuite à l'état solide de τ à θ , θ étant la température finale du calorimètre et dégage ainsi $mc'(\tau - \theta)$ calories, c' est la chaleur spécifique moyenne du solide de τ à θ .

En écrivant que la chaleur totale cédée par le corps est égale à la chaleur gagnée par le calorimètre, nous avons l'équation :

$$mc(T - \tau) + mL + mc'(\tau - \theta) = M'(\theta - t)$$

θ est la température finale corrigée de l'effet du refroidissement pendant l'expérience. Cette équation donnera L .

Si l'on ne connaît pas c et c' , on fera deux autres expériences avec des masses m_1 et m_2 du corps et on aura ainsi trois équations pour calculer L , c et c' .

439. Corps liquide à la température ordinaire. — On prend une masse m du liquide, on le congèle et on le porte à une température T inférieure à la température τ de fusion; on le plonge ensuite dans un calorimètre dont la température est t .

Le corps solide passe de T à τ et absorbe $mc'(\tau - T)$ calories; il fond à τ et absorbe pL ; il s'échauffe de τ à θ et absorbe $mc(\theta - \tau)$. Le calorimètre a perdu $M'(t - \theta)$.

L'égalité des chaleurs absorbées et cédées donne la relation :

$$mc'(\tau - T) + mL + mc(\theta - \tau) = M'(t - \theta).$$

Pour déterminer la chaleur de fusion de la glace, on prendra de la neige refroidie au-dessous de 0^0 , à $-T^0$, et on l'introduira dans un calorimètre de température t . La température finale est θ .

L'équation

$$mc'T + mL + m\theta = M'(t - \theta)$$

donnera L . On simplifie l'expérience et on se passe de la connaissance de c' , chaleur spécifique de la glace, en plongeant dans le calorimètre quelques fragments de glace fondante à 0^0 . Nous allons insister sur ce procédé.

440. Chaleur de fusion de la glace. — Méthode des mélanges. — On plonge dans un calorimètre C contenant de l'eau à t^0 quelques fragments de glace fondante à 0^0 , bien essuyés avec du papier buvard. La glace, de masse m , fond et absorbe mL ; en se réchauffant de 0^0 à θ , l'eau provenant de la fusion gagne $m\theta$; le calorimètre perd $M'(t - \theta)$; M' est la valeur en eau du calorimètre, θ est la température finale de l'eau (fig. 293).

m se déduit de l'augmentation de masse du calorimètre pesé avant l'introduction de la glace et après l'expérience.

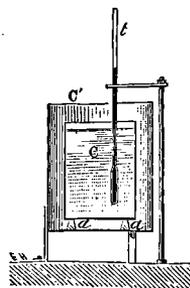


Fig. 293.

L'égalité des chaleurs absorbées et cédées donne l'équation :

$$mL + m\theta = M'(t - \theta).$$

où tout est connu, sauf L. Cette méthode exige, pour la détermination de θ , que l'on vérifie le zéro du thermomètre.

441. Méthode du calorimètre de Bunsen. — Le calorimètre ayant été préparé comme pour la détermination d'une chaleur spécifique, une masse d'eau m à t^0 est versée dans le tube central, fait fondre une masse de glace μ et perd mt calories en passant à 0^0 . La chaleur absorbée par la fusion de l'unité de masse de glace est $\frac{mt}{\mu}$. Il reste à déterminer μ . Le mercure a rétrogradé de k divisions sur le tube; v étant le volume d'une division, en centimètres cubes, obtenu par un jaugeage préalable, la diminution de volume en centimètres cubes est kv . On connaît la contraction $0^{\text{cc}}091$ ⁽¹⁾ correspondant à la fusion de l'unité de masse de glace, on en déduit $\frac{kv}{0,091} = \mu$. On trouve 80 pour la chaleur de fusion de la glace.

CHALEURS DE FUSION

Glace	80	Phosphore.....	5,03
Soufre	9,4	Zinc.....	28,1
Étain	14,2	Plomb	5,4

CHALEURS DE VAPORISATION

442. On appelle *chaleur de vaporisation d'une substance à t^0* le nombre de calories L absorbées par l'unité de masse de cette substance à t^0 en passant à l'état de vapeur saturante à la même température.

L'unité de masse de la même substance en repassant à l'état liquide sans changement de température abandonne le même nombre de calories L.

Pour m grammes la chaleur de vaporisation est mL .

(1) Désignons par g_0 la masse d'un centimètre cube de glace ou la densité de la glace à 0^0 ($g_0 = 0^{\text{gr}},91674$), par e_0 la masse d'un centimètre cube d'eau à 0^0 ($e_0 = 0^{\text{gr}},99988$). D'après les relations $1 = v_0 g_0$ $1 = v'_0 e_0$.

$\frac{1}{g_0}$ et $\frac{1}{e_0}$ sont les volumes de l'unité de masse pour la glace et pour l'eau.

$$\frac{1}{g_0} - \frac{1}{e_0} = 0^{\text{cc}},091$$

est la différence des volumes spécifiques de la glace et de l'eau à 0^0 .

443. Mesure de la chaleur de vaporisation par la méthode des mélanges. — Description de l'appareil (fig. 294). — Le liquide est porté à l'ébullition dans une cornue A qui se continue par un

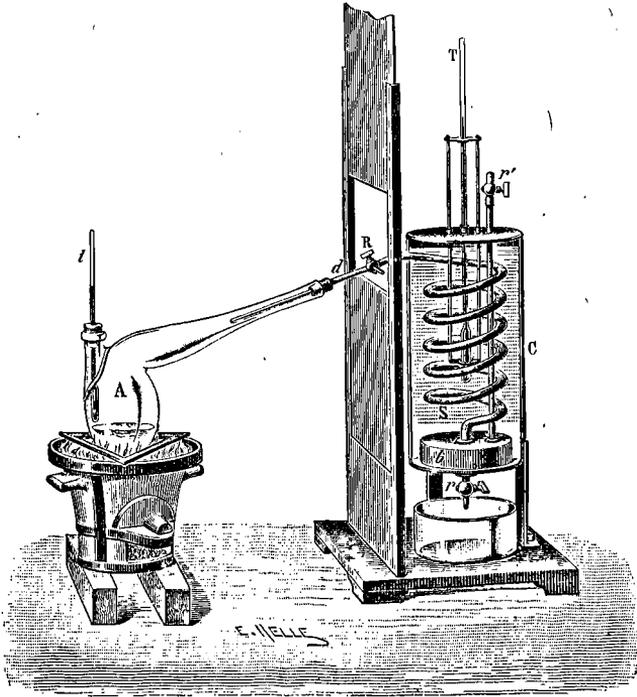


Fig. 294.

serpentin S logé dans le calorimètre C plein d'eau froide. Le serpentin se termine inférieurement par une boîte *b* entourée par l'eau du calorimètre et communiquant par un tube vertical et un robinet *r'* avec l'atmosphère ou avec une enceinte à pression constante. Le liquide bout sous la pression qui s'exerce sur lui (366), sa température est lue sur un thermomètre *t* plongé dans la vapeur du liquide. La vapeur passe dans le serpentin, s'y condense et se réunit dans la boîte *b* en se mettant en équilibre de température avec le calorimètre. La température du calorimètre est donnée par le thermomètre T. Par un robinet *r* on recueille le liquide condensé et on le pèse.

Il faut éviter l'entraînement dans le serpentin de particules déjà condensées dans le col de la cornue, elles pénétreraient à l'état liquide et feraient partie de la masse recueillie et pesée, sans avoir cédé au

serpentin leur chaleur de vaporisation. Pour cela, le tube d'entrée de la vapeur dans le serpentin s'engage jusqu'à une certaine distance dans la cornue, ce qui le protège contre le refroidissement sur une portion de son parcours par la vapeur qui l'entoure; en outre, ce tube est *incliné* et les gouttelettes liquides formées retombent dans la cornue.

A l'aide du robinet à 3 voies R, on laisse la vapeur s'échapper dans l'atmosphère tant que le liquide n'est pas en pleine ébullition.

On déterminera la chaleur de vaporisation à diverses températures en faisant *varier la pression à l'intérieur* de l'appareil par le tube vertical à robinet *r'*, soit avec une pompe de compression pour obtenir l'ébullition en A au-dessus de 100° , soit avec une machine pneumatique pour opérer au-dessous de 100° .

Calcul. — Une masse m de vapeur en se liquéfiant sans changement de température a perdu mL ; en passant de la température T d'ébullition à la température finale θ du calorimètre, elle a abandonné $mc(T - \theta)$; c est la chaleur spécifique moyenne du liquide entre T et θ .

Le calorimètre s'est échauffé d'une façon continue et a gagné $M'(\theta - t)$ calories. M' est la capacité calorifique de l'appareil calorimétrique (calorimètre, eau, serpentin, agitateur, thermomètre), t est la température initiale de l'eau.

La chaleur perdue par la vapeur et par le liquide condensé est égale à la chaleur gagnée par le calorimètre. C'est ce qu'exprime l'équation

$$mL + mc(T - \theta) = M'(\theta - t)$$

Elle permettra de calculer L .

θ représente la température finale du serpentin corrigée des effets de refroidissement (rayonnement et contact de l'air) et de réchauffement (conductibilité à la jonction de la cornue et du serpentin).

Un écran protège le calorimètre contre le rayonnement du fourneau.

444. Appareil de M. Berthelot (fig. 295). — Cet appareil, tout en verre, consiste en une fiole fermée à la partie supérieure et traversée suivant son axe par un large tube vertical ouvert, ab , qui lui est soudé. Ce tube s'ajuste par une extrémité rodée à l'émeri dans un serpentin CS qui aboutit à un réservoir R surmonté d'un tube ouvert à l'extérieur. Le serpentin est plongé dans un calorimètre contenant de l'eau, qui est poli extérieurement et, comme les calorimètres déjà employés (fig. 289 et 293), repose par des pointes de liège sur le fond d'une enceinte dont la surface intérieure est également polie.

La seconde enceinte, fermée en haut par une plaque en bois, NN', percée de trous pour livrer passage au tube *ab* et au thermomètre T, est entourée par le récipient en fer blanc à double paroi, qui n'est pas représenté dans la fig. 295 et que nous avons déjà décrit précédemment (429).

La fiole est chauffée par une lampe à gaz circulaire G, dont elle est séparée par une toile métallique EE'.

La fiole est pesée 1° vide, 2° avec le liquide D. On l'ajuste par son tube *ab* sur le serpentin et on chauffe. Une certaine quantité de liquide distille à la température d'ébullition qui correspond à la pression extérieure, sa vapeur s'engage sèche dans le tube *ab* et gagne le serpentin où elle se condense. On pèse de nouveau la fiole avec le liquide restant. La diminution de masse du liquide D donne la masse *m* du liquide vaporisé.

L se calculera par l'équation déjà établie plus haut :

$$mL + mc(T - \theta) = M\theta - l.$$

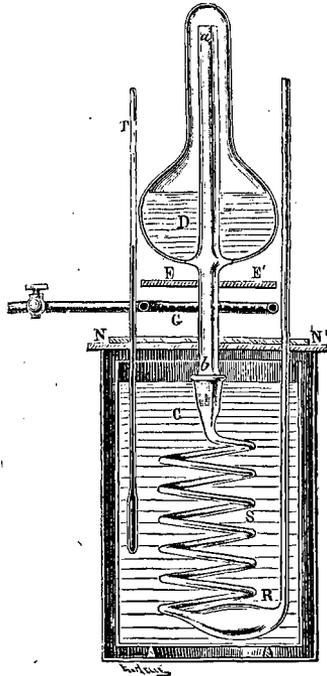


Fig. 295.

445. Résultats. — La chaleur de vaporisation d'un liquide diminue quand la température d'ébullition s'élève. Elle devient nulle au point critique (404); on conçoit qu'à ce point le liquide se vaporise tout d'un coup, puisque sa chaleur de vaporisation est nulle.

La chaleur de vaporisation de l'eau à *t*⁰ est exprimée par la formule expérimentale :

$$L = 606,5 - 0,695t.$$

CHALEURS DE VAPORISATION SOUS LA PRESSION 76

Eau	537
Alcool	208
Éther	91

Applications. — 1° Un vase en laiton pesant 30 grammes contient 500 grammes d'eau à 20°; on y plonge 108 grammes d'un corps chauffé à 100°; la température finale est 21°815. Quelle est la chaleur spécifique du corps? Chaleur spécifique du laiton 0,09.

2° Pour déterminer la température d'un bain en fusion, on y fait tomber un fragment de platine pesant 500 grammes que l'on porte ensuite dans une masse de 950 grammes d'eau à 0°. La température finale est 10°. Calculer la température T du bain, en prenant 0,032 pour chaleur spécifique moyenne du platine.

3° Un calorimètre contient 70 grammes d'eau à 10°, on y verse 50 grammes d'eau à 50°. La température d'équilibre est 25°. Quelle est la capacité calorifique du calorimètre ?

4° Combien de calories abandonnent 50 litres d'air en se refroidissant de 25° à 5° ? Masse du litre d'air 1^{re}293. Chaleur spécifique de l'air, 0,237.

5° Un morceau de glace pesant 725^{re} est placé dans un calorimètre contenant 250 grammes d'eau à + 5°. L'équilibre thermique étant établi, on trouve que la glace pèse 64 grammes de plus qu'au début. Quelle était la température initiale de la glace ? Chaleur spécifique de la glace 0,5 ; chaleur latente de la glace 80. On négligera la capacité du calorimètre, ainsi que les échanges de chaleur avec l'extérieur.

6° Dans un vase métallique complètement entouré de glace fondante on introduit une sphère de cuivre de 3 kilogrammes chauffée à 100° ; l'eau provenant de la fusion de la glace a été recueillie et pesée ; sa masse est 360 grammes. Quelle est la chaleur spécifique du cuivre ? La chaleur de fusion de la glace est 80.

7° On mélange 300 grammes de glace fondante et 700 grammes d'eau à 100°. Quelle sera la température finale du mélange ?

8° La Terre reçoit du Soleil, à midi, 3 calories par décimètre carré et par seconde. Quelle épaisseur x de glace la chaleur solaire pourra-t-elle fondre en une heure à la surface du sol ? Densité de la glace 0,92 ; chaleur de fusion de la glace 80.

9° Dans la cavité d'un puits de glace on enferme une masse d'étain de 50 grammes à 100°. Quelle est la masse de glace fondue ? Chaleur spécifique de l'étain 0,056.

10° Quelle diminution de volume éprouve un mélange de glace et d'eau à 0° recevant 150 calories ?

11° Quelle masse m de mercure à 100° faut-il introduire dans un mélange de glace et d'eau pour produire une diminution de volume de 0^{cc},0567 ?

13° Du phosphore est maintenu en surfusion. De combien de degrés au-dessous du point de fusion conviendra-t-il de le refroidir pour qu'une solidification brusque ramène toute sa masse au point de fusion ?

On prendra 5,4 pour la chaleur de fusion du phosphore et 0,20 pour sa chaleur spécifique à l'état solide.

13° De l'eau refroidie à — 20° est solidifiée brusquement. Quelle est la fraction de la masse totale qui se solidifie ? Chaleur spécifique de la glace 0,5.

14° Dans un calorimètre dont la valeur en eau est 1000 grammes, on fait condenser 26^{re} de vapeur d'eau à 100°. La température initiale du calorimètre est 4°, sa température finale 20°. Quelle est la chaleur L de vaporisation de l'eau à 100°. On négligera les variations de température par rayonnement et par conductibilité.

15° Pour élever de 20° à 80° la température de 2 mètres cubes d'eau, combien faut-il y condenser de litres de vapeur à 100° et 76 de pression ?

La chaleur de vaporisation de l'eau à 100° est 537 ; on prendra $\frac{5}{8}$ pour densité de la vapeur d'eau.

16° Pour porter 300 kilogrammes d'eau de 11° à 28°, quelle masse M de vapeur à 121° faut-il y condenser ?

17° Dans un calorimètre à eau on fait arriver 2 kg. de vapeur d'éther à 35° ; la température initiale étant 10°, à quelle température monte le thermomètre ?

Chaleur de vaporisation de l'éther..... 90

Chaleur spécifique de l'éther..... 0,5

18° Quelle est, d'après la loi de Dulong et Petit, la chaleur spécifique de l'Indium si son poids atomique est 113,4 ?

PROPAGATION DE LA CHALEUR

446. Modes d'échange de la chaleur entre deux corps. —

Entre deux corps à des températures inégales placés en présence il se produit un échange de chaleur : le corps le plus chaud se refroidit et l'autre s'échauffe, jusqu'à ce qu'ils aient atteint la même température,

La propagation de la chaleur d'un corps plus chaud à un autre plus froid se fait :

1° par **conductibilité** : la chaleur chemine *par contact* des particules chaudes aux particules froides d'un corps en élevant successivement la température des différents points, *sans que les positions relatives des molécules soient changées* ;

2° par **convection** : la transmission a encore lieu *par contact*. Un corps chaud en contact avec un corps fluide échauffe directement les couches qui le touchent ; sous l'influence de leur élévation de température⁽¹⁾, celles-ci *transportent en se déplaçant* la chaleur qu'elles ont reçue et sont remplacées par d'autres sur lesquelles le même effet se produit ;

3° par **rayonnement** : la propagation s'effectue à *distance*. La chaleur est transmise *avec une très grande vitesse* (vitesse de la lumière) dans tous les sens sans échauffer les corps qu'elle traverse, jusqu'à ce qu'elle rencontre un corps qui l'absorbe et dont la température s'élève.

CONDUCTIBILITÉ

447. **Bons conducteurs. Mauvais conducteurs.** — Une barre de fer rougie au feu par un de ses bouts est encore très chaude à une

(1) Le mouvement de convection peut être dans certains cas déterminé par une force extérieure, telle qu'une pompe, une cheminée.

grande distance de cette extrémité, surtout si elle est grosse. Il en est autrement avec une tige de bois : on peut la tenir par une de ses extrémités, tandis que l'autre est incandescente, et l'on ne sent plus la chaleur arriver jusqu'à la main, même lorsque la tige est très courte (allumettes).

De même, une cuiller d'argent plongée en partie dans un liquide chaud s'échauffe rapidement jusqu'au manche tandis qu'une cuiller de bois est à peine chaude sur la partie laissée en dehors du liquide.

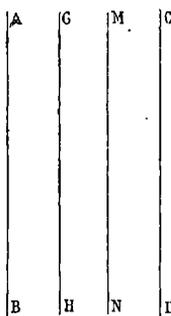
Le métal est dit *bon conducteur* et le bois *mauvais conducteur*.

C'est à leur conductibilité que les métaux doivent de paraître froids au toucher; la chaleur de la main est enlevée rapidement et se répand dans la masse du métal sans l'échauffer d'une manière appréciable. La sensation est différente sur une paroi de bois, car ici la chaleur cédée par la main reste au point de contact et l'échauffe.

Ce sont les métaux qui conduisent le mieux la chaleur; viennent ensuite le marbre et les pierres denses. Le bois, la paille, la soie, le coton, la laine sont les plus mauvais conducteurs.

(448. **Coefficient de conductibilité.** — On caractérise les différents corps au point de vue de la facilité avec laquelle ils conduisent la chaleur par leur *coefficient de conductibilité intérieure*.

Pour préciser la signification de ce coefficient, considérons un mur indéfini, limité par deux faces parallèles, AB, CD, *maintenues à des températures constantes et différentes*; il passera de la chaleur de la face la plus chaude



AB à la face la plus froide CD. Après un temps qui sera variable avec la nature du mur, un *état permanent* s'établira dans lequel les diverses tranches du mur parallèles aux faces terminales posséderont des *températures fixes*. La quantité de chaleur qui traversera dès lors une surface S d'un plan parallèle aux faces sera la même pour tous les plans; car, par exemple, s'il ne passait à travers une surface S d'un plan MN qu'une quantité de chaleur inférieure à celle qui a traversé une surface égale d'un plan parallèle GHI (fig. 296), il resterait de la chaleur entre les deux plans et la température des particules intermédiaires s'élèverait, ce qui n'a pas lieu puisqu'un état permanent s'est établi.

Fig. 296.

On appelle *coefficient de conductibilité intérieure* d'une substance la quantité de chaleur qui traverse en une seconde, un centimètre carré de la surface d'un plan parallèle aux faces d'un mur de cette substance ayant une épaisseur de 1 centimètre, présentant entre ses faces extrêmes une différence de température de 1° et dans lequel l'état permanent est établi.

449. **Mesure de la conductibilité intérieure du mercure (A. Berget).** — Une colonne cylindrique de mercure de hauteur l est contenue dans

un tube de verre C de section S ; ce tube est le prolongement vertical du tube d'un calorimètre de Bunsen, il est placé concentriquement à un manchon M rempli de mercure qui repose sur une plaque de tôle P. Cette plaque touche la partie supérieure du réservoir du calorimètre et est maintenue à 0° par de la glace. La face supérieure du mercure est chauffée dans

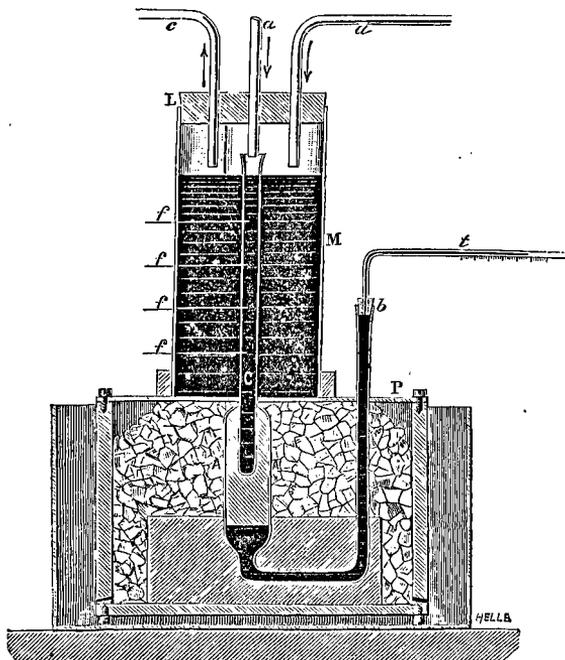


Fig. 297.

le tube et dans le manchon par un courant de vapeur d'eau amenée par les tubes a (fig. 297). Protégée par le manchon, la colonne centrale de mercure se trouve dans les mêmes conditions que si elle faisait partie d'un mur indéfini (*sans déperdition latérale*).

Quand l'état *permanent* est établi, la chaleur qui traverse toute section S du tube C, entre le niveau du plan P à 0° et le niveau supérieur à 100°, est proportionnelle à cette section, au temps θ ; on démontre qu'elle est proportionnelle à la différence de température 100 des tranches extrêmes et en raison inverse de la longueur l de la colonne. Elle est en outre proportionnelle au coefficient K de conductibilité.

$$Q = KS \frac{100}{l} \theta \quad (1)$$

Cette chaleur Q (exprimée en calories) produit pendant un temps connu θ (converti en secondes) la fusion d'une certaine masse de glace du calori-

mètre, $Q = \frac{N}{n}$ se déduit de l'observation de la course N du mercure sur le tube t (431), après détermination de la constante n . S est compté en centimètres carrés et l en centimètres. On tire K de l'équation (4).

On a trouvé $K = 0,0201$.

Ayant obtenu le coefficient de conductibilité intérieure du mercure, on détermine le rapport des coefficients de conductibilité des différents métaux à celui du mercure.

450. Appareil d'Ingenhouz. — L'appareil d'Ingenhouz permet de classer approximativement les différents corps solides au point de vue de leur conductibilité intérieure. C'est une caisse rectangulaire en laiton sur l'une des parois extérieures de laquelle sont implantées normalement des tiges cylindriques de diverses substances et de même diamètre (fig. 298). On a plongé ces tiges à la fois dans un bain de cire fondue et on les a retirées aussitôt, pour les faire égoutter; chacune d'elle est restée couverte d'une mince couche de cire solidifiée sur sa surface. On verse de l'eau bouillante dans la caisse. La chaleur de l'eau se transmet le long des tiges et fond la cire jusqu'à des distances qui *varient avec les différentes substances*. Les points où s'arrête la fusion de la cire sont des points à la même température : la température de fusion de la cire. Sur une tige, la distance à laquelle se propage la fusion de la cire croît avec la conductibilité intérieure. En effet, quand l'état permanent est établi, la chaleur qui passe dans une tige ne sert plus à élever la température des molécules, mais elle s'échappe par la surface extérieure. Or, les tiges pré-

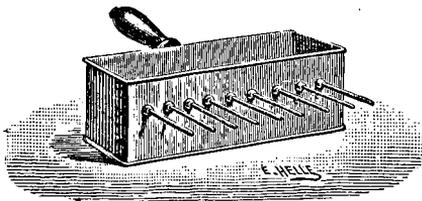


Fig. 298.

sentent la même déperdition extérieure aux points d'égale température, puisqu'elles sont plongées dans le même milieu et recouvertes du même enduit. Cette déperdition extérieure dissipe le flux de chaleur qui vient de la source, d'autant moins vite que ce flux est plus important; par suite la chaleur qui suit une tige se propagera d'autant plus loin que la conductibilité intérieure est plus grande.

Il est nécessaire d'attendre l'état permanent pour établir le classement par ordre de conductibilité. Car si les tiges sont examinées peu de temps après l'application de la source de chaleur, comme une grande partie de la chaleur sert d'abord à élever la température des molécules, on verra la cire fondre plus vite sur le bismuth que sur le fer, bien que le fer soit meilleur conducteur, parce que, pour échauffer de 1° l'unité de masse du bismuth, il faut moins de chaleur que pour l'unité de masse de fer.

A l'état permanent, la longueur fondue est au contraire plus grande sur le fer que sur le bismuth.

Voici l'ordre dans lequel se classent les métaux usuels au point de vue de

leur conductibilité : *Argent, Cuivre, Zinc, Laiton, Fer, Étain, Plomb, Bismuth.* Cet ordre est le même que celui de leur conductibilité électrique.)

451. Propriétés des toiles métalliques. — La grande conductibilité des métaux explique les propriétés des toiles métalliques. Si l'on coupe une flamme avec une toile métallique à mailles serrées, la flamme ne persiste qu'au-dessous de la toile (fig. 299). En effet, la toile, à cause de sa conductibilité, enlève aux gaz inflammables une si grande partie de leur chaleur qu'ils se trouvent, après leur passage, refroidis au-dessous de leur température de combustion.

Les gaz traversent cependant la toile, car on peut les enflammer au-dessus de la toile et ils continuent à brûler. On peut aussi enflam-

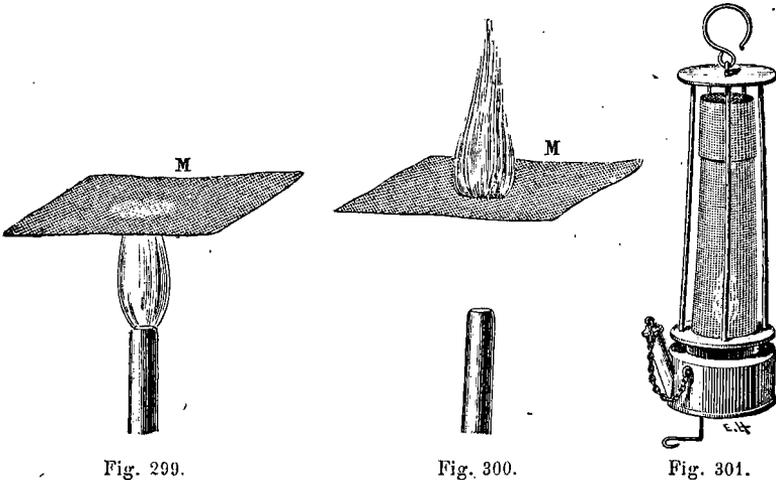


Fig. 299.

Fig. 300.

Fig. 301.

mer le gaz seulement au-dessus de la toile sans que la combustion se propage au-dessous (fig. 300).

Ces propriétés des toiles métalliques reçoivent une application importante dans la **lampe des mineurs** de Davy.

Le *grisou* des houillères, ou hydrogène protocarboné, se dégage spontanément, s'accumule dans les parties supérieures des galeries et, mélangé à l'air, produit quand on l'enflamme de formidables explosions. La lampe des mineurs (fig. 301) est une lampe à huile munie d'un cylindre en toile métallique remplaçant le tube de verre qui forme habituellement la cheminée. Si une explosion a lieu dans la lampe, elle ne peut être transmise à l'extérieur, car la toile métallique refroidit les gaz en combustion au moment de leur passage à

travers ses mailles et s'oppose à la propagation au dehors de la flamme qui s'est produite à l'intérieur au moment de l'explosion.

452. Conductibilité des cristaux. — Les cristaux présentent une conductibilité qui varie avec la *direction*. Pour s'en rendre compte, on taille dans la substance des lames minces dans différentes directions. On passe un fil métallique dans une petite ouverture percée au centre de la plaque et on enduit la surface de cire. Si l'on chauffe le fil par un courant électrique, la cire fond autour du fil. La limite des points où la cire a été fondue est une circonférence lorsque la transmission se fait également dans toutes les directions; en général, c'est une ellipse, ce qui montre bien que la conductibilité varie avec la direction.

453. Convection. — Si l'on chauffe un liquide par sa *partie inférieure*, les couches inférieures chauffées se dilatent, deviennent plus légères que les couches supérieures et montent; leur place est prise par des particules plus froides. De là *deux courants* liquides qu'on met en évidence avec de la sciure de bois : un courant ascendant central et un courant descendant le long des parois (fig. 302). La circulation continue jusqu'à ce que tout le liquide soit échauffé. Ce transport de chaleur par les particules est appelé *convection*.

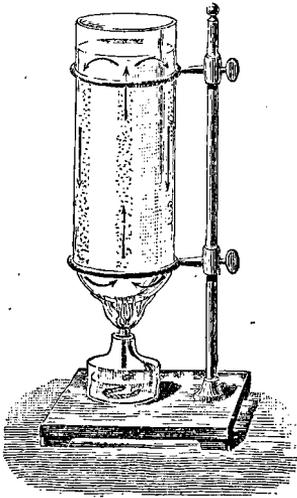


Fig. 302.

Dans une masse gazeuse échauffée, dont les molécules sont plus dilatables et beaucoup plus mobiles que les molécules d'une masse liquide, la propagation de la chaleur a lieu par convection. C'est ainsi que dans une pièce qui contient un poêle, l'air échauffé au contact du poêle monte à la partie supérieure et est remplacé par de l'air froid.

La quantité de chaleur ainsi transmise par convection est proportionnelle à la différence de température entre la surface chaude et le fluide et à l'*étendue de la surface*. A cause de cela, dans la construction des appareils de chauffage, on emploie fréquemment pour obtenir une grande surface de transmission sous un volume restreint, des tuyaux portant de nombreuses nervures très saillantes.

454. Conductibilité des liquides. — Sauf le mercure, les liquides conduisent mal la chaleur. A cause de la convection, pour montrer la mauvaise conductibilité des liquides, il faut les échauffer par la partie supérieure. On prend une éprouvette dans la paroi de laquelle est fixé un thermomètre (fig. 303); on y verse de l'eau jusqu'à quelques millimètres au-dessus du réservoir et on achève de remplir le vase avec de l'alcool. Si l'on enflamme l'alcool, le thermomètre s'élève à peine.

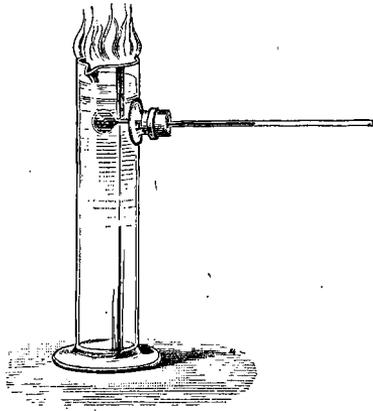


Fig. 303.

455. Conductibilité des gaz. — L'hydrogène paraît être le seul gaz ayant une conductibilité appréciable. Les autres gaz, et l'air en particulier sont mauvais conducteurs s'ils sont gênés dans leurs mouvements. La protection par les fourrures, la laine et les étoffes ouatées ne tient pas seulement à la mauvaise conductibilité des filaments, mais aussi à l'action de l'air *interposé*. L'emploi des couvertures de chaume se justifie d'une manière analogue, soit pour garantir les habitations du froid en hiver, soit pour prévenir la fusion de la glace dans les glaciers en été. Deux vêtements légers superposés garantissent du froid parce qu'ils emprisonnent entre eux une couche d'air. De même, les doubles fenêtres protègent les appartements contre un refroidissement trop accentué.

RAYONNEMENT CALORIFIQUE⁽¹⁾

456. Rayonnement dans le vide. — C'est par rayonnement que nous parvient la chaleur solaire en traversant un espace vide de toute matière pondérable.

(1) Il est avantageux de différer jusqu'à l'Optique l'étude du Rayonnement calorifique.

On démontre encore le rayonnement dans le vide en exposant à l'action du soleil ou d'une autre source de chaleur un ballon de verre

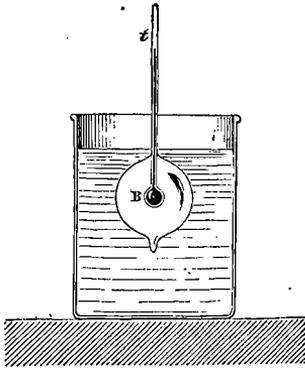


Fig. 304.

où l'on a fait le vide et dans la paroi supérieure duquel un thermomètre t est soudé par sa tige; le réservoir B du thermomètre est noirci et occupe à peu près le centre du ballon. Le mercure du thermomètre monte très rapidement.

Avec cet appareil, la démonstration s'étend à la chaleur des sources à basse température. En effet, le thermomètre *monte immédiatement* quand on plonge le ballon dans l'eau chaude (fig. 304). La transmission est trop rapide pour être due à la conductibilité, elle a lieu d'ail-

leurs de la même manière si l'on enveloppe de glace la soudure du thermomètre et du ballon. Il y a là un rayonnement direct des parois du ballon à travers l'espace vide qui les sépare du réservoir du thermomètre. Le thermomètre baisse quand on plonge le ballon dans l'eau froide, car c'est alors le thermomètre qui envoie de la chaleur au liquide.

APPAREILS DE MESURE

457. Pour les mesures de rayonnement calorifique, on s'est quelquefois servi d'un thermomètre sensible à réservoir noirci par le noir de fumée. Leslie faisait usage de son **thermomètre différentiel** (fig. 305). Il consiste en deux sphères de verre creuses et vides d'air, dont l'une est noircie au noir de fumée, reliées par un tube recourbé qui contient de l'éther. Cet éther se tient au même niveau dans les deux branches tant que les deux sphères ont la même température. Si l'on fait tomber un rayonnement calorifique sur la sphère noircie, sa température s'élève et il s'établit entre les deux branches du tube une *différence de niveau*

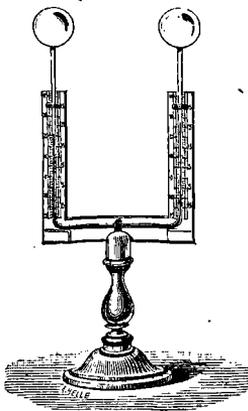


Fig. 305.

sensiblement proportionnelle à la différence de température des deux sphères.

458. Thermomultiplicateur. — On emploie habituellement un thermomètre différentiel plus sensible que l'appareil de Leslie : le *thermomultiplicateur* de Melloni. Il se compose d'une pile thermo-électrique et d'un galvanomètre ou multiplicateur.

Description. — La *pile thermo-électrique* est constituée par des barreaux alternatifs de bismuth et d'antimoine recourbés à angle droit à leurs extrémités et soudés (fig. 306). Ces barreaux sont disposés en rangées parallèles dont l'ensemble forme un parallélogramme rectangle qui présente sur une de ses faces les soudures paires et sur la face opposée les soudures impaires. Ces faces sont recouvertes d'une mince couche de noir de fumée. La pile est logée dans une

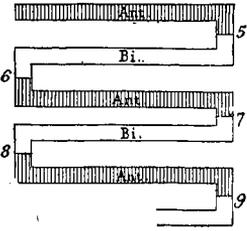


Fig. 306.

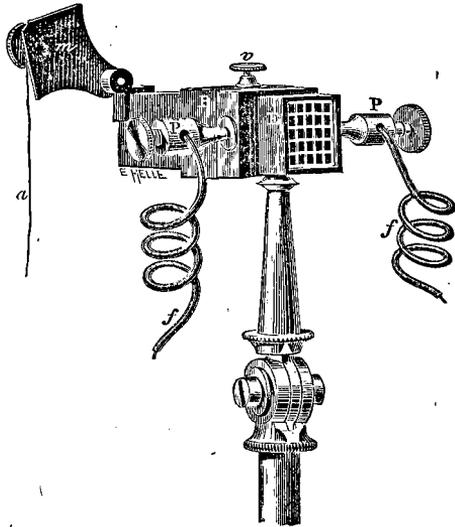


Fig. 307.

monture en cuivre E, sur laquelle se fixent à l'aide de vis de serrage *v* deux étuis rectangulaires B, munis à leurs extrémités de petits écrans mobiles *m* qui permettent de soustraire à volonté les soudures aux actions calorifiques extérieures (fig. 307).

Les deux pôles P de la pile sont réunis par deux conducteurs *f* aux deux bornes d'un *galvanomètre* à système astatique et à gros fil (984).

Si l'on expose l'une des faces de la pile à un rayonnement calorifique en laissant l'autre à la température ambiante, l'aiguille du galvanomètre est déviée, et la déviation augmente avec la différence de température des deux systèmes de soudures.

Le thermomultiplicateur constitue un thermomètre très sensible⁽¹⁾;

(1) C'est un thermomètre différentiel : le courant produit a une intensité proportionnelle à la différence de température des soudures correspondant aux deux faces de la pile.

la chaleur d'une bougie placée à 1 mètre d'un côté de la pile fait dévier notablement l'aiguille du galvanomètre.

459. Méthode des impulsions. — Si l'on fait tomber un faisceau calorifique sur l'un des systèmes de soudures en laissant l'autre à la température ambiante, une impression superficielle sur la face échauffée produit immédiatement un courant et l'aiguille du galvanomètre quitte sa position d'équilibre. Elle prendrait une position fixe après plusieurs oscillations. *Sans attendre cette déviation définitive*, on observe le premier maximum d'écart ou *l'impulsion* et on intercepte aussitôt le rayonnement. On attend pour faire une nouvelle mesure que l'aiguille soit revenue à sa position initiale d'équilibre. La pile n'ayant été que peu chauffée, le retour a lieu beaucoup plus vite que si l'on avait attendu la déviation fixe. Les mesures peuvent ainsi se succéder à intervalles rapprochés.

460. Proportionnalité des quantités de chaleur aux impulsions. — Si les *impulsions* de l'aiguille du galvanomètre du thermomultiplicateur ne dépassent pas quelques degrés, les quantités de

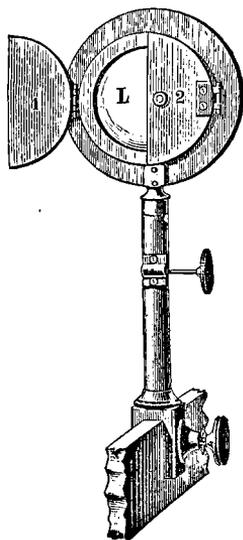


Fig. 308.

chaleur reçues par unité de temps par la pile thermo-électrique sont *proportionnelles aux impulsions*; voici comment on le vérifie : une lentille convergente entourée d'un écran métallique est munie de deux volets semi-circulaires 1 et 2 qui permettent de découvrir successivement ou simultanément les deux moitiés de la surface de la lentille (fig. 308). Cette lentille L, portée par une colonne, se place entre une lampe Carcel S et la pile thermo-électrique P dans une position telle qu'une image nette de la flamme se dessine sur la pile (fig. 309). En changeant la distance de la lampe à la lentille et en même temps la distance de la pile pour maintenir celle-ci dans le plan conjugué de la flamme, on intercepte une portion variable du faisceau divergent émis par la source calorifique, ce qui modifie la quantité de chaleur concentrée par la lentille sur la pile.

Pour une position donnée de la lampe et de la pile on observe :

1° une impulsion α produite quand l'une des moitiés de la lentille est découverte (fig. 308); 2° une impulsion α quand l'autre moitié l'est à son tour; 3° l'impulsion 2α quand les deux volets sont ouverts. Il est clair que dans ce dernier cas la quantité de chaleur qui tombe par seconde sur la pile est double, or l'impulsion est également double.

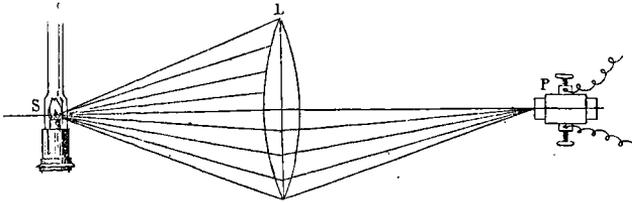


Fig. 309.

Nous prendrons ici pour *unité expérimentale de chaleur* la quantité qui donne au galvanomètre du thermomultiplicateur une impulsion de 1 division, et nous représenterons une quantité de chaleur par le nombre de divisions de l'impulsion, en ayant soin de ne pas atteindre des impulsions pour lesquelles la proportionnalité n'a plus lieu.

461. Lecture au galvanomètre par la méthode de la réflexion.

— Si l'aiguille du galvanomètre est munie d'un long index qui parcourt les divisions d'un cercle de grand rayon, on peut se borner à de petites déviations pour lesquelles la proportionnalité est rigoureuse, car de petits angles d'écart correspondent alors à des arcs assez étendus pour pouvoir être appréciés avec sûreté. La mesure des écarts de l'aiguille par la *méthode de la réflexion* permet de réaliser cette condition expérimentale. On fait réfléchir sur un petit miroir vertical M fixé au support de l'aiguille les divisions d'une règle circulaire divisée qui a son centre sur le fil (fig. 310).

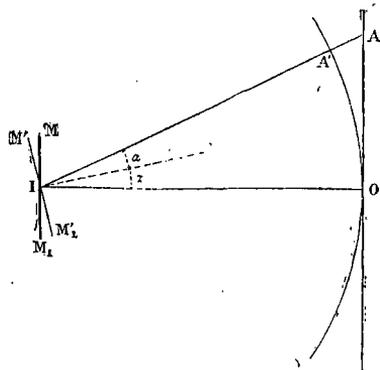


Fig. 310.

Une lunette-viseur est placée au-dessus de la division O ; avant toute déviation, le miroir réfléchit cette division dans l'axe OI de la lunette. Quand un courant traverse le galvanomètre, le miroir est

dévié avec l'aiguille aimantée et renvoie dans la lunette l'image d'une division A'. L'angle lu A'O est *double* de l'angle de déviation (620). Avec une règle circulaire de 1 mètre de rayon, à un déplacement

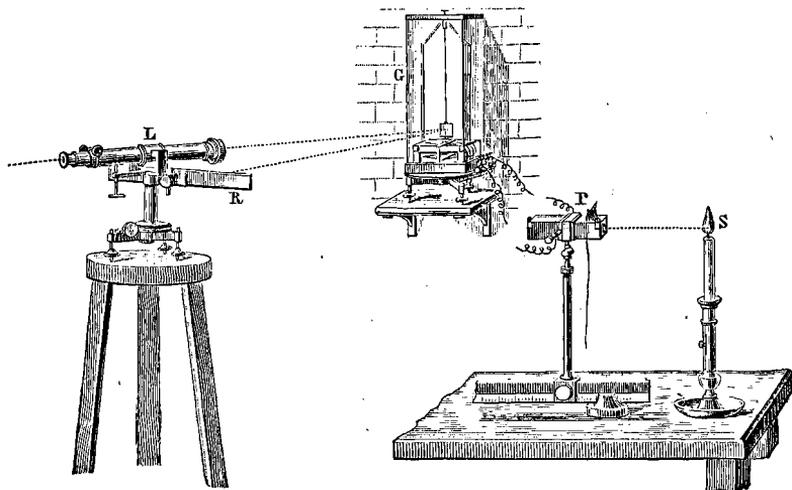


Fig. 311.

angulaire de 1° de l'aimant correspond sur la règle un arc A'O de 35 millimètres⁽¹⁾.

La figure 311 donne la représentation d'une mesure de rayonnement calorifique. La pile P, exposée sur l'une de ses faces à l'action d'une source de chaleur S, est reliée par ses pôles au galvanomètre G; une lunette-viseur L, portant sur son pied une règle R, permet de mesurer le déplacement angulaire du miroir ou du système aimanté.

462. Banc de Melloni (fig. 312). — La pile thermo-électrique et les pièces qui servent aux observations de rayonnement calorifique sont alignées sur le banc de Melloni. C'est une règle métallique horizontale divisée sur laquelle se déplacent plusieurs colonnes en laiton que l'on fixe avec des vis de pression et qui supportent : la source calorifique S, un écran E pour intercepter à volonté le rayonnement, un diaphragme D à diamètre variable pour limiter le fais-

(1)

$$\begin{aligned} \text{arc } A'O &= \frac{2}{2\pi \cdot 1000} = \frac{2}{360} \\ \text{arc } A'O &= 34^{\text{mm}9} \end{aligned}$$

ceau envoyé par la source à la pile, la pile thermo-électrique P et un écran e pour protéger la seconde face de la pile.

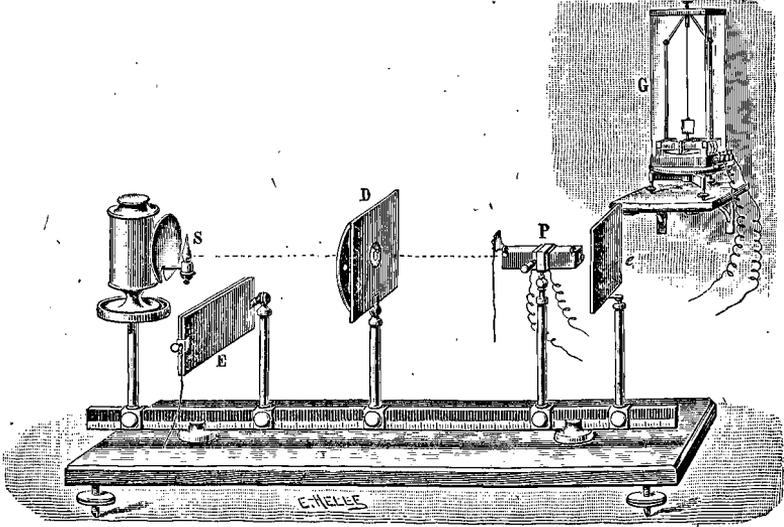


Fig. 312.

THÉORÈMES GÉNÉRAUX SUR LA PROPAGATION DE LA CHALEUR

463. Dans un milieu homogène, la chaleur se propage en ligne droite. — Entre une pile thermo-électrique et une source calorifique, on place sur le banc de Melloni des écrans percés de petites ouvertures disposées sur une ligne droite qui va de la source à la pile; l'aiguille du galvanomètre est déviée dès qu'on ouvre l'écran de la pile; l'échauffement n'a plus lieu si l'on déplace une des ouvertures (599).

On appelle **rayon de chaleur** la ligne droite suivant laquelle la chaleur émanée d'un point agit sur un autre point. Les différents points d'un corps chaud émettent des rayons de chaleur.

Le rayonnement d'un point se fait tout autour de ce point dans toutes les directions. La *vitesse de propagation* du rayonnement calorifique dans le vide est égale à la vitesse de propagation de la lumière (300 000 kilomètres par seconde).

464. Loi du carré des distances. — La chaleur divergente rayonnée par une source et reçue par un thermomètre diminue quand la distance augmente.

Le long d'un banc de Melloni on déplace une pile thermo-électrique, et on fait agir sur elle normalement une même source à des distances D et D' ; on observe au galvanomètre des impulsions α et α' .

$$\text{On trouve } \frac{\alpha}{\alpha'} = \frac{D'^2}{D^2}.$$

En raison de la proportionnalité des impulsions aux quantités de chaleur q et q' reçues dans le même temps par la surface de la pile,

$$\frac{q}{q'} = \frac{D'^2}{D^2}.$$

D'où la loi suivante : la quantité de chaleur reçue normalement par une surface donnée varie en *raison inverse du carré de la distance* de cette surface à la source.

Cette loi peut être prévue directement (604).

465. Intensité d'une source. — On appelle intensité d'une source calorifique la *quantité de chaleur* que cette source envoie, par seconde, sur une surface égale à un centimètre carré, placée à l'unité de distance et recevant normalement les rayons calorifiques.

En désignant par I cette intensité, la quantité de chaleur envoyée normalement par la même source sur la même surface à la distance d sera $\frac{I}{d^2} = E$.

466. Influence de l'inclinaison sur la quantité de chaleur reçue.

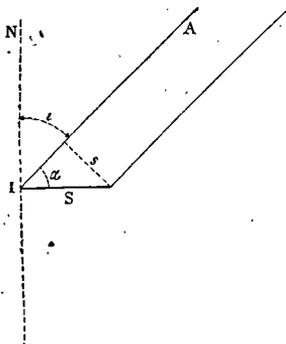


Fig. 313.

— Considérons une surface plane S recevant sous un angle α un faisceau cylindrique de rayons dont la section droite est s (fig. 313). Soient E et e les quantités de chaleur que reçoit l'unité de surface sur S et sur s . La chaleur totale reçue par S est celle que reçoit s .

D'après cela, $ES = es$, or $s = S \sin \alpha$, donc $E = e \sin \alpha = e \cos i$. La chaleur reçue par l'unité de surface est proportionnelle au *cosinus de l'incidence*.

467. Loi du refroidissement de Newton. — Quand un corps chaud se trouve dans une enceinte à température moins élevée, l'expérience montre qu'il se refroidit en transmettant sa chaleur à l'enceinte par *rayonnement* et par *convection*. Ces deux modes de transmission, essentiellement différents (446), se produisant habituellement simultanément, les physiciens ont d'abord étudié la transmission de la chaleur à l'enceinte sans faire de distinction entre le rayonnement et la convection⁽¹⁾. La loi suivant laquelle se refroidit un corps placé dans une enceinte de température inférieure à la sienne est complexe, car le refroidissement dépend en effet à la fois de la nature de la surface du corps qui se refroidit (*pouvoir émissif*), de la nature et de la pression du *gaz ambiant*. Toutefois, si l'excès de la température T du corps qui se refroidit sur la température t de l'enceinte ne dépasse pas une vingtaine de degrés, la loi prend une forme simple due à Newton : les abaissements successifs de température $T_0 - T_1$, $T_1 - T_2$, $T_2 - T_3$... correspondant à des intervalles de temps θ_1 , θ_2 ,... sont proportionnels à ces intervalles de temps et aux excès moyens pendant ces intervalles.

$$T - T' = m\theta \left[\frac{T + T'}{2} - t \right]$$

Les intervalles θ doivent être pris d'autant plus courts que le décroissement $T - T'$ est plus rapide.

$\frac{T - T'}{\theta}$ ou $\frac{\Delta T}{\Delta \theta}$ peut s'appeler la *vitesse moyenne de refroidissement* pendant l'unité de temps⁽²⁾. La loi de Newton s'énonce : *La vitesse de refroidissement est proportionnelle à l'excès de température.*

$$\frac{\Delta T}{\Delta \theta} = m(T - t).$$

m est la vitesse de refroidissement pour un excès de température de 1° du corps chaud sur l'enceinte, m est constant⁽³⁾.

(1) Au commencement du XIX^e siècle, Dulong et Petit ont mesuré séparément la chaleur transmise par rayonnement et la chaleur transmise par convection.

(2) C'est la vitesse moyenne du mercure sur la tige thermométrique.

(3) Si les excès de température dépassent une vingtaine de degrés, m augmente avec l'excès de température.

Pour une petite enceinte, le refroidissement est plus rapide que pour une grande; en effet le rayonnement doit être le même, mais la convection est plus forte, parce que le gaz a dans son mouvement d'autant moins de chemin à parcourir pour aller se refroidir contre les parois de l'enceinte, que celle-ci a de plus faibles dimensions.

Pour un intervalle de temps très court on a remplacé $\frac{T+T'}{2}$ par T .

Il résulte de cette loi de la vitesse de refroidissement que la *quantité de chaleur* transmise par un corps chaud à l'enceinte dans laquelle il se trouve, est proportionnelle à l'excès de la température de la surface des corps sur celle de l'enceinte. Cette quantité de chaleur doit être aussi d'ailleurs proportionnelle à la surface du corps chaud.

468. Propriétés des corps relativement à la chaleur rayonnante. — Un flux calorifique d'intensité I qui tombe sur un corps se divise en plusieurs parties distinctes :

1° Une partie R se *réfléchit régulièrement* vers le côté de l'espace d'où elle vient.

2° Une partie D se réfléchit irrégulièrement ou se *diffuse* dans toutes les directions.

3° Une partie A est absorbée et contribue à l'échauffement du corps.

4° Si le corps est transparent pour la chaleur, une quatrième partie T est *transmise* à travers la substance sous forme rayonnante sans contribuer à son échauffement.

Ces divers faisceaux proviennent du faisceau primitif et leur somme doit lui être égale. Par conséquent nous avons :

$$R + D + A + T = I.$$

RÉFLEXION DE LA CHALEUR

469. Lois géométriques de la réflexion. — Un rayon de chaleur qui rencontre une surface polie se réfléchit suivant une direction déterminée.

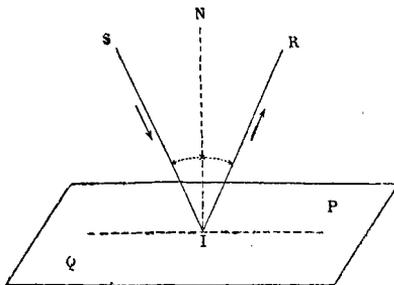


Fig. 314.

Menons une normale à la surface réfléchissante au point d'incidence : le plan formé par le rayon incident et la normale se nomme *plan d'incidence* ; l'angle du rayon incident et de la normale est l'*angle d'incidence* ; le plan du rayon réfléchi et de la

normale est appelé *plan de réflexion* ; l'angle du rayon réfléchi et de la normale est l'*angle de réflexion* (fig. 314).

Les lois de la réflexion de la chaleur sont les mêmes que les lois de la réflexion de la lumière (609).

- 1° *Le rayon réfléchi reste dans le plan d'incidence ;*
- 2° *L'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence.*

La vérification de ces deux lois se fait avec l'appareil de Melloni (fig. 315).

En un point du banc est placé une colonne K supportant une plate-

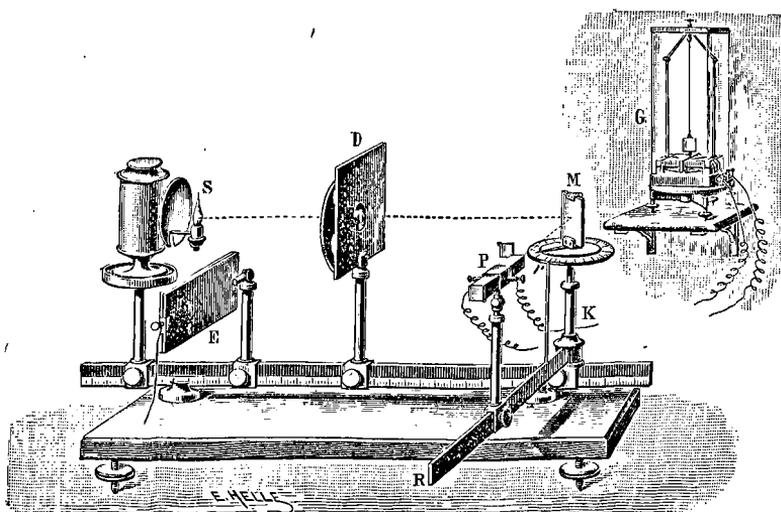


Fig. 315.

forme horizontale circulaire divisée en degrés. Au centre de cette plate-forme on pose perpendiculairement un miroir métallique M, à la même hauteur que la source de chaleur S. Le pied de la plate-forme, fixé sur le banc, soutient une règle auxiliaire R mobile autour de la même verticale que le miroir et portant une pile thermo-électrique P. On dirige cette règle de telle façon que les rayons émis par la source S tombent sur la pile après leur réflexion sur le miroir : on le reconnaît à ce que le faisceau réfléchi a alors son *maximum d'intensité*. Dans cette position de la pile, le faisceau incident et l'axe de la pile sont dirigés suivant deux rayons du cercle divisé. On vérifie sur la division de la plate-forme l'égalité des angles de la normale au miroir

(figurée par une pointe) avec la direction de la règle principale et avec la direction de la règle auxiliaire⁽¹⁾.

Par suite de la disposition des pièces de l'appareil, le rayon incident et le rayon réfléchi sont dans un même plan horizontal avec la normale au miroir M.

Les lois de la réflexion se vérifient aussi par leurs conséquences, en particulier, par les propriétés des miroirs sphériques.

470. Miroirs ardents. — On donne le nom de miroirs ardents à des miroirs sphériques concaves dont l'axe est dirigé vers le centre du soleil. La chaleur solaire se concentre au foyer avec la lumière, elle peut y enflammer des substances combustibles, y fondre des métaux (fig. 316).

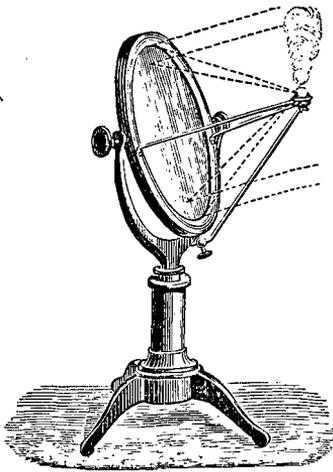


Fig. 316.

On a essayé dans ces derniers temps d'appliquer les miroirs métalliques concaves à l'utilisation de la chaleur solaire.

Miroirs conjugués. — On installe en regard l'un de l'autre, à quelques mètres de distance, deux miroirs sphériques concaves M et M' dont les axes coïncident. Au foyer principal F du miroir M on place la flamme d'une bougie : les rayons réfléchis parallèlement à l'axe commun des deux miroirs tombent sur le deuxième miroir M' parallèlement à son axe et vont après réflexion concourir au foyer F' et former une image sur un petit écran.

La situation des deux foyers étant reconnue, si l'on dispose au foyer F une corbeille métallique renfermant des charbons en combustion, on voit s'enflammer de l'amadou ou du fulmi-coton placé

(1) Une tige verticale montée sur la règle R et terminée par un index r marque sur la plate-forme divisée la position de la pile par rapport à la normale au miroir, figurée par une pointe, et permet de lire l'angle de réflexion. Pour déterminer sur la plate-forme la division correspondant à la direction du rayon incident, on a, dans une opération préliminaire, orienté le miroir de telle façon que le centre de la tache lumineuse du faisceau réfléchi par M vint se placer au centre de l'ouverture du diaphragme D. A ce moment, le miroir M était normal au faisceau incident, et la division sur laquelle était pointée sa normale marquait la direction du rayon incident.

en F' sur un support P . Dans la figure 317 un arc électrique occupe le foyer F .

L'inflammation n'a pas lieu quand on interpose un écran entre la source calorifique et le miroir M , quoique la chaleur puisse se

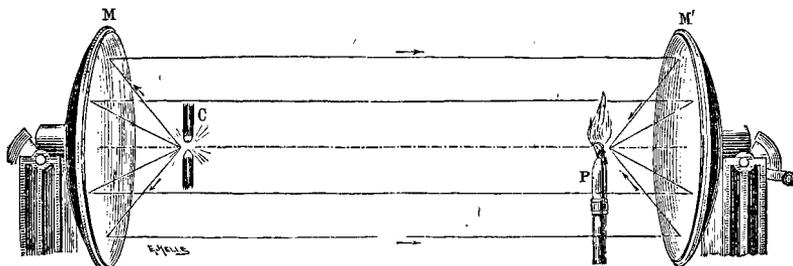


Fig. 317.

transmettre directement de F en F' . Il faut avoir soin de masquer l'un des deux miroirs pendant qu'on place les corps combustibles en F' . L'inflammation n'a plus lieu si l'on incline un tant soit peu l'axe de l'un des miroirs.

Quand on remplace les charbons ardents par un bloc de glace, un thermomètre placé au second foyer baisse, car il envoie en F plus de chaleur qu'il n'en reçoit (*réflexion apparente du froid*).

471. Pouvoir réflecteur. — On appelle pouvoir réflecteur d'un miroir le *rapport de la chaleur réfléchié à la chaleur incidente*.

Le pouvoir réflecteur d'un miroir se détermine avec l'appareil de Melloni et se déduit de deux observations :

1° La règle mobile qui porte la pile est d'abord placée sur le *prolongement* de la règle principale de manière à recevoir sur la pile le faisceau incident. On note l'impulsion a due à la radiation directe.

2° Le miroir est ensuite installé verticalement au centre de la plate-forme divisée (fig. 315); on fait tourner la règle mobile R , et on amène l'axe de la pile *dans la direction du faisceau réfléchi*. On observe une nouvelle impulsion a' .

Le rapport de cette seconde impulsion a' à l'impulsion a du faisceau direct est égal au pouvoir réflecteur.

Le pouvoir réflecteur est *plus grand pour les radiations obscures* que pour les radiations lumineuses; il est donc moindre pour la chaleur solaire que pour la chaleur d'un cube noirci plein d'huile chaude.

Pour les métaux polis et une même radiation, le pouvoir réflecteur

varie peu avec l'incidence, il varie beaucoup plus avec l'incidence pour les substances analogues au verre.

RÉFLEXION IRRÉGULIÈRE OU DIFFUSION

472. Un faisceau incident formé de rayons parallèles n'est réfléchi dans une direction unique que si la surface est exactement polie. Les substances mates, telles que le *blanc de céruse*, le *papier*, réfléchissent la chaleur, comme la lumière, dans toutes les directions. Chacun des rayons incidents paraît être réfléchi conformément aux lois de la réflexion régulière, mais l'incidence variant aux différents points d'une aspérité, les rayons réfléchis sont **diffusés** ou éparpillés dans diverses directions (622). Avec le *noir de fumée*, qui absorbe tout le faisceau incident, avec les *métaux* et le *verre polis*, qui réfléchissent régulièrement ce qu'ils n'absorbent pas, la diffusion est négligeable.

TRANSMISSION DE LA CHALEUR

473. On appelle substance **diathermane** une substance transparente pour les rayons calorifiques. Un corps **athermane** est un corps imperméable à la chaleur. Un rayonnement calorifique traverse une substance diathermane sans l'échauffer; il est absorbé par les substances athermanes, et élève leur température. Un rayon de chaleur est réfracté s'il rencontre obliquement une substance diathermane.

RÉFRACTION DE LA CHALEUR

474. Les lois géométriques de la réfraction de la chaleur sont celles de la réfraction de la lumière (*loi du plan d'incidence* et *loi des sinus* (648). Ces lois conduisent aux mêmes conséquences que dans le cas de la lumière : concentration de la chaleur par une lentille convergente, déviation et décomposition de la chaleur par un prisme.

475. **Décomposition de la chaleur solaire par un prisme.** — Avec une lentille convergente en *sel gemme* (481) on projette sur

un écran l'image nette S' d'une fente fine S éclairée par les rayons solaires. Avant de former cette image, les rayons qui sortent de la lentille sont reçus par un prisme en *sel gemme* dont l'arête réfringente est parallèle à la fente (fig. 318); ce prisme, au minimum de déviation,

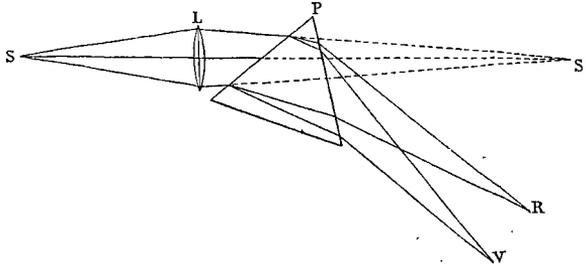


Fig. 318.

décompose l'image de la fente en l'allongeant perpendiculairement à son arête (693). Dans ce spectre lumineux, où le rouge est le moins dévié et le violet le plus dévié (fig. 318), on promène une *pile thermo-*

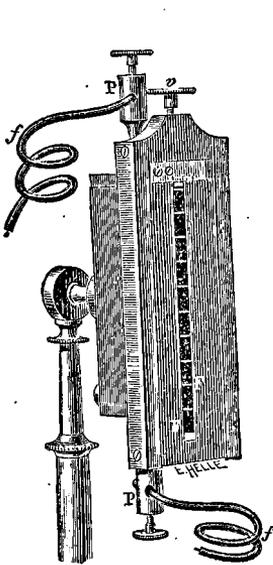


Fig. 319.

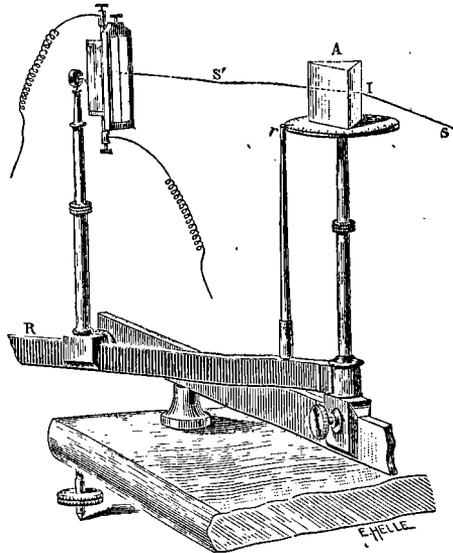


Fig. 320.

électrique linéaire, formée d'une ligne de soudures parallèle à la fente éclairante et à l'arête réfringente du prisme et assez étroite pour n'admettre qu'une très petite partie du faisceau dispersé (fig. 319).

Une fente à bords mobiles F, commandée par une vis v , fait varier la largeur du faisceau reçu par la pile. La pile linéaire est montée sur la règle mobile R du banc de Melloni et est amenée à recevoir successivement les diverses couleurs du spectre (fig. 320).

Dans le violet la pile n'accuse que très peu de chaleur; la chaleur augmente à mesure qu'on se rapproche du rouge et persiste dans la partie obscure jusqu'à une certaine distance en deçà du rouge.

476. Distribution de la chaleur dans un spectre prismatique solaire. — Si nous portons sur une ligne horizontale une longueur égale à l'étendue du spectre calorifique obtenu avec un prisme et une lentille de sel gemme, et si sur cette droite nous élevons des perpendiculaires proportionnelles aux impulsions observées dans les positions successives de la pile thermo-électrique, les

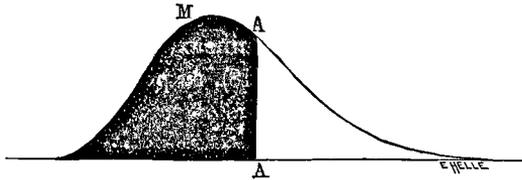


Fig. 321.

extrémités de ces ordonnées figurent la distribution de la chaleur le long du spectre : très faibles dans le violet, les intensités augmentent à mesure qu'on s'approche du rouge, et elles sont *plus fortes dans la partie obscure* que dans la partie lumineuse. La courbe offre un *maximum* accentué M dans la partie obscure (724) infra-rouge (fig. 321). La chaleur ne disparaît que loin du rouge. *Un faisceau solaire comprend donc des rayons calorifiques décomposables comme les rayons lumineux en un spectre.* Ce spectre offre des rayons de même réfrangibilité que les rayons lumineux, et *en outre* des rayons obscurs moins déviés et par conséquent moins réfrangibles.

477. Spectres calorifiques des diverses sources. — Les sources calorifiques non lumineuses, analysées comme la lumière solaire, ne donnent qu'un *spectre obscur* moins dévié que le rouge. Les corps incandescents émettent en même temps des rayons calorifiques obscurs et des rayons calorifiques lumineux.

Quand on fait passer dans un fil de platine un courant électrique

dont on augmente graduellement l'intensité, le spectre du fil ne présente d'abord que des rayons obscurs calorifiques ; vers 500° le fil devient rouge sombre, et une bande rouge apparaît dans le spectre ; l'éclat du rouge et son action calorifique augmentent quand la température croît, puis de l'orangé apparaît ; quand le fil a atteint le blanc, le spectre s'étend jusqu'au violet, et la pile linéaire proménée le long du spectre accuse une répartition de la chaleur analogue à celle du spectre solaire, c'est-à-dire de la chaleur qui va en décroissant du rouge au violet. A mesure que la température s'élève, les radiations obscures infra-rouges augmentent elles-mêmes d'intensité calorifique.

POUVOIRS DIATHERMANES

478. On appelle **pouvoir diathermane** d'une substance, sous une épaisseur déterminée et pour une source calorifique donnée, *le rapport entre la quantité de chaleur transmise et la quantité de chaleur incidente.*

479. **Détermination des pouvoirs diathermanes.** — Pour comparer les pouvoirs diathermanes des diverses substances, on les

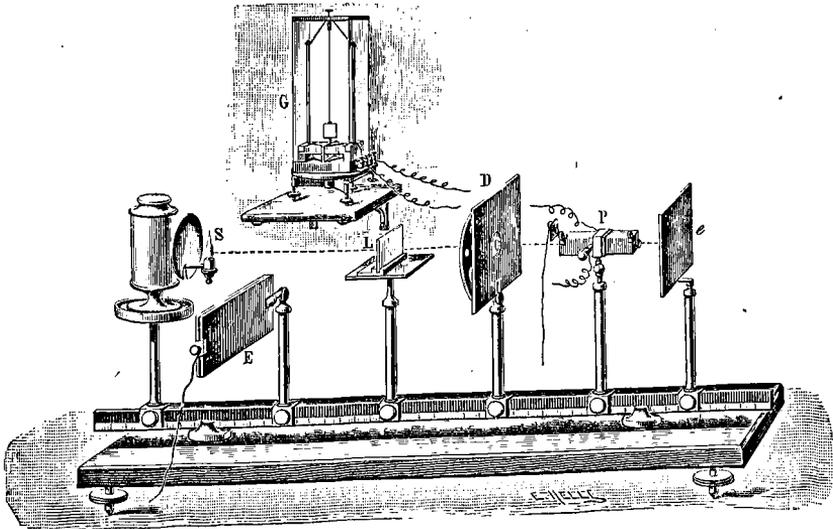


Fig. 322.

taille en lames à faces parallèles, de même épaisseur, et on fait les deux mesures suivantes (fig. 322) :

1° On reçoit sur la pile P le rayonnement *direct* de la source S et on note l'impulsion α du galvanomètre.

2° Entre la source S et la pile on *interpose* une lame L placée verticalement sur un support, et on note la nouvelle impulsion α' . Le rapport $\frac{\alpha'}{\alpha}$ est le pouvoir diathermane de la lame L.

Les pouvoirs diathermanes dépendent de la nature de la source calorifique, de la nature de la substance, et de son épaisseur.

480. Influence de la nature de la source. — L'analyse par le prisme nous a montré qu'une source émet des rayons calorifiques de réfrangibilités différentes ; à *chaque réfrangibilité correspond pour une substance donnée un pouvoir diathermane spécial.*

Une lame de *verre* est opaque pour les rayons obscurs peu réfrangibles, tels que ceux qui sont émis par un cube à faces noircies contenant de l'eau bouillante ; elle se laisse mieux traverser par les rayons obscurs voisins du rouge lumineux ; enfin elle est aussi transparente pour la chaleur des rayons calorifiques lumineux que pour leur lumière.

C'est en appliquant les indications précédentes qu'on maintient à une température élevée une serre vitrée exposée au midi. La partie lumineuse de la chaleur solaire et la partie obscure la plus réfrangible traversent les vitres et échauffent les corps qu'elles rencontrent à l'intérieur. Ceux-ci n'émettent que des rayons obscurs de faible réfrangibilité qui ne peuvent plus sortir, s'accablent dans l'enceinte, et en élèvent la température.

481. Influence de la nature de la substance. — **Substances transparentes.** — Les substances transparentes laissent passer la chaleur lumineuse, mais elles absorbent pour la plupart une notable partie de la chaleur obscure. Le *verre* est opaque pour les rayons obscurs peu réfrangibles, l'*alun* arrête presque toute la chaleur obscure, l'*eau* est également athermane pour les rayons obscurs, il en est de même pour les liquides de l'œil, de telle sorte que si la rétine était sensible aux rayonnements obscurs, ceux-ci ne pourraient l'impressionner puisqu'ils ne lui parviennent pas.

L'*air sec* est diathermane pour la chaleur, les rayons solaires le traversent sans l'échauffer. Les gaz simples ou leurs mélanges sont

diathermanes, les gaz composés sont au contraire absorbants. Ainsi la *vapeur d'eau* arrête dans une grande proportion la chaleur obscure. Cette propriété de la vapeur d'eau joue un rôle important en *Météorologie*. L'air humide atmosphérique protège notre globe pendant le jour contre une insolation trop vive en absorbant une grande partie des radiations solaires obscures. La chaleur obscure que le sol échauffé émet pendant la nuit est à son tour arrêtée par la vapeur d'eau des couches inférieures de l'atmosphère, et cette action nous préserve d'un refroidissement trop accentué. D'après cela, c'est dans les contrées les plus sèches (Sahara, Asie centrale) que la température subit les plus fortes variations. Dans les îles de petite étendue les variations de température sont faibles du jour à la nuit.

Sel gemme. — Le sel gemme, seul, laisse passer la *totalité* de la chaleur incidente; quelle que soit son épaisseur, il en transmet les 0,92. Les 0,08 de perte proviennent des réflexions sur les deux faces de la lame. Le sel gemme se comporte comme une substance transparente et incolore *pour toutes les radiations*. C'est à cause de cette transparence qu'on emploie une lentille et un prisme de sel gemme pour l'analyse d'un faisceau calorifique. En raison de l'absorption par le verre, le spectre serait beaucoup moins étendu dans la région calorifique obscure si l'on faisait usage d'une lentille et d'un prisme de verre.

Substances non transparentes. — Les substances opaques pour la lumière le sont aussi pour la chaleur correspondante; l'absorption s'étend souvent à la chaleur obscure, mais de même que nous avons rencontré des substances transparentes pour la chaleur lumineuse et opaques pour la chaleur obscure, certains corps peuvent arrêter la chaleur lumineuse et laisser passer la chaleur obscure. Tel est le cas du *sel gemme enfumé*, d'une *solution d'iode dans le sulfure de carbone*.

Plaçons à petite distance des charbons d'un arc électrique un ballon de verre rempli d'eau : la lumière sera concentrée au delà du ballon en un foyer lumineux où la pile thermo-électrique n'accuse qu'une faible chaleur. Remplaçons l'eau par une solution d'iode dans le sulfure de carbone, assez concentrée pour paraître opaque. Il n'y aura plus de foyer lumineux, mais une vive concentration de chaleur, capable d'enflammer du fulmicoton noirci.

Interposition de deux lames différentes. — Une lame d'*alun* arrête la chaleur lumineuse, une lame de *sel gemme enfumée* arrête

la chaleur obscure ; l'ensemble des deux lames intercepte le rayonnement tout entier. L'analogie avec les effets produits en lumière par les verres colorés est évidente. Un verre coloré en rouge ne transmet que la lumière rouge, un verre coloré en vert ne transmet que la lumière verte. Le système des deux verres superposés arrête toute la lumière.

Influence de l'épaisseur de la lame absorbante. — La quantité de chaleur qui traverse une lame absorbante décroît à mesure que l'épaisseur augmente ; toutefois, au delà d'une certaine épaisseur, la diminution n'est plus appréciable. Cela tient à l'inégale absorption par la lame des diverses radiations du faisceau incident.

Concevons, en effet, la lame décomposée en tranches de même épaisseur parallèles à la face d'entrée : un faisceau qui a traversé une première tranche arrive à la seconde *appauvri des radiations plus absorbables*, retenues par la première. La deuxième tranche produit une nouvelle épuration du faisceau, et l'absorption par les tranches suivantes diminue puisque le faisceau a déjà perdu la plus grande partie des radiations absorbables par la substance.

ABSORPTION DE LA CHALEUR

482. La chaleur qui tombe sur un corps et qui n'est ni réfléchié régulièrement, ni diffusée, ni transmise, est absorbée. Si le corps est diathermane, la chaleur absorbée est arrêtée par les tranches successives du corps ; s'il est athermane, la chaleur absorbée est arrêtée par les couches superficielles.

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

Pour un métal parfaitement poli, la chaleur absorbée est représentée par la différence entre la chaleur incidente et la chaleur régulièrement réfléchié ; le pouvoir absorbant est alors complémentaire du pouvoir réflecteur. Comme le pouvoir réflecteur dépend de l'angle d'incidence et de la réfrangibilité de la radiation incidente, il en est de même du pouvoir absorbant.

Le *noir de fumée* ne réfléchit régulièrement aucune espèce de chaleur ; il n'a en outre qu'une diffusion insensible ; son pouvoir absorbant est donc égal à l'unité pour toutes les radiations ; c'est à cause de cette propriété que l'on recouvre de noir de fumée les faces des

piles thermo-électriques ; dans ces conditions, l'absorption des rayons incidents par la face exposée au rayonnement est la même pour toutes les radiations. Les terres noires s'échauffent plus en été que les terres blanches, et les vêtements noirs absorbent mieux les rayons solaires que les vêtements blancs.

ÉMISSION DE LA CHALEUR

La quantité de chaleur émise par un même corps augmente avec la température de ce corps. A une même température, la quantité de chaleur émise dépend de la nature de la surface.

483. **Mesure des pouvoirs émissifs.** — Sur un banc de Melloni, à la hauteur de la pile thermo-électrique et à une certaine

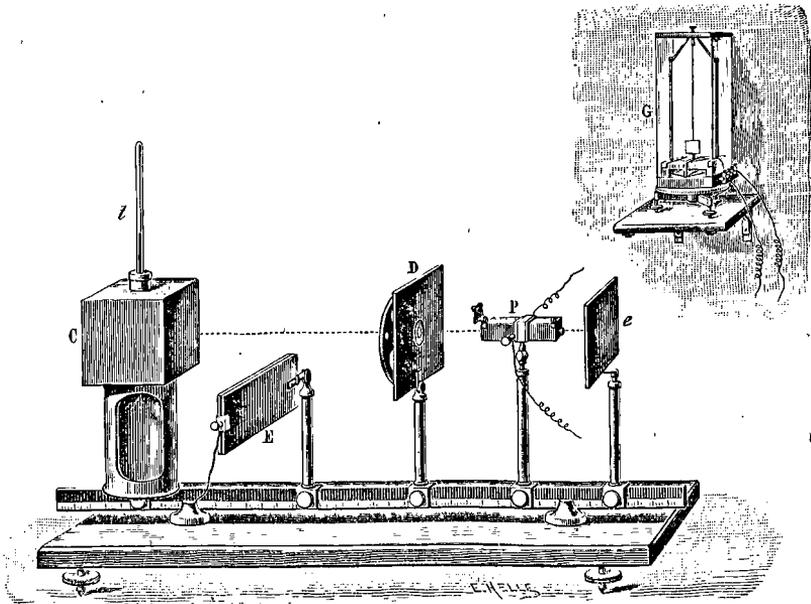


Fig. 323.

distance, on dispose un cube creux dont les faces verticales sont recouvertes de substances différentes. Ce cube contient de l'eau chaude ou de l'huile chaude dont on maintient la température

constante en agitant et en introduisant de temps en temps de petites quantités de liquide chaud (fig. 323).

On fait rayonner successivement vers la pile les *diverses faces* du cube, l'axe de la pile étant perpendiculaire à la face qui rayonne; on observe des impulsions différentes de l'aiguille du galvanomètre. Ces impulsions mesurent les quantités de chaleur émises pendant le même temps par des surfaces *d'égale étendue, à la même température.*

484. Pouvoirs émissifs des diverses substances. — Le noir de fumée mat est la substance qui, à une même température, émet le plus de chaleur: On noircit les tuyaux de poêle à la plombagine pour qu'ils émettent plus de chaleur.

On appelle **pouvoir émissif** d'une substance *le rapport de la quantité de chaleur émise par cette substance à celle qui est émise par une surface égale de noir de fumée à la même température.*

Les *métaux polis* ont un pouvoir émissif très faible: c'est en vertu de la *faiblesse de ce pouvoir émissif* qu'un liquide se maintient longtemps chaud dans un vase d'argent ou de cuivre poli.

Pour un même corps, le pouvoir émissif, c'est-à-dire le rapport de la quantité de chaleur émise à celle qu'émet une surface égale de noir de fumée, *change avec la température.*

En outre, pour un même corps, la *composition de la chaleur émise* se modifie avec la température, par suite de l'addition de rayons plus réfrangibles à mesure que la température s'élève.

485. Égalité du pouvoir émissif et du pouvoir absorbant. — Pratiquement, un corps qui s'échauffe facilement par le rayonnement se refroidit vite. Ainsi, le noir de fumée absorbe toute la chaleur qu'il reçoit, son pouvoir absorbant est maximum; c'est aussi la substance dont le pouvoir émissif est maximum.

L'expérience fait voir que le pouvoir émissif et le pouvoir absorbant d'un corps varient ensemble et qu'ils portent sur les mêmes rayons du spectre.

La relation entre le pouvoir émissif et le pouvoir absorbant est plus précise; elle peut s'énoncer comme il suit: *Pour un même corps et une radiation de même réfrangibilité, le pouvoir émissif est égal au pouvoir absorbant.*

486. Inséparabilité des effets lumineux et calorifique d'une radiation. — Un faisceau émané d'une source lumineuse ne

doit pas être considéré comme une superposition de rayons lumineux et calorifiques (et chimiques) qui s'accompagnent en restant distincts. La lumière et la chaleur sont des effets d'un même agent physique appelé radiation. *Un rayon, de réfrangibilité déterminée, produit différents effets suivant l'organe ou le corps qui le reçoit.* C'est ainsi que les rayons qui appartiennent au spectre lumineux sont susceptibles d'agir à la fois sur le sens du toucher et sur la rétine et sont ainsi à la fois calorifiques et lumineux. Pour un de ces rayons les effets lumineux et calorifique sont inséparables, car, toute diminution de l'effet lumineux d'un rayon produite par réflexion ou par absorption est accompagnée d'une diminution *proportionnelle* de l'effet calorifique. Si la moitié de la lumière disparaît, la moitié de la chaleur disparaît aussi. Il n'y a donc qu'une seule espèce de rayons. Les rayons obscurs sont invisibles parce qu'ils sont absorbés par les milieux de l'œil.

APPLICATIONS DES LOIS DE LA CHALEUR

PHÉNOMÈNES MÉTÉOROLOGIQUES

487. Rosée. — On donne le nom de rosée aux gouttelettes d'eau que l'on aperçoit quelquefois le matin sur des corps placés à découvert et particulièrement à la surface des parties vertes des plantes.

La rosée *ne tombe point*, ce n'est pas dans l'air que la vapeur se condense, car la rosée n'est pas accompagnée de brouillard, mais la condensation a lieu *au contact* même de certains corps.

Influence du pouvoir émissif et de la conductibilité. — Lorsque le ciel est clair, les corps de la surface du sol se refroidissent par le rayonnement nocturne et d'autant plus que leur *pouvoir émissif est plus grand*, surtout si leur *conductibilité est faible*, car ils ne peuvent alors emprunter de chaleur au sol avec lequel ils sont en contact.

C'est ainsi que les corps mats et surtout les *plantes vertes* dont le pouvoir émissif est grand et la conductibilité médiocre se refroi-

dissent plus que le sol qui les porte et qui est conducteur, leur température s'abaisse souvent de 5 à 6 degrés ; à leur contact l'air se refroidit et s'il est assez humide pour que la vapeur d'eau qu'il renferme devienne saturante à la température du corps froid (413), cette vapeur se condense *comme sur une carafe froide ou sur un hygromètre de condensation*.

La rosée n'apparaît pas sur les métaux polis dont le pouvoir émissif est très faible.

Si la température de l'air n'est que de quelques degrés au-dessus de zéro, le refroidissement peut être assez grand pour que l'eau déposée par la rosée se congèle, ce qui produit la *gelée blanche*.

Exposition et état du ciel. — La plante rayonne d'autant mieux qu'elle voit une plus grande étendue de ciel. Tout *écran* qui lui cache une portion du ciel la protège, la chaleur perdue par rayonnement étant à peu près compensée par la chaleur rayonnée par l'écran. Ainsi un thermomètre placé sous un abri se refroidit beaucoup moins que s'il est à découvert.

La rosée cesse de se déposer s'il y a des nuages ou du brouillard. On combat au printemps la gelée blanche et on préserve de son action les *jeunes pousses* en protégeant les plantes par des abris ou en produisant par la *combustion de matières goudroneuses* d'épaisses fumées qui forment un écran protecteur.

Agitation de l'air. — Il n'y a pas de rosée quand le vent souffle, car l'air se renouvelle alors très vite, aussi ne peut-il prendre la température des corps qu'il touche et se refroidir assez pour leur céder sa vapeur d'eau. Cependant, une *légère agitation* de l'air favorise la production de la rosée, car différentes couches d'air viennent successivement se dépouiller de leur humidité et le dépôt augmente.

488. Nuages. — L'air contient toujours de la vapeur d'eau invisible (409) : cette vapeur d'eau perd sa transparence en se condensant. Le refroidissement d'une couche d'air humide amène la condensation d'une partie de sa vapeur qui forme un nuage, c'est-à-dire *un amas de gouttelettes extrêmement petites*. Ces gouttelettes, plus lourdes que l'air, demeurent suspendues comme les corpuscules solides que l'on voit flotter ; en vertu de la résistance que l'air leur oppose, leur chute est très lente. L'immobilité des nuages dans le sens vertical n'est d'ailleurs qu'apparente. Les nuages *tombent lentement* ; leur

partie inférieure repasse à l'état de vapeur invisible dans des couches plus chaudes, leur partie supérieure s'accroît par de nouvelles condensations. Les nuages sont en effet le siège de transformations continuelles.

La *hauteur* des nuages est très variable; leur hauteur moyenne paraît comprise entre 500 et 2000 mètres.

Variétés de nuages. — Les nuages affectent différentes formes auxquelles on a donné des noms spéciaux.

Les **cirrus** sont des nuages très élevés semblables à des filaments déliés et formés de neige ou de glace; les **cumulus** sont de gros nuages blancs, à contours arrondis, entassés les uns sur les autres, ils se forment surtout en été; les **stratus** sont des bandes horizontales, occupant souvent l'horizon au coucher du soleil; les **nimbus** sont des nuages confondus, noirs, sans forme déterminée, couvrant une grande partie du ciel et se résolvant fréquemment en pluie.

Formation des nuages. — Si un courant d'air chaud et humide est transporté dans une couche froide de l'atmosphère, sa température peut s'abaisser à un degré où il n'est plus capable de garder toute la vapeur d'eau qu'il contenait : de là une *précipitation de vapeur* et formation d'un nuage. Ajoutons que si la couche d'air s'élève, sa pression diminue, il en résulte une *détente* qui entraîne à elle seule un refroidissement (405) et une condensation. Parmi les causes de formation des nuages, citons encore la rencontre de deux courants d'air, l'un froid, l'autre chaud et humide.

489. Brouillards. — Les nuages qui se forment *au voisinage du sol* par le refroidissement de l'air et la condensation de la vapeur d'eau prennent le nom de brouillards. Au sein d'un nuage sur le flanc d'une montagne, et au milieu d'un brouillard en plaine, on éprouve en effet la même impression. Les brouillards formés le long des rivières ou sur le sol des prairies, sont dissipés le matin par les rayons du soleil qui élèvent la température de l'air et augmentent ainsi son pouvoir dissolvant pour la vapeur d'eau.

490. Pluie. — La pluie résulte de la *chute des nuages*. Les gouttelettes se réunissent et forment des gouttes. Ces gouttes diminuent de volume si elles traversent des couches d'air sèches; en traversant des couches humides moins froides qu'elles, elles condensent de la

vapeur à leur surface, grossissent, ne peuvent plus rester suspendues et atteignent le sol.

La quantité de pluie tombée en un lieu déterminé se mesure dans un *pluviomètre* ; c'est un entonnoir circulaire E placé horizontalement

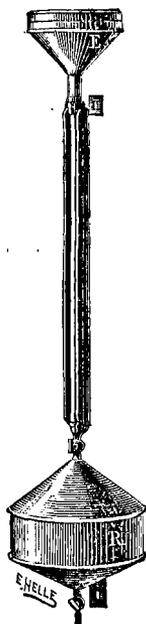
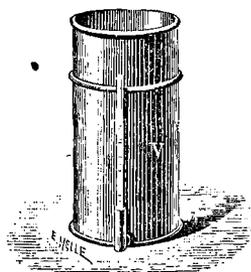


Fig. 324.



à découvert au-dessus du sol ; l'eau reçue par cet entonnoir passe dans un récipient R qui la préserve de l'évaporation. On fait écouler à un moment donné cette eau dans un vase cylindrique V de section connue, muni latéralement d'un tube de verre divisé qui sert d'indicateur de niveau. La hauteur de

la colonne d'eau tombée dans un certain espace de temps s'obtient en *divisant le volume recueilli par la section de l'entonnoir* (fig. 324).

On constate de cette manière que si l'eau tombée ne s'infiltrait pas dans le sol et n'éprouvait pas de perte par évaporation, elle formerait à Paris *en une année* une couche de 60 centimètres de hauteur ; vers l'équateur la hauteur d'eau tombée dépasse 3 mètres.

C'est le mouvement de l'air qui détermine la pluie en transportant à distance des couches d'air chargées de vapeur d'eau ; ainsi les vents d'ouest en France, chargés d'humidité par leur passage sur l'océan, amènent fréquemment la pluie. Si ce transport n'avait pas lieu, un air immobile se saturerait d'humidité au-dessus des nappes d'eau et il y pleuvrait à chaque refroidissement ; l'air resterait sec au-dessus de la terre ferme et il n'y pleuvrait jamais.

Neige. — C'est de l'eau *solidifiée en cristaux* ramifiés et enchevêtrés : ces cristaux proviennent de la congélation de la vapeur des nuages, quand leur température s'abaisse au-dessous de zéro. En tombant, la neige se liquéfie souvent dans des couches d'air inférieures plus chaudes et nous arrive à l'état de pluie.

Givre. — Le givre est dû à la *congélation de l'eau d'un brouillard* épais : cette glace reste suspendue en hiver aux branches des arbres.

Verglas. — Le verglas résulte de la *congélation de la pluie sur le sol* et forme une couche de glace unie et transparente.

Grêle. — Ce sont des *grains de glace compacts*, en couches concentriques, qui tombent aux heures les plus chaudes de la journée au printemps et en été, surtout au début des orages.

TIRAGE DES CHEMINÉES

491. Explication du tirage. — Le tirage des cheminées s'explique en remarquant que l'air chauffé par le feu doit monter en raison de sa diminution de densité (228). En s'élevant dans la cheminée, il détermine un appel d'air froid qui entretient la combustion. Imaginons deux tuyaux verticaux AB et A'B' communiquant entre eux à la partie inférieure, supposons celui de gauche maintenu à la température ambiante et celui de droite porté à une température élevée. Une tranche mn du tube de communication éprouve des pressions inégales sur ses deux faces (fig. 325).

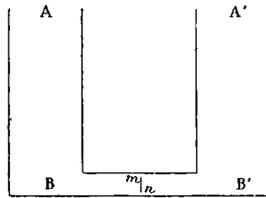


Fig. 325.

De B vers B' la pression est égale à la pression atmosphérique P qui s'exerce au niveau AA', accrue de la pression de la colonne froide AB de hauteur h . De B' vers B, la pression est égale à la pression P accrue de la pression de la colonne d'air chaud A'B' de hauteur h dont la densité d' est moindre que la densité d de l'air froid AB. La différence des pressions sur les deux faces de l'unité de surface de mn sera $h(d - d')$.

La pression sera plus forte de B vers B', et il y aura mouvement dans le sens BB' : de là un courant descendant en AB et un courant ascendant en B'A'. Ce courant est continu lorsque l'air froid venant de AB s'échauffe avant de passer dans le tuyau B'A'. Cette condition est réalisée en

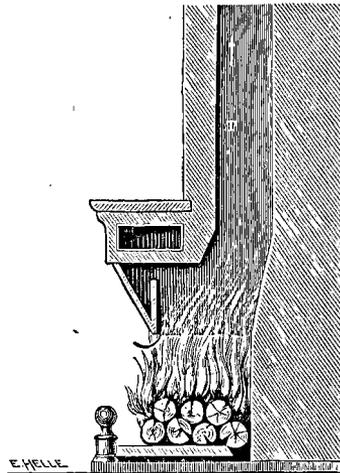


Fig. 326.

plaçant en B' un foyer que l'air traverse. B'A' est alors une *cheminée*.

Dans le cas d'une cheminée ordinaire, le tuyau AB est supprimé : toutefois, l'air extérieur et l'air de la cheminée se comportent comme s'ils étaient placés dans deux tuyaux en communication. Les pressions sur une section verticale située à l'entrée du tuyau T sont les mêmes que sur la tranche *mn* du canal de communication des deux tuyaux précédemment figurés. Il y a appel d'air par la partie inférieure de la cheminée ou *tirage* (fig. 326).

Conditions qui accroissent le tirage. — Le tirage sera d'autant plus énergique que la hauteur de la cheminée sera plus grande et que l'air de la cheminée sera plus chaud.

On augmente la hauteur de la cheminée en prolongeant le conduit de fumée par un tuyau en tôle. Pour élever la température dans le tuyau de fumée, on diminue la ventilation en réduisant la section d'entrée du foyer ou en abaissant le registre de la cheminée.

La direction de la cheminée doit être voisine de la verticale, parce que les frottements sont moindres pour une même hauteur que dans un tuyau oblique.

Le courant ascendant de la cheminée amène sur le combustible une grande quantité d'air qui active le feu et entraîne au dehors les produits de la combustion ; en outre, il assure par appel d'air la ventilation de l'enceinte que chauffe la cheminée.

Causes de tirage insuffisant. — Plusieurs causes peuvent rendre le tirage insuffisant : 1° Une *hauteur trop petite* de la cheminée ; 2° Une *trop grande largeur* qui permet des courants descendants d'air froid en même temps que des courants ascendants d'air chaud ; 3° Une température des gaz de la combustion peu supérieure à celle de l'air ambiant, comme cela peut avoir lieu dans des *poêles à combustion lente* ; 4° Une *rentrée insuffisante de l'air* extérieur par les joints trop bien ajustés des portes et des fenêtres, ce qui produit dans la chambre une raréfaction de l'air et diminue la pression en *mn* dans le sens BB' ; 5° la présence dans une chambre voisine d'une *cheminée d'un tirage plus actif*, qui produit une aspiration jusque dans la chambre à laquelle appartient la cheminée BB' ; 6° Le refoulement de l'air chaud de la colonne BB' par un *vent violent* qui s'oppose à sa sortie.

Les cheminées ne chauffent que par la chaleur qu'elles rayonnent ; et celle-ci n'est qu'une fraction très petite de la chaleur de combustion. Les poêles, au contraire, utilisent la plus grande partie de la chaleur produite, mais si le tirage est trop réduit, comme dans les

poêles à combustion lente, la ventilation est insuffisante et, en outre, les gaz de la combustion peuvent se répandre dans l'appartement.

492. Chauffage par circulation d'eau chaude. — Les mêmes principes sont appliqués dans le chauffage par circulation d'eau chaude.

Un calorifère à circulation d'eau chaude comprend : 1° Une *chaudière tubulaire C* placée dans la cave de l'édifice et dans laquelle on chauffe l'eau ; 2° Des *surfaces chauffantes S* où l'eau circule et émet de la chaleur en se refroidissant ; 3° Des *tuyaux de distribution t* qui conduisent l'eau de la chaudière aux surfaces chauffantes et la ramènent à la chaudière ; 4° Un réservoir ou *vase d'expansion V* situé dans les combles et où se loge le produit de la dilatation du système. Ce réservoir évite la rupture de la canalisation par la dilatation de l'eau. (fig. 327).

La vitesse de circulation *croît avec la différence de densité* des colonnes liquides ascendante et descendante.

La chaudière et le réservoir communiquent par deux tuyaux. L'un des tuyaux *t'* se dirige verticalement et directement du haut de la chaudière au réservoir, l'autre *t* va du réservoir au fond de la chaudière en parcourant les enceintes à chauffer. Tout le système est plein d'eau.

L'eau chaude de la chaudière monte directement au réservoir, elle revient par les tuyaux descendants, et dans ce parcours se refroidit graduellement par rayonnement et par contact de l'air.

Si le *vase d'expansion est ouvert*, l'eau ne peut abandonner que peu de chaleur car sa température est limitée à 100°, et on ne peut guère abaisser au-dessous de 60° la température des surfaces chauffantes. Il est donc alors nécessaire de faire circuler une grande masse d'eau. Dans ce cas les colonnes ascendante et descendante n'offrent qu'une faible différence de température, ce qui diminue la différence de densité et par suite la vitesse de circulation.

Lorsque le *vase d'expansion est fermé*, il est possible de porter au-dessus de 100° la température de l'eau qui peut alors abandonner

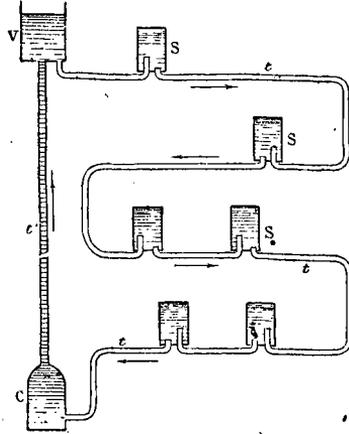


Fig. 327.

plus de chaleur; les dimensions des surfaces chauffantes et des tuyaux de distribution peuvent dans ce cas être réduites.

ÉQUIVALENT MÉCANIQUE DE LA CALORIE

493. Relation entre la chaleur et l'énergie mécanique. —

La chaleur n'est pas de la matière, elle résulte d'un état particulier de la matière; elle se présente comme une *forme de l'énergie* susceptible d'être convertie dans certaines conditions en diverses variétés d'énergie (54). Nous allons étudier la transformation de l'énergie mécanique en chaleur et la transformation inverse.

TRANSFORMATION DU TRAVAIL MÉCANIQUE EN CHALEUR

494. Le choc, le martelage, le forage, le limage des métaux, en un mot toutes les actions mécaniques déterminent une production de chaleur.

Percussion. — Le fer forgé sur une enclume s'échauffe. De même le choc d'un marteau sur un morceau de plomb posé sur une enclume produit assez de chaleur pour qu'une pile thermo-électrique (458) appliquée sur le plomb accuse une notable élévation de température. Une balle de plomb lancée par une arme à feu contre un mur résistant peut s'échauffer au point d'entrer en fusion.

Frottement. — Le frottement est un des moyens les plus simples de produire de la chaleur. On connaît l'échauffement d'un bouton de cuivre vivement frotté sur une table. On peut carboniser le bois et même l'enflammer en frottant deux morceaux de bois l'un contre l'autre. C'est en frottant le phosphore d'une allumette qu'on élève sa température au point de l'enflammer. Deux morceaux de glace frottés l'un contre l'autre dans une enceinte à 0° entrent en fusion.

Soit un tube de laiton T à moitié rempli d'un mélange d'alcool et d'éther et fermé par un bouchon (fig. 328). On le fait tourner rapidement à l'aide d'une manivelle fixée sur une grande roue à gorge qui

transmet par une corde son mouvement à une petite poulie qui est montée sur l'axe du tube. En serrant le tube, pendant sa rotation, entre deux plaques de bois réunies par une charnière M, on détermine

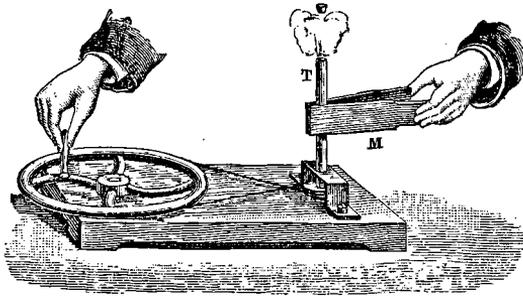


Fig. 328.

un frottement rude qui produit une vive élévation de température, le liquide s'échauffe au point de se vaporiser et de projeter le bouchon.

Compression. — Dans un cylindre de verre à parois épaisses et plein d'air, on pousse brusquement un piston qui le ferme hermétiquement : l'air s'échauffe au point d'enflammer un morceau d'amadou placé à la partie inférieure du cylindre (*briquet à air*, fig. 36).

TRANSFORMATION DE LA CHALEUR EN TRAVAIL MÉCANIQUE

495. Dans une machine à vapeur, la vapeur se refroidit en poussant le piston. Cette dépense de chaleur est la source du travail d'une machine à vapeur.

Un gaz comprimé, en s'échappant du vase qui le renferme, subit un refroidissement très marqué (389). La cause de ce refroidissement est le travail mécanique qu'il effectue, aux dépens de la chaleur qu'il possède, en refoulant l'air extérieur.

Le refroidissement d'un gaz par sa détente a été utilisé dans la liquéfaction des gaz (405).

PRINCIPE DE L'ÉQUIVALENCE

496. Dans les opérations où de la chaleur est dépensée pour produire un travail (*machine à vapeur*), et dans celles où du travail est annulé avec apparition de chaleur (*choc, frottement*), un même nombre de calories Q correspond toujours à un même travail T , quel que soit le mécanisme de la transformation. C'est dans la *proportionnalité* entre la chaleur disparue et le travail effectué, ou entre le travail dépensé et la chaleur dégagée que consiste le *principe de l'équivalence*.

Équivalent mécanique de la calorie. — Une Calorie (Calorie du kilogramme d'eau) et 425 kilogrammètres se remplacent dans une transformation; 425 est l'*équivalent mécanique de la Calorie*. 0^{kgmètre} 425 est l'équivalent mécanique de la calorie du gramme. En ergs, l'équivalent mécanique de la calorie du gramme ou de l'unité de chaleur est égal à $4,17 \cdot 10^7$ (43); en joules, c'est 4,17. On l'appelle par abréviation : *Équivalent mécanique de la chaleur*.

L'équivalent calorifique du kilogrammètre est $\frac{1}{425}$ (en Calories du kilogramme), l'équivalent calorifique de l'erg est $\frac{1}{4,17 \cdot 10^7}$ (en calories du gramme).

Deux méthodes peuvent être suivies : 1° chercher combien de calories on produit avec un travail connu; 2° déterminer combien de travail on retire d'une quantité de chaleur donnée.

**DÉTERMINATION DE L'ÉQUIVALENT MÉCANIQUE
DE LA CALORIE**

497. Expérience de Joule. — C'est une application de la première méthode : *transformation en chaleur*, par l'intermédiaire d'un frottement, *du travail effectué par la chute d'un poids*.

Appareil. — Dans un calorimètre C rempli d'eau tourne un axe vertical I muni de palettes de laiton G , mobiles dans les espaces laissés libres par des cloisons verticales échancrées H (fig. 329 et 330). $C - 40^{\circ} = 1^{\circ} = 4,17 \times 10^{10} \text{ ergs} = 4,17 \times 10^3 \text{ cal}$
 $C - 40^{\circ} = 1^{\circ} = 4,17 \times 10^3 \text{ cal}$

La partie supérieure *c* de l'axe de rotation se continue par une pièce de bois *b*, sur le prolongement de laquelle un treuil *T* est fixé avec une goupille *a*. Sur ce treuil s'enroulent en sens contraires deux

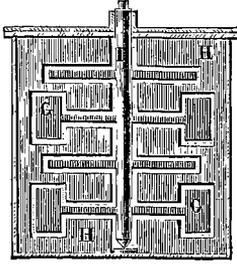


Fig. 329.

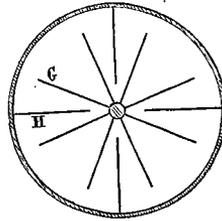


Fig. 330.

cordons dont les extrémités sont assujetties sur les circonférences de deux poulies *A*. Sur les axes *e* de ces poulies s'enroulent deux autres cordons portant deux masses de plomb *P* de même poids (fig. 331).

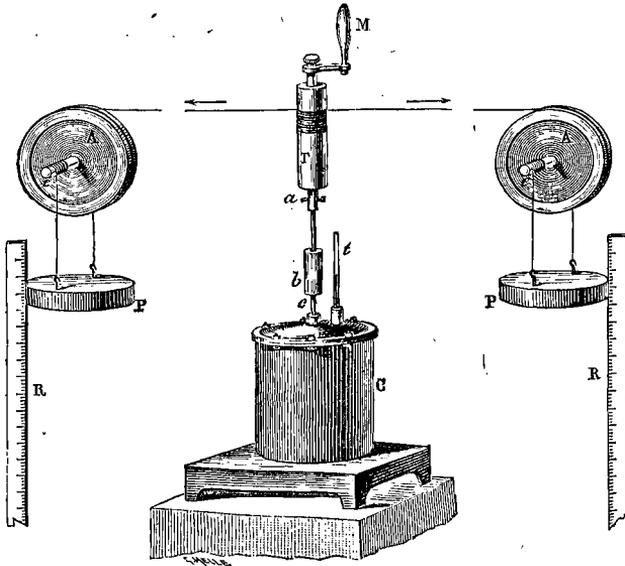


Fig. 331.

La chute de ces masses le long de deux règles divisées *R* entraîne la rotation des poulies et en même temps du treuil, et de l'axe qui porte les palettes. Quand les deux poids ont atteint le sol, on interrompt

pour un instant, en enlevant la goupille *a*, la liaison du treuil et de l'axe à palettes et, à l'aide de la manivelle M, on remonte les poids sans mettre en mouvement les palettes. Pour obtenir un dégagement de chaleur mesurable avec précision, la chute des poids est répétée une vingtaine de fois. Un thermomètre très sensible *t*, plongé dans le calorimètre, fait connaître l'élévation de température.

Principe de la méthode. — Pendant la rotation de l'axe, le mouvement de chute des poids tend à s'accélérer, mais la résistance opposée par le frottement des palettes croît avec leur vitesse et arrive rapidement à absorber à chaque instant tout le travail des poids. A partir de ce moment, la vitesse de chute reste uniforme (53) et la force vive du système entraîné ne varie plus. Le travail moteur produit par la chute des poids est dès lors égal au travail résistant, ou au travail de frottement des palettes contre le liquide, et celui-ci est intégralement converti en chaleur.

Désignons par T la fraction du travail (en kilogrammètres) des poids qui est dépensée pour vaincre la résistance du frottement dans le calorimètre, par Q le gain de chaleur du calorimètre (en Calories), on trouve, en désignant par E l'équivalent mécanique en kilogrammètres :

$$E = \frac{T}{Q} = 425.$$

Calcul du travail employé à vaincre le frottement. — Pour une chute de hauteur H, le travail total des poids est $2MgH$ (2M en grammes, H en centimètres, travail en ergs); ce travail est employé à communiquer une force vive aux poids et au reste du système, à entretenir un frottement dans le calorimètre et des frottements accessoires (dans le mouvement du treuil, des poulies, des cordons, etc.).

Force vive des poids. — La force vive qui a été communiquée aux poids est annulée au moment de leur choc contre le sol; *v* désignant la vitesse des poids quand ils touchent le sol, cette force vive est $\frac{1}{2} 2Mv^2 = Mv^2$.

La différence $2MgH - Mv^2$ représente le travail de frottement T dans le calorimètre, le travail des frottements accessoires *t* et la force vive *w* du système (sauf les palettes et les poids). La force vive des palettes s'annule par le choc contre l'eau dans le calorimètre au moment de l'arrêt et est comprise dans le terme T, la force vive du reste du système se perd dans les supports au moment de l'arrêt.

$$2MgH - Mv^2 = T + t + w. \quad (1)$$

Calcul des travaux accessoires. — Pour évaluer *t + w*, Joule détachait la goupille *a*, abaissait l'axe à palettes et attachait les cordons au treuil de façon

que l'un des poids en descendant fit monter l'autre; les poids se faisaient alors équilibre comme dans la machine d'Atwood. Dans ces conditions, on déterminait par tâtonnement quelle masse m il fallait ajouter à l'un des poids pour que le système se mit en mouvement et eût la vitesse v au moment du choc contre le sol.

Dans cette expérience auxiliaire, le poids m était le poids moteur, il effectuait un travail mgH qui était employé à vaincre les résistances accessoires et à communiquer aux masses $2M + m$ une vitesse qui s'annulait par le choc et qui équivalait à un travail $\frac{2M + m}{2} v^2$; le reste du système était entraîné avec la même vitesse v .

$$\text{On avait } mgH - \frac{2M + m}{2} v^2 = t + w \quad (2)$$

$$\text{En combinant (1) et (2) } (2M - m) gH + \frac{m}{2} v^2 = T. \quad (1)$$

S'il y a 20 chutes, on multipliera T par 20.

Calcul de la chaleur gagnée par le calorimètre. — Appelons K la capacité calorifique du calorimètre et de tout ce qui s'échauffe, soient t et θ les températures initiale et finale; $K(\theta - t)$ est le gain de chaleur du calorimètre. On aura la *chaleur totale due au frottement* en y ajoutant la perte de chaleur par refroidissement pendant l'expérience.

Correction du refroidissement. — L'expérience a duré environ 30 minutes (20 chutes). Un aide a noté la température du calorimètre au commencement et à la fin de chaque minute. On calcule pour chaque minute les excès moyens de la température du calorimètre sur le milieu ambiant, $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$. La somme des abaisséments de température correspondants du calorimètre sera, d'après la loi du refroidissement de Newton (467)

$$A\tau_1 + A\tau_2 + \dots + A\tau_n = A\Sigma\tau.$$

Afin de connaître A , on effectue une expérience auxiliaire en portant le calorimètre et son contenu à une température un peu différente de celle de l'expérience principale, et, sans produire le mouvement des palettes, on observe l'abaissement de température ϵ' pour une durée de 5 minutes et un excès moyen τ' du calorimètre sur le milieu ambiant; l'équation $\frac{\epsilon'}{5} = A\tau'$ permettra de calculer A .

$$Q = K[\theta - t + A\Sigma\tau].$$

Résultat.

$$\frac{20T}{Q} = \frac{20 \left[(2M - m) gH + \frac{m}{2} v^2 \right]}{K[\theta - t + A\Sigma\tau]}$$

$$\text{L'expérience a donné } \frac{20T}{Q} = 41\,700\,000 = 4,17 \cdot 10^7$$

(1) Mg et mg désignent les poids moteurs corrigés de la poussée de l'air.

La quantité de chaleur n'était connue qu'à $\frac{1}{100}$ près, donc aussi l'équivalent mécanique de la calorie.

Dans les calculs qui précèdent, T est évalué en ergs et Q en calories, 4,17.10⁷ est l'équivalent mécanique de la calorie en ergs, c'est 4,17 en joules.

Comme un joule vaut à Paris $\frac{1}{9,81}$ kilogrammètres (44), l'équivalent mécanique de la calorie (calorie du gramme) sera $\frac{4,17}{9,81}$ kgmètres, et l'équivalent mécanique de la Calorie (Calorie du kilogramme) :

$$\frac{4,17.1000}{9,81} = 425.)$$

498. Expérience de Hirn. — C'est une application de la deuxième méthode : *transformation de chaleur en travail*.

Principe de la méthode. — Dans une machine à vapeur, *la production de travail mécanique est accompagnée de la disparition d'une certaine quantité de chaleur*.

Dans une machine à vapeur arrivée à son fonctionnement régulier, une fraction de la chaleur (523) empruntée par la vapeur à la chaudière gagne avec la vapeur le condenseur ou l'atmosphère, une autre partie est convertie en travail et disparaît comme chaleur, car *la vapeur se refroidit en poussant le piston*. Hirn a fait voir que la quantité de chaleur qui disparaît dans le travail est proportionnelle au travail effectué.

Il fit ses déterminations sur une machine industrielle d'une puissance de 200 chevaux-vapeur. Il mesurait :

- 1° Le nombre Q de calories que possédait la masse de vapeur entrant dans le corps de pompe à chaque coup de piston, et le nombre de calories Q' que possédait cette vapeur à la sortie du corps de pompe ;
- 2° le travail T effectué par cette vapeur en déplaçant le piston.

On a toujours $Q > Q'$, ce qui prouve bien que la vapeur s'est refroidie et a perdu $Q - Q'$ pendant son travail.

La perte $Q - Q'$ est d'autant plus grande que le travail produit T est plus considérable et il y a proportionnalité.

$$\frac{T}{Q - Q'} = E.$$

(**Calcul de $Q - Q'$.** — A sa période d'activité normale, la machine reprend périodiquement le même état dans toutes ses parties : la masse de vapeur M qui entre dans le corps de pompe à chaque période (aller et retour du piston)

est égale à la masse qui en sort et égale à la masse d'eau M que la chaudière reçoit à chaque période par la pompe d'alimentation. Cette eau puisée dans le condenseur à une température t^0 et transformée dans la chaudière en vapeur saturante à T^0 , reçoit une quantité de chaleur Q représentée par $M(T - t + L_v)$; L_v chaleur de vaporisation de l'unité de masse du liquide à T^0 .

La chaleur Q' rendue au condenseur à chaque période se connaît par la masse N d'eau froide à t^0 qu'il faut faire entrer à chaque période dans le condenseur pour y maintenir la température t ; $Q' = N(t - t^0)$.

La différence $Q - Q'$ a disparu pendant le travail de la vapeur sur le piston.

Calcul du travail T . — Hirn faisait inscrire les valeurs de la pression p de la vapeur aux positions successives du piston, S étant la surface du piston, p la pression de la vapeur par unité de surface, $Sp\delta$ est le travail effectué par la vapeur pour un petit déplacement δ du piston. Le travail total de la vapeur pour une période (aller et retour) est la somme des travaux élémentaires correspondant aux positions successives du piston (47)

$$Sp\delta + Sp'\delta' + \dots = S\Sigma p\delta.)$$

499. Invariabilité de l'équivalent mécanique de la calorie.

— La proportionnalité entre la chaleur et le travail a été vérifiée dans un certain nombre de cas très divers : le coefficient de proportionnalité $4,17 \cdot 10^7$ ne varie pas. C'est là un *fait expérimental indépendant de toute hypothèse sur la nature de la chaleur*. Le principe d'équivalence a été étendu à toutes les transformations. Sa généralisation a conduit au principe de la conservation de l'énergie, principe aussi général que celui de la *conservation de la masse* ⁽¹⁾.

500. Hypothèse sur la nature de la chaleur. — Si l'on rattache les phénomènes calorifiques à des mouvements moléculaires, la conversion du travail en chaleur apparaît comme une transformation de mouvement.

On *admet* que les particules d'un corps, séparées par des intervalles intermoléculaires (71), ne sont jamais en repos, mais qu'elles exécutent des excursions très rapides autour de leur position d'équilibre. *L'amplitude de ces excursions croît avec le degré d'échauffement ou avec la température du corps*. Ces mouvements moléculaires nous échappent à cause de leur extrême petitesse, mais, en venant se communiquer aux terminaisons nerveuses de la peau ou à un thermomètre, ils produisent une sensation de chaleur ou une élévation de

(1) Le principe de la conservation de la masse, appelé aussi principe de la conservation de la matière, a été établi à l'aide de la balance par les expériences chimiques de Lavoisier.

température. On conçoit dès lors comment un travail mécanique est converti en chaleur. Supposons un forgeron laissant tomber son marteau sur une enclume, le mouvement du marteau est brusquement interrompu, mais sa force vive n'est pas anéantie, elle se distribue aux particules du fer forgé et de l'enclume dont elle accroît les excursions et élève la température. La chaleur dégagée augmente avec la masse du marteau et sa hauteur de chute, c'est-à-dire avec sa force vive. De même, dans le choc d'un projectile contre un obstacle, un *mouvement d'ensemble fait encore place à un mouvement moléculaire.*

ANALYSE DES EFFETS DE LA CHALEUR SUR UN CORPS

501. La chaleur communiquée à un corps produit divers effets :
1° Des effets intérieurs. — Une portion de la chaleur est employée à accroître les intervalles qui séparent les molécules, en surmontant des *forces de cohésion* qui sont parfois considérables (travail de dilatation, travail de fusion, travail de vaporisation) ; une autre partie augmente les excursions des molécules en élevant la température ;
2° Des effets extérieurs, par suite de la dilatation du corps. L'effort exercé par la pression atmosphérique sur la surface est déplacé et un travail externe est ainsi effectué. Ce déplacement, faible dans le cas des solides et des liquides qui se dilatent peu, est considérable avec les gaz et les vapeurs.

Dans les gaz voisins de l'état parfait, tels que l'hydrogène, l'oxygène, l'azote, l'air, conformément à des expériences de Gay-Lussac développées plus tard par Joule, les attractions moléculaires sont insensibles et il n'y a pas d'effort appréciable à exercer pour accroître la distance des molécules. L'effet intérieur produit par une certaine quantité de chaleur se réduit à l'accroissement de force vive des mouvements moléculaires qui accompagne l'élévation de température.

Pour échauffer de 1° l'unité de masse d'un gaz placé dans une enceinte fermée, et par conséquent sans travail externe, la quantité de chaleur nécessaire (chaleur spécifique sous volume constant) *ne dépend pas* de l'écartement des molécules ou *du volume* du gaz.

Pour échauffer le même gaz de 1° en le laissant cette fois se dilater librement (chaleur spécifique sous pression constante), outre la chaleur employée à élever la température, il y a dépense de chaleur pour le travail accompli en repoussant l'atmosphère.

502. Calcul de Mayer. — R. Mayer s'est appuyé sur ce résultat ⁽¹⁾ pour calculer l'équivalent mécanique de la Calorie, d'après la différence entre les chaleurs spécifiques de l'air à pression constante et à volume constant. — 1° Calcul du travail externe de dilatation d'un gaz. — Supposons qu'un mètre cube d'air à 0° et à 76 occupe un vase cylindrique de un mètre carré de section, dans lequel se meut un piston exerçant sur la face supérieure du gaz une pression égale à la pression atmosphérique, 10330 kilogrammes (1 kg. 033 par centimètre carré). La distance du piston au fond du cylindre est 1 mètre. Si l'on chauffe ce mètre cube d'air de 0° à 1° en le laissant se dilater sous la pression atmosphérique, son volume devient $1 + 0,00367$. Admettons que la section du cylindre reste égale à 1 mètre carré, le piston monte de 0^m00367 et le travail mécanique extérieur effectué par le gaz qui se dilate en refoulant la pression atmosphérique est égal à $10330 \cdot 0,00367 = 37^{\text{kgmètres}} 91$.

2° Chaleur dépensée pour effectuer le travail externe de dilatation. — La chaleur donnée à un kilogramme d'air pour l'échauffer de 1° en le laissant se dilater sous la pression constante de l'atmosphère est 0,237 (434); pour échauffer un mètre cube d'air qui pèse 1^{kg}293, il faudra $1,293 \cdot 0,237$ Calories.

La chaleur qui est donnée à cette même masse de gaz pour l'échauffer de 1° à volume constant et par conséquent *sans travail externe* est plus petite, on la trouve égale à $1,293 \cdot 0,168$ (0,168 est la chaleur spécifique du kilogramme d'air sous volume constant). Cette chaleur ne sert qu'à accroître la force vive moléculaire sans travail de séparation des molécules (501), elle est tout entière employée à élever la température du gaz. La même quantité de chaleur étant nécessaire pour accroître la force vive moléculaire du gaz quand on l'échauffe de 1° sous pression constante, la différence $1,293 (0,237 - 0,168) = 1,293 \cdot 0,069 = 0,089$ représente la chaleur dépensée pour refouler la pression atmosphérique et effectuer le travail de $37^{\text{kgmètres}} 91$.

Connaissant le travail effectué T en kilogrammètres et la chaleur correspondant Q (en Calories), le quotient $\frac{T}{Q} = \frac{37,91}{0,089}$ est en kilogrammètres l'équivalent mécanique de la Calorie.

(1) Mayer avait conclu ce résultat des expériences de Gay-Lussac.

Calcul en ergs. — Nous supposons 1 centimètre cube de gaz, enfermé dans un cylindre de 1 centimètre carré de section, 1033 . 981 sera en dynes la pression atmosphérique sur la face supérieure du gaz, 0,00367 sera l'élevation du piston en centimètres; 1,033 . 981 . 0,00367 est le travail externe du gaz en ergs. D'autre part 0,001293 étant la masse en grammes d'un centimètre cube d'air, 0,001293 (0,237—0,168) représente en calories la chaleur employée à effectuer ce travail externe.

L'équivalent mécanique sera le quotient :

$$\frac{1033 . 981 . 0,00367}{0,001293 . 0,069}$$

PRINCIPE DE LA CONSERVATION DE L'ÉNERGIE

503. Nous avons précédemment appelé **énergie** d'un système sa **capacité de travail** (54); on distingue deux formes d'énergie, l'énergie de mouvement ou **énergie cinétique**, et l'**énergie potentielle** (56). Ces deux formes d'énergie peuvent se transformer l'une dans l'autre (57).

504. **L'énergie d'un système isolé reste constante.** — C'est l'énoncé du *principe de la conservation de l'énergie*. Cette proposition, déduite de l'observation, exprime que, pour un système isolé, c'est-à-dire soustrait à toute influence extérieure, la somme de l'énergie de mouvement et de l'énergie potentielle de l'ensemble des points est invariable. Ce système ne peut offrir que des changements de distribution et des transformations d'énergie; *si une énergie disparaît, il s'en produit une autre équivalente*.

Il résulte de là que si un système revient à son *état initial* avec la même vitesse, son énergie de mouvement et son énergie potentielle ayant repris les mêmes valeurs, il ne peut avoir accompli un travail sans qu'on lui ait fourni une énergie étrangère; c'est l'**impossibilité du mouvement perpétuel** (ou l'impossibilité d'un travail effectué sans dépense correspondante d'énergie). Une machine *ne crée pas d'énergie*, elle ne fait que la transformer.

505. **Énergie calorifique.** — La constance de l'énergie d'un système paraît sujette à des exceptions. Considérons, par exemple, une pierre qui tombe. Par une compensation qui s'établit entre son énergie potentielle et sa force vive (57), son énergie totale est constante tant qu'elle n'a pas touché le sol; mais, au moment du choc, *toute l'énergie paraît anéantie*⁽¹⁾.

(1) S'il s'agissait d'un corps élastique tombant d'une certaine hauteur, son énergie ne serait pas anéantie, le corps rebondirait et la force vive qu'il possédait au moment du choc se transformerait en travail.

En effet, la pierre n'a plus d'énergie potentielle, puisqu'elle ne peut plus tomber ; en outre, sa force vive, qui était maximum, s'est annulée, puisque la pierre est au repos. Mais, en général, à une disparition par le choc ou par le frottement de la force vive d'un corps en mouvement, correspond un développement de chaleur. Nous avons vu que *la chaleur créée est proportionnelle à la force vive disparue* (496) et qu'il s'agit d'une transformation équivalente. Cela nous permet de considérer cette chaleur comme une énergie compensatrice, se substituant à une énergie mécanique. Ainsi la chaleur se présente comme une *forme de l'énergie*, et la création de chaleur par une dépense de travail ou de force vive confirme le principe de la conservation de l'énergie.

Nous exprimerons dès lors plus explicitement le principe de la conservation de l'énergie en disant que, *dans un système isolé, la somme des énergies de mouvement, potentielle et calorifique est constante.*

L'introduction de l'énergie calorifique explique le fonctionnement des moteurs thermiques. Un système qui revient périodiquement à son *état initial* (mêmes positions et mêmes vitesses pour les organes) et accomplit un travail continu, comme une machine à vapeur, ne peut être considéré indépendamment du foyer ; il utilise une énergie calorifique empruntée aux combustions de son foyer, et il y a équivalence entre le travail externe effectué et la chaleur dépensée (498).

Les phénomènes calorifiques nous offrent de nombreux exemples de transformations d'énergie. Les chaleurs de fusion, de vaporisation, de dissolution représentent des quantités de chaleur qui disparaissent par conversion en travail mécanique, en augmentant considérablement l'énergie potentielle du corps auquel elles sont appliquées ; ces quantités de chaleur reparaissent par une transformation d'énergie potentielle en chaleur, quand les molécules reviennent à leurs positions primitives.

L'énergie calorifique est à la fois potentielle et cinétique. — Elle est potentielle par la variation de position des molécules du corps chauffé, et cinétique par l'accroissement de leurs excursions.

506. Le son, la lumière, l'électricité, les phénomènes chimiques correspondent, comme la chaleur, soit à des mouvements, soit à des groupements spéciaux de la matière ; il y a donc des énergies sonore, lumineuse, électrique, chimique ; mais toutes ces énergies peuvent se ramener aux énergies cinétique et potentielle.

507. Énergie chimique. — La combinaison de deux corps dégage le plus souvent de la chaleur ; avant cette combinaison, le système des deux corps possédait de l'énergie potentielle ; par suite du déplacement et du choc des molécules, cette énergie potentielle se transforme, au moment de la combinaison, en énergie calorifique. La combustion du charbon ou sa combinaison avec l'oxygène est un exemple de cette transformation.

508. Énergie électrique. — L'énergie électrique est spécialement une *énergie intermédiaire*. Diverses énergies sont converties par les sources

d'électricité en énergie électrique : l'énergie chimique par les piles, l'énergie mécanique par les machines électrostatiques et électromagnétiques, etc. L'énergie électrique se transforme à son tour par l'*intermédiaire du courant* en diverses formes d'énergie (calorifique, chimique, mécanique).

509. Comme l'étude des phénomènes physiques, l'analyse des phénomènes vitaux offre des applications constantes du principe de la conservation de l'énergie. L'homme et les animaux sont des transformateurs d'énergie, ils convertissent en énergie calorifique et en travail mécanique l'énergie chimique que les aliments dégagent dans leurs tissus.

510. Énergie solaire. — L'énergie solaire est la source de toute énergie à la surface de notre globe.

Les moteurs animés ou inanimés ne sont que des transformateurs de l'énergie solaire. Le végétal vit en effectuant des transformations chimiques avec le secours des radiations solaires. L'animal renouvelle l'énergie qu'il dépense aux dépens de l'énergie du végétal ou de l'animal dont il se nourrit. C'est la chaleur solaire qui réduit en vapeur les eaux des mers et des lacs. Les pluies dues à la condensation de ces vapeurs entretiennent les cours d'eau qui transportent les navires et les chutes d'eau qui mettent en mouvement les roues hydrauliques. C'est encore à l'énergie solaire des siècles passés que nous devons les combustibles qui servent à alimenter nos machines à feu.

511. Mesure de la chaleur solaire. — Une boîte plate en laiton mince est remplie d'eau. On y plonge le réservoir d'un thermomètre. Elle est exposée normalement aux rayons solaires pendant un temps déterminé. La face chauffée a une surface connue et est recouverte de noir de fumée. L'élévation de température de l'eau permet de calculer le nombre de calories reçues par la surface de la boîte et de là par centimètre carré et par seconde. La chaleur totale versée en un an sur la surface du globe est un nombre extrêmement grand de calories⁽¹⁾.

La contraction progressive de la masse solaire pendant son refroidissement peut rendre compte de la façon dont s'entretient la chaleur solaire. Cette contraction est accompagnée d'une diminution d'énergie potentielle et d'un dégagement équivalent de chaleur. Une diminution de son rayon de 30 mètres par an suffit pour maintenir sa température constante. Ce décroissement du rayon n'entraîne en deux siècles qu'une diminution d'une seconde pour le diamètre apparent du soleil.)

(1) La chaleur que notre globe reçoit du Soleil, fraction extrêmement petite de la radiation totale émise par le Soleil, serait capable de fondre en un an une couche de glace de près de 50 mètres d'épaisseur qui envelopperait la Terre de toute part. La Terre est aussi par elle-même une source de chaleur (eaux thermales, volcans), mais beaucoup moins importante.

Applications. — 1° 1^{er} d'air est chauffé de 0° à 100° sous une pression de 76 centimètres. Quel est le travail externe de dilatation? La densité de l'air à 0° et 76 est 0,001293.

2° Du mercure tombe de 5 mètres sur une surface dépourvue de conductibilité. De combien de degrés s'élèvera sa température après sa chute? Chaleur spécifique du mercure 0,033.

3° Une balle de plomb dont la vitesse est de 500 mètres par seconde vient choquer un mur résistant. Quelle sera l'élévation de température?

Chaleur spécifique du plomb solide, 0,0314. Chaleur spécifique du plomb liquide, 0,0402. Point de fusion, 330°. Chaleur de fusion, 5,37.

4° Du mercure tombant d'une hauteur de 1^m275 sur une surface dépourvue de conductibilité s'échauffe de $\frac{1}{10}$ de degré. Déduire de cette expérience l'équivalent mécanique de la calorie.

Quel poids de mercure faudrait-il laisser tomber dans ces conditions pour produire le nombre de calories nécessaires à la transformation d'un gramme d'eau à 15° en vapeur saturante à 100°?

5° En admettant que la chaleur de combustion de 1^{er} d'hydrogène est 34 500 calories, exprimer en joules le travail qui peut être produit par la combustion de 5 grammes d'hydrogène.

6° 1^{er} d'un charbon donne en brûlant 7850 calories : quel est l'équivalent mécanique de cette chaleur en ergs et en kilogrammètres?

7° Si 1^{er} de gaz d'éclairage développe en brûlant 6000 calories, quel travail pourra-t-on produire en utilisant complètement sa chaleur?

8° Une sphère de plomb, non élastique, dont la température initiale est 20°, tombe librement d'une hauteur de 100 mètres sur un plan parfaitement résistant. On suppose toute l'énergie perdue transformée en chaleur absorbée par la sphère et on demande : 1° la température de la sphère aussitôt après le choc; 2° quelle vitesse il faudrait lui imprimer au départ, de haut en bas, pour porter le métal à sa température de fusion?

9° Quel est le travail externe effectué par 1 kilogramme d'eau à 0° qui passe à l'état solide à la même température? Densité de la glace, 0,92. On prendra 1 pour la densité de l'eau à 0°.

10° 1^{er} de glace à 0° exige pour fondre 80 calories. Quel est l'accroissement d'énergie potentielle de l'eau de fusion en négligeant la très petite variation de volume au moment de la fusion?

11° Sachant que l'eau, en passant de l'état liquide à 100° à l'état de vapeur à la même température et à la pression 76, prend un volume 1650 fois plus grand, évaluer le travail externe que la vapeur d'eau effectue en se dilatant et la chaleur correspondante.

12° Quel est l'accroissement d'énergie potentielle de l'eau qui passe de l'état liquide à 100° à l'état de vapeur à la même température et à la pression 76?

13° Un récipient métallique renfermant de l'air comprimé est placé dans un calorimètre. La valeur en eau du calorimètre et de son contenu est 10 700 grammes; on laisse l'air s'échapper brusquement : l'air écoulé occupe 44 litres à la pression 76. On observe au calorimètre un refroidissement de 0°1. En déduire l'équivalent mécanique de la calorie.

MACHINES A VAPEUR

512. Une machine thermique est un **transformateur d'énergie**; c'est un appareil qui convertit régulièrement de la chaleur en travail mécanique. La machine thermique la plus importante est la machine

à vapeur où l'on utilise comme agent de transformation la force de la vapeur d'eau.

Première machine à vapeur. — La première machine à vapeur consistait en un cylindre creux ou **corps de pompe** ouvert par le haut dans lequel se déplaçait un **piston** de même section armé d'une tige. Le cylindre contenait un peu d'eau à sa partie inférieure. On chauffait cette eau pour la réduire en vapeur ; la force élastique de la vapeur formée poussait le piston jusqu'au haut du cylindre. Le feu étant retiré, la vapeur se condensait par le refroidissement et ne gardait qu'une très faible force élastique, ce qui permettait à la pression atmosphérique de faire redescendre le piston. On obtenait un mouvement de va-et-vient du piston, susceptible d'être utilisé, en approchant le feu pour vaporiser l'eau, puis en l'éloignant.

Dans cette machine, la production de la vapeur, son emploi comme moteur dans un corps de pompe, et sa condensation s'effectuaient dans le corps de pompe.

513. Chaudière, corps de pompe et condenseur distincts.

— On évite la perte de chaleur qui résulte du refroidissement des parois du corps de pompe, et on augmente la rapidité du mouvement de va-et-vient par l'emploi d'un *générateur de vapeur* et d'un *condenseur* distincts du corps de pompe.

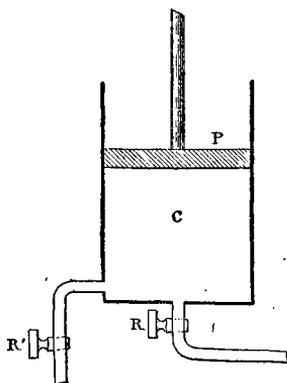


Fig. 332.

Supposons un robinet R établissant la communication du corps de pompe C avec la chaudière et un robinet R' permettant la communication avec le condenseur qui est une enceinte vide d'air, maintenue à une basse température par des injections d'eau froide (fig. 332).

1° R ouvert et R' fermé, la vapeur de la chaudière soulève le piston P ;

2° R fermé et R' ouvert, la vapeur se précipite dans le condenseur et n'a plus, après un temps très court, que la force élastique correspondant à la température basse du condenseur (364) ; la pression atmosphérique refoule le piston.

R ouvert et R' fermé, la vapeur de la chaudière soulève de nouveau le piston P, etc.

La machine à vapeur précédente est une *machine à simple effet*, car la vapeur agit constamment sur la même face du piston et la pression atmosphérique fait descendre le piston.

Dans la **machine à double effet** que nous allons décrire, au cylindre ouvert on a substitué un cylindre fermé aux deux bouts où se meut un piston sur les deux faces duquel la vapeur agit *successivement*.

Nous étudierons la chaudière et ses accessoires, le condenseur et le mécanisme moteur proprement dit.

CHAUDIÈRE A VAPEUR

514. Chaudière à bouilleurs. — Le générateur de vapeur est un long cylindre G en tôle de fer arrondi à ses extrémités. Au-dessous du cylindre principal et communiquant avec lui par de larges tubu-

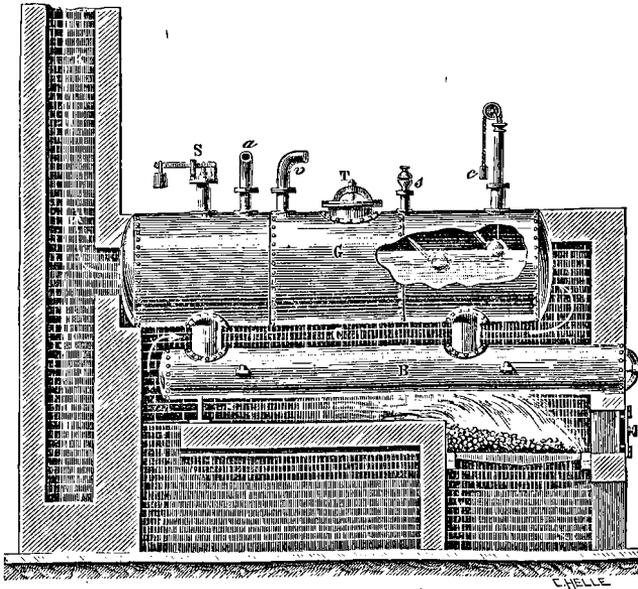


Fig. 333.

e contre-poids du flotteur, *s* sifflet d'alarme, *T* trou d'homme (pour les nettoyages et les réparations), *v* tube qui conduit la vapeur au cylindre, *a* tube qui amène l'eau d'alimentation, *S* soupape de sûreté.

lures, sont disposés côte à côte deux cylindres B de même longueur et de plus petit diamètre appelés *bouilleurs* (fig. 333 et 334). Les bouilleurs sont plongés directement dans le foyer. La vapeur qui s'y

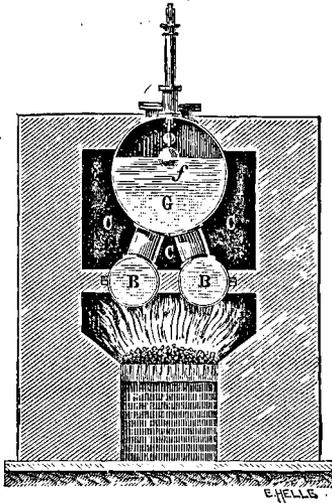


Fig. 334.

forme d'abord vient se condenser dans l'eau du cylindre principal et l'échauffe rapidement. La surface de chauffe s'accroît en augmentant le nombre des bouilleurs. Pour mieux utiliser les produits de la combustion, on les fait circuler dans des conduits de briques C qui entourent les parois de la chaudière avant de les laisser passer à la cheminée K.

Dans la *chaudière tubulaire* des locomotives, la flamme et les gaz chauds de la combustion parcourent de nombreux tubes de cuivre qui partent du foyer et sont entourés par l'eau à vaporiser; après avoir traversé la chaudière dans toute sa longueur, ils débouchent dans la boîte à fumée.

L'eau de la chaudière est ainsi chauffée sur une très grande surface, ce qui permet de produire en peu de temps une grande quantité de vapeur.

515. Accessoires de la chaudière. — Indicateurs du niveau de l'eau. — Il ne faut pas que le niveau de l'eau descende trop bas, car les parois de la chaudière laissées à découvert rougiraient, ce qui pourrait donner lieu à une explosion, par suite d'une production presque instantanée d'une grande quantité de vapeur au moment d'une nouvelle introduction d'eau.

Tube indicateur. — C'est un tube en cristal qui s'ajuste dans deux tubulures partant l'une du bas, l'autre du haut de la chaudière; le niveau est le même dans le tube et dans la chaudière.

Flotteur (fig. 333 et 334). — Un flotteur *f* suspendu à l'extrémité d'une chaîne monte et descend en même temps que le niveau de l'eau. A l'autre extrémité de la chaîne est un contre-poids *c*, la chaîne passe sur une poulie dont l'axe porte une aiguille qui s'incline dans

un sens ou dans l'autre suivant que le niveau est inférieur ou supérieur au niveau normal.

Sifflet d'alarme. — Un flotteur ferme le pied du sifflet tant que le niveau de l'eau n'est pas descendu au-dessous d'une certaine limite. Si le flotteur continue à descendre, la vapeur passe dans le sifflet et le met en vibration,

Indicateurs de la pression. — Un *manomètre* métallique marque la pression de la vapeur.

Soupape de sûreté (fig. 335). — Une soupape semblable à celle de la marmite de Papin s'ouvre quand la pression dépasse la limite qui convient au bon fonctionnement et permet à une partie de la vapeur de s'échapper. C'est un tronc de cône en bronze B fermant une tubulure G de la chaudière. Ce tronc de cône se termine en une pointe *p* maintenue par un levier du deuxième genre mobile autour d'un axe fixe O et chargé à son extrémité libre d'un poids P calculé d'après la surface de la soupape et la pression limite. Dans les locomotives, le poids est remplacé par un ressort.

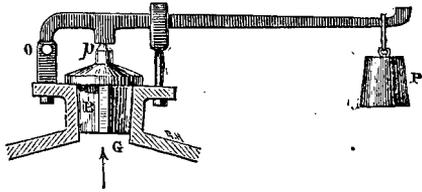


Fig. 335.

Appareils d'alimentation. — L'alimentation de la chaudière se fait avec une pompe que la machine met elle-même en mouvement. On évite la dépense de force qu'exige le fonctionnement de cette pompe par l'emploi de l'*injecteur automateur Giffard*. L'eau d'alimentation est amenée jusqu'au fond de la chaudière. L'injecteur Giffard est également employé dans les locomotives, et aspire l'eau qui est en réserve dans le tender.

CONDENSEUR

516. Le condenseur est un récipient hermétiquement clos où de l'eau froide arrive constamment et maintient une température basse. On sait que si l'on fait communiquer deux enceintes pleines de vapeur à des températures différentes, la vapeur prend dans les deux

la force élastique qui correspond à la température de l'enceinte la plus froide (364). D'après cela, au moment où un corps de pompe rempli de vapeur est mis en communication avec un condenseur, la vapeur s'y précipite et s'y condense, ce qui fait le vide sous l'une des faces du piston et permet à la vapeur qui vient de la chaudière de faire avancer le piston en pressant sur l'autre face.

On utilise une partie de la chaleur dégagée par la condensation de la vapeur en puisant dans le condenseur l'eau d'alimentation de la chaudière.

MÉCANISME MOTEUR

517. Corps de pompe. — Par un tube A, la vapeur se rend du générateur dans un cylindre où se meut un piston tourné au diamètre du cylindre. Le piston est l'*organe actif* de la machine à vapeur. Le corps de pompe est complètement fermé à ses deux extrémités, et la tige du piston traverse le fond supérieur en glissant dans une boîte à étoupes destinée à empêcher les fuites de vapeur.

518. Distribution de la vapeur. — La distribution de la vapeur a lieu d'une *façon automatique*. La vapeur venant de la chaudière par le tube A pénètre librement dans une *chambre de*

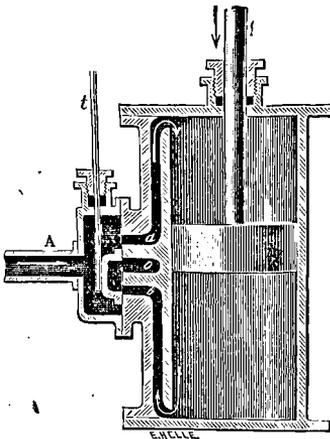


Fig. 336.

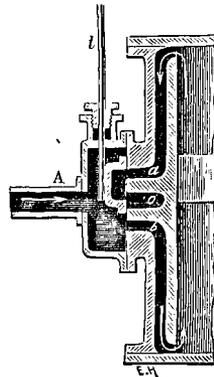


Fig. 337.

distribution fixée sur le côté du corps de pompe. Sur une des faces de cette chambre s'ouvrent trois canaux. Deux, a et b, conduisent aux

extrémités supérieure et inférieure du corps de pompe, un canal moyen *o* mène au condenseur. Le long de cette face glisse d'un mouvement alternatif une capacité semblable à un tiroir de table mis en mouvement par une tige *t* et recouvrant toujours deux ouvertures à la fois (fig. 336).

Fonctionnement du tiroir. — Dans la figure 336, le tiroir est au bas de sa course, la vapeur de la chaudière se rend par le canal supérieur d'admission *a* sur la face supérieure du piston; en même temps, la vapeur située au-dessous du piston est refoulée par le canal inférieur *b* dans la cavité du tiroir et de là, par le canal moyen *o*, passe au condenseur.

Dans la figure 337, le tiroir a dégagé le canal inférieur, *b* reçoit de la chaudière de la vapeur qui fait remonter le piston; au même moment, par le canal supérieur *a* et la cavité *o* du tiroir, l'accès du condenseur est ouvert à la vapeur qui surmonte le piston. Le mouvement alternatif du tiroir est produit par la machine au moyen d'un *excentrique circulaire* fixé sur l'arbre moteur et agissant sur la tige *t*.

519. Organe de transmission. — Transformation du mouvement alternatif du piston en mouvement de rotation continu. —

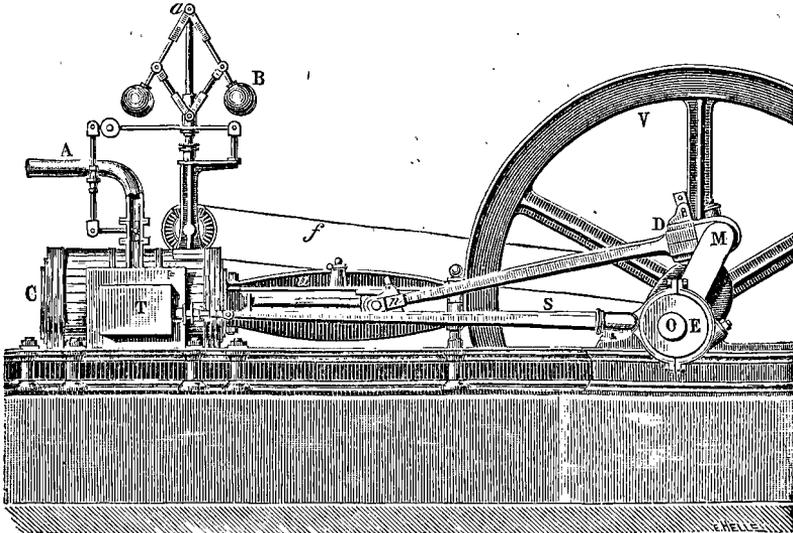


Fig. 338.

O axe de l'arbre de couche, M manivelle, D bielle, *n* articulation de la bielle et de la tige du piston. — C corps de pompe. — E excentrique. — S bielle de l'excentrique, T tiroir. — V volant. — B régulateur à boules. — A tuyau d'admission de la vapeur.

Dans les machines à connexion directe (fig. 338) la tige du piston est articulée à une longue barre résistante *D* appelée *bielle*; la bielle est articulée elle-même à l'extrémité d'une *manivelle* *M*, qui est perpendiculaire à un axe de rotation *O* appelé *arbre de couche* et en détermine le mouvement.

L'articulation de la bielle sur la tige du piston se fait en *n* sur un bloc de fer dans lequel pénètre l'extrémité de la tige : ce bloc repose sur des barres *u*, parallèles à l'axe du cylindre ou *glissières* qui guident son mouvement.

L'arbre fait un tour complet pour une allée et venue du piston. L'arbre porte une roue massive appelée *volant* et une poulie sur laquelle passe une courroie sans fin qui est entraînée par la poulie et transmet le mouvement aux machines-outils.

Balancier. — Dans les machines à basse pression, la liaison du piston à l'arbre de rotation est quelquefois plus complexe. Le piston moteur agit sur un *balancier* *CC'* : c'est un levier mobile autour d'un axe fixe *D*; il transmet

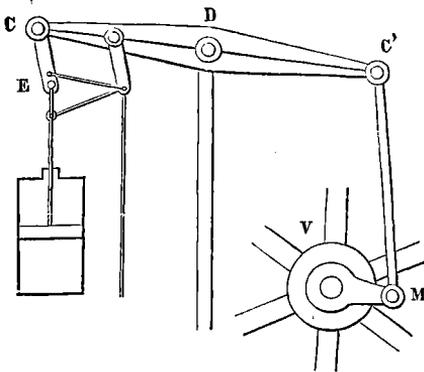


Fig. 339.

le mouvement du piston à l'arbre tournant et aux pompes annexées au condenseur (fig. 339). Comme l'extrémité *C* du balancier décrit un arc de cercle, la tige du piston est reliée au balancier par un système de tringles formant un *parallélogramme* articulé dont le changement de configuration permet à la tige du piston de ne pas s'écarter de la ligne droite. L'autre extrémité *C'* du balancier est articulée par une bielle et une manivelle avec l'arbre qui porte le volant et la poulie.

Le balancier agit sur trois pompes : 1° une pompe qui injecte une pluie d'eau froide dans le condenseur; 2° la pompe d'épuisement qui extrait l'air dissous dégagé de l'eau par suite de la faible pression dans le condenseur et dirige dans un réservoir l'eau du condenseur échauffée par la condensation; 3° la pompe d'alimentation qui refoule dans la chaudière une partie de l'eau puisée dans le réservoir.

Excentrique. — Le mouvement de va-et-vient nécessaire à la distribution de la vapeur est communiqué à la tige du tiroir par un excentrique. C'est un disque circulaire *E* (fig. 340), solidaire de l'arbre moteur, mais dont le centre *O'* ne coïncide pas avec l'axe *O* de l'arbre. Ce disque est entouré par un collier de bronze *G* dans

lequel il peut tourner en glissant et qui fait corps avec une bielle S articulée en J à la tige du tiroir. Le disque E, en tournant autour de l'axe de l'arbre, devrait entraîner le collier, mais celui-ci glisse sur le disque et se trouve simplement porté tantôt un peu en avant, tantôt un peu en arrière ⁽¹⁾.

Le collier passant de G en G', l'extrémité de la tige du tiroir va de

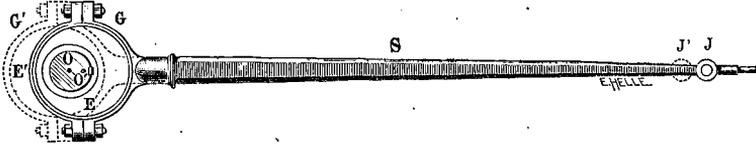


Fig. 340.

J en J'. Le tiroir est ainsi déplacé, soit dans un sens soit dans l'autre, à chaque demi-révolution de l'axe qui correspond soit à une allée, soit à une venue du piston.

Volant. — Le volant est une grande roue en fonte V, à circonférence très lourde, ajustée au milieu de l'arbre de rotation. Par sa masse, il *régularise* le mouvement de la machine pour des variations de courte durée, soit de la force motrice, soit du travail effectué. Par exemple, si, à un certain moment, en raison d'un surcroît passager de travail, le travail résistant devient supérieur au travail moteur, une variation de force vive équivalente à l'accroissement de travail (53) est empruntée aux organes de la machine. Dans ce cas, la force vive et par suite la vitesse des différents points diminue, mais la vitesse varie peu si la diminution de force vive se répartit sur une masse considérable.

En outre, au bout de la course du piston, la bielle et la manivelle sont en ligne droite, il en résulte que la bielle est à ce moment sans action sur la manivelle (*point mort*), mais le volant intervient par sa vitesse acquise pour entraîner les organes pendant quelques instants et dépasser le point mort.

Régulateur à boules (fig. 341). — Le volant serait insuffisant pour régulariser le mouvement si les variations étaient de longue durée. L'admission de la vapeur dans le corps de pompe est réglée automatiquement au moyen d'un régulateur à boules. C'est un sys-

(1) La bielle de l'excentrique prend le même mouvement que si elle était articulée à l'extrémité d'une manivelle ayant pour rayon la distance OO' de l'axe de l'arbre de couche et de l'excentrique.

tème de deux boules pesantes B fixées à deux tiges métalliques M articulées en un point a d'un axe vertical. Cet axe est entraîné par le mouvement de l'arbre de rotation au moyen d'un cordon f et de deux roues d'angle r et r' . Quand l'arbre vient à *tourner plus vite*, et en même temps l'axe du régulateur, les boules *s'écartent* (un corps tournant autour d'un axe s'éloigne en effet d'autant plus de cet axe que la vitesse est plus grande). Le mouvement vertical des boules est transmis par deux tringles n à une bague mobile b qui monte en glissant le long de l'axe du régulateur et entraîne la fermeture partielle d'une valve v placée dans le tuyau A d'admission de la vapeur,

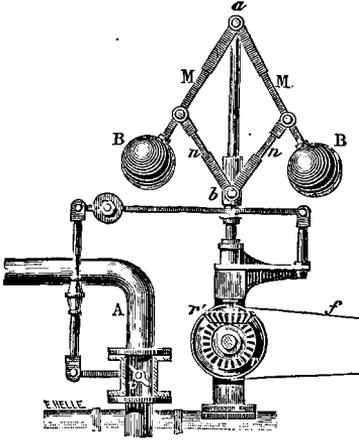


Fig. 341.

ce qui détermine une diminution de la force motrice et un ralentissement.

DÉTENTE

520. Si la communication du corps de pompe avec la chaudière restait établie pendant la course entière du piston, la vapeur introduite dans le corps de pompe posséderait à la fin la même force élastique qu'au début : la force élastique correspondant à la température T . En pénétrant dans le condenseur de température t , la vapeur s'y précipiterait en perdant *immédiatement* toute la différence des forces élastiques de T à t .

La détente a pour objet d'augmenter le travail produit par une quantité déterminée de vapeur en ne laissant ouvert le canal d'admission (inférieur ou supérieur) que *pendant une fraction de la course* du piston. La vapeur du corps de pompe, isolée de la chaudière, continue à pousser le piston en se détendant.

Gain de travail par la détente. — Supposons que la communication de la chaudière avec le corps de pompe soit interceptée quand le piston est au milieu de sa course ascendante ou descendante, le tra-

vail fourni pendant la première moitié de son trajet est $\frac{1}{2} SL(p-p')$, S surface de base du piston, L longueur de la course, $p-p'$ différence des forces élastiques de la vapeur sur les deux faces du piston. Pendant la seconde moitié du trajet, le volume de la vapeur isolée augmente et sa force élastique diminue. Lorsque la vapeur occupe tout le cylindre, sa force élastique a baissé de moitié. Le travail pendant cette seconde moitié de la course a une mesure comprise entre $\frac{1}{2} SL(p-p')$ et $\frac{1}{2} SL\left(\frac{p}{2}-p'\right)$.

Le travail susceptible d'être utilisé à chaque coup de piston est évidemment plus petit que si la vapeur agissait à pleine pression

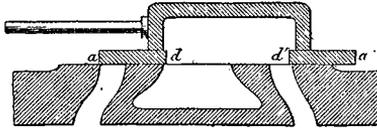


Fig. 342.

pendant la course entière du piston ; mais, pour une même dépense de vapeur (et par conséquent de combustible), on gagne tout le travail effectué pendant la détente. On évite en outre les chocs qui auraient lieu à la fin de la course du piston si sa vitesse ne diminuait pas.

La détente est réglée par le tiroir dont un prolongement en saillie *ad* et *a'd'* (fig. 342), appelé *recouvrement*, intercepte la communication avec la chaudière quand le piston a parcouru une partie de sa course.

DIVERS TYPES DE MACHINES A VAPEUR

521. S étant la section du piston, p la pression de la vapeur par centimètre carré sur l'une des faces du piston, p' la pression sur l'autre face, la force qui déplace le piston est $S(p-p')$.

Les diverses machines diffèrent par la valeur de p' .

1° Machines à **haute pression**, où p dépasse 5 atmosphères : il n'y a pas de condenseur, la vapeur se perd dans l'atmosphère ; $p' = 1$ atmosphère. Les locomobiles et les locomotives fonctionnent sans condenseur.

2° Machines à **basse pression**. Si la face du piston opposée à

celle où agit la vapeur supportait la pression atmosphérique, on n'utiliserait qu'une partie de la force de la vapeur. Avec une pression de 3 atmosphères dans la chaudière, la force qui déplacerait le piston ne serait que de deux atmosphères. Il est donc avantageux de condenser la vapeur à une pression p' inférieure à la pression atmosphérique. L'emploi du condenseur est alors habituel, p' est la force élastique dans le condenseur.

Prenons $S = 2000^{\text{cm}}$ et $p = 3$ atmosphères.

$$pS = 3 \cdot 1033 \cdot 2000 \text{ en grammes.}$$

Si la température du condenseur est de 45° , $p' = \frac{1}{10}$ d'atmosph.

$$p'S = 103,3 \cdot 2000.$$

$$S(p - p') = 2000 [3 \cdot 1033 - 103,3] \text{ en grammes.}$$

$$2000 \cdot 981 [3 \cdot 1033 - 103,3] \text{ en dynes.}$$

Pour un déplacement L du piston à pleine pression, le travail moteur sera $SL(p - p')$; L étant exprimé en centimètres et $S(p - p')$ en dynes, $SL(p - p')$ représente des ergs.

Comme la pression est faible dans les machines à basse pression, on augmente la force de la machine en augmentant la surface du piston. Les dimensions des autres organes croissent en même temps, ce qui rend encombrantes et coûteuses les machines à basse pression. Il faut en outre dans ce cas disposer d'une source d'eau froide pour refroidir le condenseur; enfin il est indispensable d'employer des pompes pour extraire du condenseur l'excès d'eau et les gaz qui se dégagent de l'eau devenue chaude.

PUISSANCE — RENDEMENT

522. Puissance. — On appelle puissance d'une machine le *travail qu'elle peut fournir en une seconde* ou le quotient du travail par le temps pendant lequel il a été effectué. L'unité *industrielle* de puissance est le **cheval-vapeur** : 75 kilogrammes par seconde. L'unité *théorique* de puissance serait la puissance d'un moteur produisant un erg par seconde. Le **watt** ou unité pratique est la puissance d'un moteur produisant un joule ou 10^7 ergs par seconde.

Un kilogrammètre vaut à Paris $9,81 \cdot 10^7$ ergs ou près de 10 joules.
Un cheval-vapeur vaut 736 watts.

523. Rendement. — Dans une machine quelconque la transformation de l'énergie ne s'effectue jamais sans perte; cette perte ne provient pas d'une annulation véritable d'énergie, ce qui ne peut avoir lieu (505), mais elle est due à une apparition d'énergie en divers points sous des formes inutilisables. Une machine à vapeur est un transformateur qui ne convertit en travail qu'une fraction de la chaleur dépensée pour son fonctionnement.

Une partie de l'énergie calorifique développée par le combustible disparaît par rayonnement ou s'échappe dans la cheminée avec les gaz de la combustion; une partie de la chaleur possédée par la vapeur à sa sortie de la chaudière passe dans le condenseur, une partie seulement de la chaleur de la vapeur est convertie en travail et disparaît comme chaleur, enfin une fraction du travail effectué est elle-même absorbée par les mécanismes qui transforment le mouvement alternatif du piston en mouvement de rotation.

Le *rendement industriel* est le rapport entre le travail utile τ mesuré au frein⁽¹⁾ sur l'arbre de couche et le travail EQ équivalent à la chaleur dégagée par la dépense de combustible pendant le même

temps. C'est $\frac{\tau}{EQ}$.

Désignons par Q' la chaleur de la vapeur qui entre dans le corps de pompe, par τ' le travail effectué par cette vapeur sur le piston.

Nous pouvons exprimer le rapport $\frac{\tau}{EQ}$ de la manière suivante :

$$\frac{\tau}{EQ} = \frac{Q'}{Q} \cdot \frac{\tau'}{EQ'} \cdot \frac{\tau}{\tau'}$$

Chacun des rapports du deuxième membre représente un rendement spécial.

$\frac{Q'}{Q}$ est la fraction de la chaleur du foyer communiquée à la vapeur.

$\frac{\tau'}{EQ'}$ est la fraction de la chaleur de la vapeur qui est convertie en travail effectué par le piston.

(1) Un *frein dynamométrique* est un mécanisme ayant pour objet de remplacer par un travail de frottement, aisé à évaluer, le travail absorbé par les outils à conduire.

$\frac{\tau}{Q}$ est la fraction du travail du piston qui est transmise à l'arbre de couche, c'est un rendement mécanique qui dépend de la construction du moteur.

1° Q' est notablement inférieur à Q , la chaudière est chauffée par l'extérieur, il n'y a qu'une partie de la chaleur du combustible qui est cédée à la vapeur, une partie est perdue par suite de la production d'escarbilles, une partie est perdue par rayonnement, une partie s'échappe avec les gaz de la combustion.

2° τ est inférieur à τ' , car le travail effectué par le piston est en partie absorbé par les mécanismes qui transforment le mouvement alternatif du piston en mouvement de rotation continu.

3° $\frac{\tau'}{EQ}$ est nécessairement inférieur à l'unité. En voici la raison.

Quand une machine à vapeur fonctionne régulièrement, une partie de la chaleur Q' possédée par la vapeur à sa sortie de la chaudière passe dans le condenseur ou dans le milieu ambiant, une autre partie se transforme en travail τ' et disparaît comme chaleur. Le travail fourni par une machine à vapeur a pour origine cette conversion de la chaleur en travail mécanique⁽¹⁾.

Il résulte d'un théorème appelé **principe de Carnot** que la valeur *maximum* du coefficient économique $\frac{\tau'}{EQ}$ d'un moteur thermique quelconque est indépendante de l'agent qui pousse le piston (vapeur, gaz ou autre), et ne dépend que des températures de la chaudière et du condenseur; t étant la température de la source chaude (chaudière), t' la température de la source froide (condenseur), cette valeur maximum est égale à $\frac{t-t'}{273+t}$.

Pour la vapeur d'eau, à cause de la rapidité avec laquelle la force élastique croît avec la température et de la limite de résistance des récipients métalliques, t ne peut guère dépasser 200°. Supposons

$$t = 200, \quad t' = 30 \quad \frac{t-t'}{273+t} = \frac{170}{473} = 0,36^{(2)}.$$

Le **rendement industriel** est donc le produit de trois facteurs infé-

(1) C'est le coefficient spécial $\frac{\tau'}{EQ}$ qui a été évalué par Hirn (498) : ses expériences ont montré que la quantité de chaleur qui disparaît est proportionnelle au travail produit.

(2) Dans les moteurs à gaz ou dans les machines à vapeur surchauffée qui fonctionnent entre des limites de température plus éloignées, le rapport $\frac{\tau'}{EQ}$ peut prendre une valeur supérieure.

rieurs à l'unité. Si la machine était parfaite, toute l'énergie du combustible serait emmagasinée par la vapeur, on aurait $\frac{Q'}{Q} = 1$; pendant le déplacement du piston, une partie de cette énergie serait convertie en travail intégralement réalisable, et on aurait $\frac{\tau}{\tau'} = 1$; mais $\frac{\tau'}{EQ'}$ serait toujours inférieur à l'unité, à cause de la chaleur abandonnée au condenseur; le rapport $\frac{\tau}{EQ}$ serait alors égal à $\frac{\tau'}{EQ'}$ et ne pourrait dépasser 0,36, pour les limites de température que nous avons admises plus haut.

Dans une machine à vapeur le piston et la vapeur reviennent périodiquement à leur état initial. La série des transformations subies par la vapeur constitue une courbe fermée appelée **cycle**. Pour une machine thermique quelconque, à vapeur ou autre, Carnot a fait connaître un cycle dont le coefficient économique $\frac{\tau'}{EQ'}$ est *maximum*. C'est à ce cycle spécial que s'applique le coefficient économique $\frac{t-t'}{273+t}$. Mais c'est un *cycle idéal*, qui n'est pas rigoureusement réalisable, mais dont on peut seulement chercher à se rapprocher le plus possible.

Pratiquement, les machines à vapeur ne peuvent décrire qu'un cycle de Carnot *imparfait*, et le coefficient économique de leur cycle $\frac{\tau'}{EQ'}$ est toujours inférieur au coefficient économique maximum.

Le rendement industriel des machines à vapeur ne dépasse pas 0,1.

Calcul de la dépense de combustible. — 1 gramme de charbon dégage en brûlant 8 Calories, ce qui correspond à 8.425 kgmètres. Une machine d'un cheval-vapeur produit en une heure 75.60.60 kgmètres. Si toute la chaleur du charbon était convertie en travail, la dépense en charbon d'une machine d'un cheval-vapeur serait de $\frac{75 \cdot 60 \cdot 60}{8.425}$ grammes par heure, environ 80. Si le rendement est $\frac{1}{10}$, la dépense sera de 800 grammes.

524. Machines à gaz. — On appelle machines à gaz (ou machines à gaz tonnant) des machines dont le travail est emprunté à l'énergie de la combustion d'un mélange de gaz ou vapeur combustible et d'air, où l'air est en grand excès. La combustion se fait dans le corps de pompe lui-même, le chauffage est donc *interne* au lieu d'être externe comme dans la machine à vapeur.

En faisant le vide derrière lui, quand la machine est lancée, le piston aspire le gaz combustible et l'air. Lorsque le piston se trouve en un point déterminé de sa course, un tiroir distributeur qui avait permis l'entrée du mélange gazeux ferme les orifices d'admission ; à ce moment, on produit l'inflammation qui donne naissance à une pression de plusieurs atmosphères. Le tiroir détermine ensuite l'évacuation des produits de la combustion.

Le mode d'inflammation du mélange est variable. Dans la machine Lenoir, elle a lieu par l'étincelle d'une petite bobine de Ruhmkorff ; dans la machine Otto, elle se fait par un bec de gaz allumé.

Les machines à gaz sont très avantageuses pour les travaux intermittents, car il suffit de quelques minutes pour établir leur fonctionnement régulier. Leur rendement est en outre notablement supérieur à celui des machines à vapeur. Il atteint 0,50.

Applications. — 1° Combien de grammes d'eau à 100° pourrait-on réduire en vapeur à la même température avec la chaleur dégagée par la combustion de 1 gramme de charbon ?

2° Une machine de 20 chevaux-vapeur consomme 56 kilogrammes de charbon par heure ; quel est son rendement ?

3° Quel est le rendement d'une machine thermique qui consomme 10 kilogrammes de charbon par heure et élève dans le même temps 30 mètres cubes d'eau à la hauteur de 50 mètres ?

4° Quelle est la grandeur de la pression exercée par la vapeur d'eau à 153° sur une surface de 1 mètre carré ? A 153°, la force élastique maximum de la vapeur d'eau est de 5 atmosphères.

5° Un piston de 20 décimètres carrés de surface est poussé sur une de ses faces par de la vapeur à 5 atmosphères de pression et sur l'autre par la pression atmosphérique. La course du piston est de 50 centimètres. Quel est le travail effectué par le piston pendant sa course ?

6° Les bras du levier d'une soupape de sûreté ont 3 centimètres et 54 centimètres ; à l'extrémité du long bras est suspendu un poids de 10 kilogrammes. Si la surface de la soupape est de 12 centimètres carrés, quelle pression en atmosphères devra dépasser la vapeur d'eau dans la chaudière pour que la soupape s'ouvre ?

HISTORIQUE

525. Thermomètres. — L'invention du thermomètre date de la fin du xvi^e siècle ; à cause de la grande dilatibilité des gaz, les premiers thermomètres, et en particulier celui de *Galilée*, furent des thermomètres à air ; c'étaient plutôt des thermoscopes. Les *Académiciens de Florence* (1557-1566) firent usage de thermomètres à alcool ; ils étaient tous identiques. C'est à la fin du xvii^e siècle que le mercure fut substitué à l'alcool et que la gradua-

tion se fit avec des points fixes. Les perfectionnements successivement apportés à la construction des thermomètres sont spécialement dus à *Fahrenheit* (1720) et à *Deluc* (fin du XVIII^e siècle). *Dulong* et *Petit*, puis *Regnault*, firent ressortir les avantages des thermomètres à gaz pour les mesures de précision.

Dilatations. — Le pyromètre à cadran avait été employé par *Musschenbroek* à la comparaison des dilatations linéaires des solides; en 1778, *Lavoisier* et *Laplace* imaginent une disposition analogue, plus sensible et plus précise. En 1816, *Dulong* et *Petit* mesurent la dilatation absolue du mercure. En 1837, *Despretz* fixe à 4⁰ la température du maximum de densité de l'eau. En 1703, *Amontons* avait reconnu que de 0⁰ à 100⁰ la force élastique d'une masse d'air augmentait d'un tiers sous volume constant; les recherches de *Gay-Lussac* sur la dilatation des gaz datent de 1807; les mesures précises de *Rudberg*, professeur à Upsal (1835), et de *Regnault* (1840), fixent d'une façon définitive le coefficient de dilatation de l'air sec.

Vapeurs. — Les forces élastiques maxima de la vapeur d'eau de 0⁰ à 100⁰ ont été mesurées par *Dalton* sur un baromètre à vapeur; *Regnault*, en 1844, les détermine avec une extrême exactitude jusqu'aux limites où la vapeur peut être utilisée industriellement. Les nombres de *Magnüs*, de Berlin, publiés à la même date, s'accordent avec ceux de *Regnault*. *Dalton* montre que sa loi du mélange des gaz s'applique à un mélange de gaz et de vapeur, chacun des éléments se comportant comme s'il était seul.

Au commencement de ce siècle, *Monge* avait liquéfié l'acide sulfureux en le refroidissant; par la compression et le refroidissement combinés, *Faraday* avait réussi à liquéfier la plupart des gaz connus; six avaient résisté, on les avait appelés permanents. En 1869, *Andrews*, professeur à Belfast, déduit de l'étude de l'acide carbonique l'existence d'une température critique au-dessus de laquelle un gaz ne peut plus exister à l'état liquide, si puissante que soit la pression à laquelle il est soumis. En 1877, *Cailletet* utilise l'abaissement considérable de température dû à la détente d'un gaz pour amener chacun des gaz permanents au-dessous de son point critique et le liquéfier.

La force d'expansion de la vapeur d'eau était connue d'*Héron d'Alexandrie*; en 1615, *Salomon de Caus* songe à l'utiliser. La première machine où la force élastique de la vapeur ait servi à pousser un piston est due à *Denis Papin* (1690). Elle était à simple effet; la pression atmosphérique produisait le retour du piston. La machine à double effet fut créée par *Watt* (de 1760 à 1800) qui énonça le principe de la paroi froide, fit usage d'un condenseur séparé du corps de pompe, inventa le tiroir, la manivelle, le parallélogramme articulé, employa la détente. La chaudière tubulaire, qui a permis de réaliser la locomotive, est due à *Seguin*.

Sadi Carnot, en 1824, fixa les conditions dont dépend le rendement d'un moteur thermique.

Calorimétrie. — La méthode des mélanges est due à *Black*. *Regnault* l'a perfectionnée et a apporté dans les déterminations calorimétriques sa rigueur habituelle.

Équivalent mécanique de la chaleur. — *Rumford*, frappé de l'échauffement considérable que produit le forage des canons, fut le premier qui mesura la chaleur développée dans le frottement (1799); mais il n'évalua pas le travail dépensé. En 1842, un médecin d'Heilbronn, *J. R. Mayer*, énonce nettement le principe de l'équivalence de la chaleur et du travail, en fait ressortir les conséquences multiples et calcule correctement l'équivalent mécanique de la calorie. *Joule*, de Manchester, fit, en 1843, ses premières expériences pour mesurer l'équivalent mécanique de la calorie; sa détermination par le frottement de l'eau date de 1849. Vers 1850, *Hirn*, de Colmar, fait servir une machine à vapeur industrielle à la même détermination.

Helmholtz (1847), *W. Thomson* et surtout *Clausius*, professeur à Bonn, en s'appuyant sur le principe énoncé par Mayer et sur les travaux relatifs aux machines thermiques de Sadi Carnot, établissent la théorie mécanique de la chaleur et développent dans toutes les branches de la physique les conséquences du principe de la conservation de l'énergie.

Rayonnement calorifique. — L'étude du rayonnement calorifique, entreprise au commencement du XIX^e siècle par *Leslie*, professeur à Édimbourg, est poursuivie en France par l'Italien *Melloni* qui imagine le thermomultiplicateur, découvre les propriétés du sel gemme, sépare les rayons de chaleur de diverses réfrangibilités et fait connaître un grand nombre de faits nouveaux, principalement sur les rayons calorifiques obscurs.



ACOUSTIQUE

526. On appelle **sons** les sensations que nous percevons par le nerf auditif à l'état *physiologique* : elles résultent habituellement de la transmission à l'oreille de mouvements dont sont animés des corps extérieurs.

Tout *corps sonore*, c'est-à-dire tout corps qui fait éprouver à l'oreille la sensation du son est le siège de mouvements oscillatoires analogues à ceux du pendule, mais reproduits à des intervalles très rapprochés et nommés *vibrations*.

L'**acoustique** a pour objet l'étude des mouvements vibratoires sonores, de leur production, de leur propagation et des relations qui existent entre les conditions de ces mouvements et les modifications de la sensation.

527. **Mouvement vibratoire d'un corps élastique.** — On appelle mouvement vibratoire un mouvement dans lequel les molécules d'un corps *élastique* écartées de leur position d'équilibre y

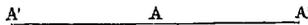


Fig. 343.

reviennent quand cesse l'action qui les en avait éloignées, la dépassent en vertu de leur vitesse acquise et exécutent entre des positions extrêmes des *excursions périodiques* ou **oscillations**. Une oscillation complète est le double mouvement d'aller et de retour de A' en A'' et de A'' en A' (fig. 343). L'*amplitude* est la distance A' A'' des positions extrêmes.

La vitesse d'une molécule vibrante est nulle aux extrémités A' et A'' de son excursion ; elle est maximum au milieu A , c'est-à-dire au point qu'elle occupait dans sa position de repos. En un même point de la trajectoire $A'A''$, la vitesse a des valeurs égales et opposées suivant qu'on observe l'aller ou le retour de la molécule.

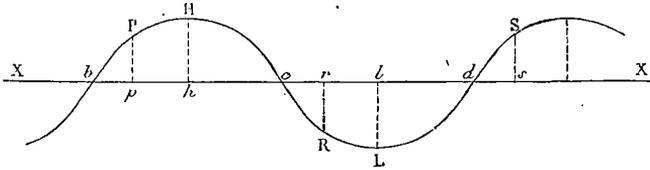


Fig. 344.

Tant que les déplacements restent petits, ces oscillations sont **isochrones** ou d'égale durée, c'est-à-dire que leur durée est indépendante de l'écart.

La période T est la durée d'une oscillation complète ou le temps

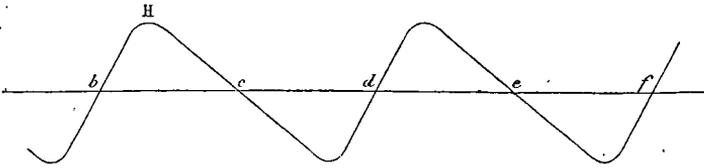


Fig. 345.

qui sépare deux passages consécutifs du corps vibrant par la même position avec des vitesses de même sens. Si N représente le nombre d'oscillations complètes ou de vibrations par seconde, on a : $T = \frac{1}{N}$ ou $NT = 1$.

Le mouvement vibratoire le plus simple est un mouvement pendulaire (111). La courbe représentative de ce mouvement à des instants successifs est une sinusoïde (fig. 344).

La forme peut être différente (fig. 345).

528. Mouvement vibratoire des corps sonores. — De nombreuses expériences prouvent que toutes les fois que l'oreille éprouve la sensation d'un son, le corps sonore est le siège d'un mouvement vibratoire.

1° Soit une **lame d'acier** ayant une extrémité libre D, et fixée en C entre les mâchoires d'un étau (fig. 346); si l'on infléchit l'extrémité D et qu'on l'abandonne ensuite, elle revient à la direction verticale, la dépasse en vertu de sa vitesse acquise et exécute de part et d'autre des mouvements de va-et-vient. Toutes les particules exécutent leurs oscillations dans le même temps, l'amplitude seule diffère avec la distance à l'extrémité fixe. Lorsque la lame est longue, nous voyons les vibrations et nous pouvons les compter, mais nous n'entendons alors aucun son. Le nombre de vibrations par seconde croît quand on raccourcit la lame et il arrive un moment où l'oreille *perçoit un son*. A ce moment, les vibrations *ne peuvent plus être comptées directement* parce qu'elles ont séparément une *durée trop courte*, et la lame est vue simultanément dans toutes ses positions par suite de la persistance des impressions sur la rétine (735). Le mouvement vibratoire d'une lame métallique produit donc un son quand il est suffisamment rapide.

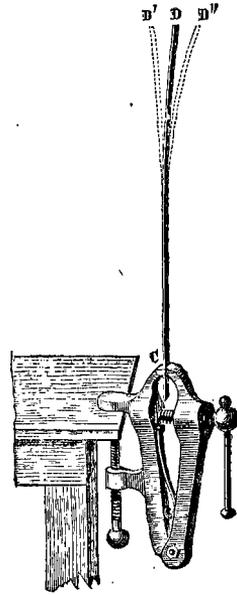


Fig. 346.

2° En pinçant une **corde élastique** tendue MN, de façon à la faire résonner, nous la mettons dans un état vibratoire rendu visible par la forme qu'elle prend. La rapidité des vibrations ne



Fig. 347.

permettant pas de distinguer la corde dans ses diverses positions, l'œil la voit à la fois dans toutes sous l'aspect d'un fuseau renflé en son milieu (fig. 347).

3° De la paroi d'une **cloche** dont on a attaqué les bords avec un archet A et qui rend un son, approchons une pointe fine soutenue par un support C : les chocs successifs de la paroi contre la pointe attestent les déplacements périodiques de la cloche. Une petite balle sou-

tenue par un fil P est, de la même façon, vivement repoussée quand elle touche les bords de la cloche (fig. 348).

4° Faisons parler un diapason en passant entre les branches une tige de bois un peu plus grosse que leur écartement. Si

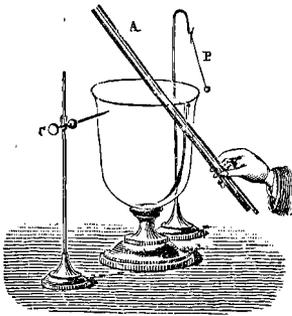


Fig. 348.

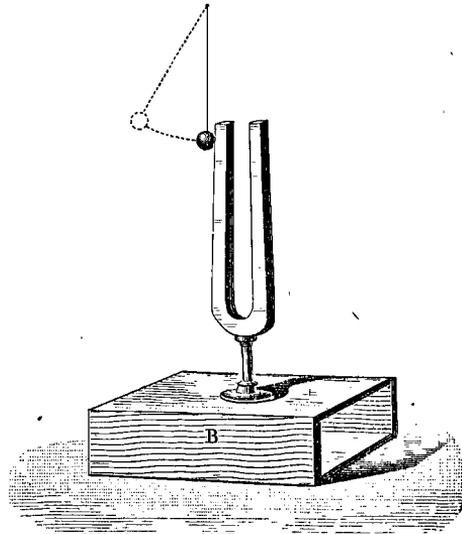


Fig. 349.

l'on approche de l'une des branches une bille d'ivoire suspendue à un fil (fig. 349), la bille est projetée par le choc du diapason, puis retombe pour être lancée de nouveau jusqu'à ce que le son cesse.

5° Le mouvement vibratoire est mis en évidence d'une façon plus

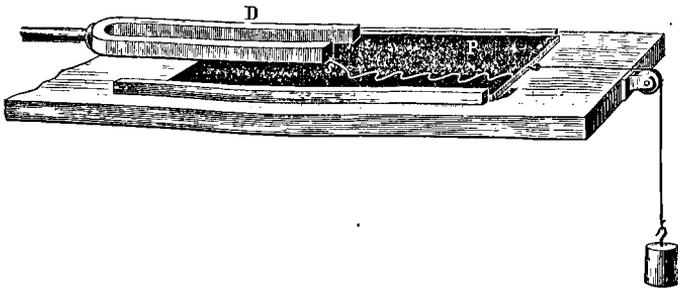


Fig. 350.

complète si nous fixons à l'une des branches du diapason D une pointe métallique s dirigée perpendiculairement au plan des branches. En faisant passer rapidement, devant la pointe, une

plaque de verre enfumée P, on obtient une *ligne sinueuse continue et très régulière dont chaque dent correspond à une vibration du corps sonore* (fig. 350).

6° Dans les instruments à vent, le corps sonore est une masse gazeuse. Montons sur une soufflerie un tuyau dont l'une des parois est en verre et faisons-le parler. Si nous descendons à l'intérieur une membrane S tendue sur un anneau de bois et soutenue par un fil, les vibrations de l'air se transmettent à la membrane dont le mouvement fait sautiller des grains de sable déposés à sa surface (fig. 351).

Un corps ne peut vibrer que s'il est élastique, c'est-à-dire susceptible de revenir à sa position d'équilibre quand on l'en a écarté; un corps n'est donc sonore que s'il est élastique.

529. **Transmission d'un mouvement vibratoire.** — Il ne suffit pas qu'un corps soit animé d'un mouvement vibratoire pour qu'il y ait impression sur l'oreille, il faut encore que le corps sonore soit *mis en relation avec l'oreille par un milieu élastique* ou par une succession ininterrompue de milieux élastiques, entrant en vibration et capables de transmettre le mouvement de proche en proche.

On démontre que *l'air transmet les vibrations en vibrant lui-même*, en plaçant sur le trajet des vibrations d'un timbre une membrane mince M, tendue sur un cadre vertical C et le long de laquelle est suspendu un pendule a (fig. 352). Par l'intermédiaire de l'air, la membrane prend le même mouvement vibratoire que le corps sonore et le communique au pendule.

Les *corps solides durs* transmettent bien les vibrations des corps sonores. Si l'on place l'oreille à l'une des extrémités d'une longue poutre, on entend le faible bruit produit à l'autre extrémité par le grattement d'une épingle. De même, des chocs produits sur un fil

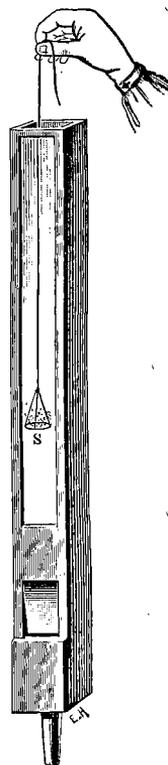


Fig. 351.



Fig. 352.

télégraphique sont perçus à une grande distance par l'oreille appliquée sur le fil.

La transmission du son s'opère aussi par l'intermédiaire des *liquides*. Un plongeur entend parfaitement les bruits produits dans l'eau ou sur le rivage. Les poissons s'enfuient au moindre bruit.

Les corps solides dépourvus d'élasticité, tels que le duvet, les draperies, les corps mous éteignent presque complètement le son.

En résumé, *un milieu élastique pondérable est nécessaire* pour établir un rapport entre le corps vibrant et l'organe de l'ouïe. Quand ce milieu fait défaut, les vibrations du corps sonore ne produisent pas de son.

Le son ne se propage pas dans le vide. — Dans un ballon de verre

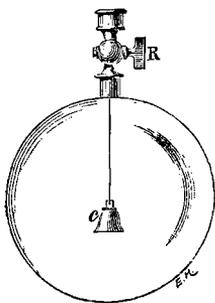


Fig. 353.

à robinet, une sonnette C est suspendue par un cordon de soie à la garniture métallique (fig. 353). On entend la sonnette si l'on agite le ballon quand il est plein d'air, même si le robinet est fermé; on n'entend plus aucun son lorsque le vide a été fait dans la cloche. En ballon, ou sur les montagnes, le son de la voix devient faible par suite de la raréfaction de l'air.

VITESSE DU SON

530. La propagation des mouvements vibratoires qui produisent le son n'est pas instantanée. On sait qu'il s'écoule quelques instants entre la vue de la fumée qui s'échappe d'une arme à feu éloignée et l'audition du bruit.

Quand le milieu ambiant offre la *même élasticité* en tous sens (gaz, liquides, métaux, etc.), le mouvement vibratoire se propage avec la même vitesse dans toutes les directions et, après un temps quelconque, se trouve sur une sphère ayant pour centre le corps sonore. Dans un corps cristallisé n'appartenant pas au système cubique, la vitesse de propagation dépendrait de la direction.

531. Mesure de la vitesse du son dans l'air. — Premières expériences. — Les premières mesures précises de la vitesse de propagation du son dans l'air furent exécutées en 1738 par des savants de l'Académie des sciences entre Montmartre et Montlhéry, et en 1822 par des membres du Bureau des longitudes entre Villejuif et Montlhéry. La méthode employée fut la même dans les deux séries d'expériences.

Méthode. — Supposons deux groupes d'observateurs, placés l'un à la station A et l'autre à la station B.

A la station A, on tire un coup de canon : les observateurs de la station B notent à l'aide de compteurs l'instant où ils voient la lueur qui accompagne l'inflammation de la poudre, puis l'instant où ils perçoivent le son. En raison de la vitesse extrêmement grande de la propagation de la lumière (300 mille kilomètres par seconde), on admet que l'apparition de l'éclair coïncide avec l'instant où le mouvement vibratoire sonore prend naissance. L'intervalle de temps qui sépare la sensation lumineuse de la sensation sonore est égal au temps que le son a mis à parcourir la distance des deux stations.

Peu de temps après, un coup de canon est tiré à la station B, et les mêmes déterminations sont faites par les observateurs de la station A.

Le mouvement de propagation est uniforme. Il suffit, pour le démontrer, d'échelonner entre les deux stations plusieurs groupes d'observateurs munis de compteurs. Le temps compris entre la lueur et le son est pour les différents groupes proportionnel aux distances qui les séparent du lieu où l'explosion a eu lieu.

La propagation étant uniforme, *la vitesse du son dans l'air est l'espace que le son parcourt en une seconde.* D désignant la distance des deux stations, θ la moyenne des temps observés, $\frac{D}{\theta}$ est l'espace parcouru en une seconde, à la température de l'expérience.

Influence du vent. — La rapidité de la transmission du son étant très grande par rapport à la vitesse du vent, l'influence de l'entraînement des couches gazeuses est toujours petite.

Pour corriger cette influence, on employait la méthode dite des *coups réciproques*, en tirant un coup de canon alternativement à chaque station, de 5 minutes en 5 minutes. La moyenne des vitesses observées dans deux expériences consécutives pour deux propagations

de sens contraires est égale à la vitesse en air calme. $V = \frac{v + v'}{2}$ ⁽¹⁾.

En prenant ainsi la moyenne, on trouvait toujours la même valeur de V , quelle que soit la vitesse du vent.

Méthode graphique de Regnault. — Regnault mesura la vitesse du son soit à l'air libre, soit dans de larges tuyaux de conduite de plusieurs kilomètres de longueur remplis d'air.

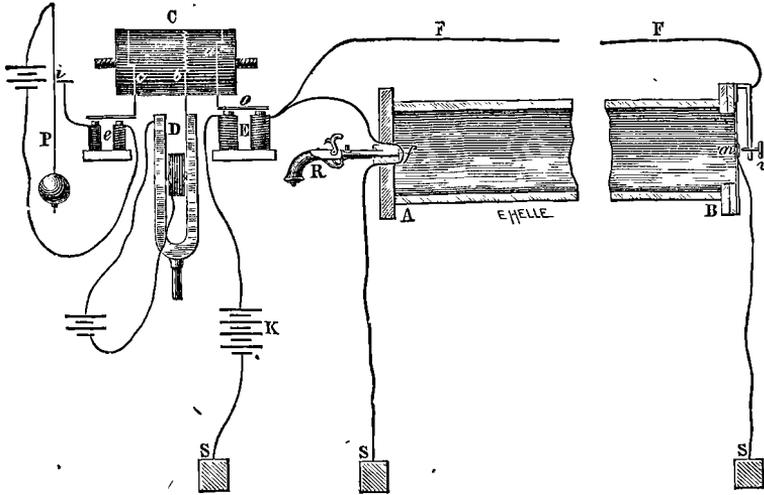


Fig. 354.

La vitesse du son est la même dans les deux cas.

Il eut recours pour la détermination du temps de la transmission à une méthode exempte des erreurs d'appréciation⁽²⁾ de l'observateur, en faisant enre-

(1) Le vent augmente la vitesse des sons qui suivent la même route que lui et diminue la vitesse des sons qui marchent en sens inverse. Il ne modifie pas la vitesse de propagation dans une direction perpendiculaire à celle à laquelle il souffle. V étant la vitesse du son dans l'air calme, w la vitesse du vent, v la vitesse du son observée, $v = V + w$ si le vent souffle dans la direction où l'on observe la propagation, $v = V - w$ si le vent souffle dans la direction opposée.

Soit α l'angle des deux directions, $w \cos \alpha$ est la composante de la vitesse du vent dans la direction de la propagation; on a

$$v = V + w \cos \alpha \quad \text{et} \quad v' = V - w \cos \alpha$$

pour deux propagations de sens contraires,

$$\text{d'où} \quad V = \frac{v + v'}{2}.$$

(2) Si un observateur reçoit la lumière au temps t , il la perçoit au temps $t + \varepsilon$ et pointe sur le compteur au temps $t + \varepsilon + \varepsilon'$; le temps précis où les vibrations atteignent le tympan étant t_1 , le son est perçu au temps $t_1 + \varepsilon_1$, et l'inscription sur le compteur est faite au temps $t_1 + \varepsilon_1 + \varepsilon'_1$. On devrait mesurer $t_1 - t$, on observe $t_1 + \varepsilon_1 + \varepsilon'_1 - (t + \varepsilon + \varepsilon')$; $\varepsilon_1 + \varepsilon'_1$ et $\varepsilon + \varepsilon'$ sont différents pour un même observateur et varient avec les observateurs. Toutefois la différence $\varepsilon_1 + \varepsilon'_1 - (\varepsilon + \varepsilon')$ reste très petite.

gistrer automatiquement par un procédé électrique le moment de l'explosion et le moment de l'arrivée du son. La fig. 354 représente l'ensemble de la disposition expérimentale.

A l'aide d'un fil télégraphique F établi entre les deux stations, l'ébranlement de l'air qui était produit à la station A par l'explosion d'une arme à feu R rompait un circuit en f et provoquait immédiatement par l'intermédiaire du contact d'un électro-aimant E, l'inscription d'un signal sur un cylindre enregistreur C. A la station B, une membrane conductrice m recevait le mouvement vibratoire; elle venait toucher une vis v , rétablissait le circuit électrique et mettait ainsi en action le contact du même électro-aimant, ce qui donnait lieu à un second signal sur le cylindre enregistreur. Par l'inscription sur le cylindre des oscillations d'un *pendule* P qui marquait les secondes, et des vibrations d'un *diapason* D qui donnait les centièmes de seconde, on connaissait le temps employé par le cylindre pour tourner de l'arc compris entre les génératrices sur lesquelles se trouvaient tracés les deux signaux; c'était la durée de la transmission entre les deux stations.

532. Résultats. — Dans l'air calme, sec et à 0° , la vitesse du son est de 331 mètres par seconde; la vitesse du son croît avec la température de l'air : à t° , la vitesse est égale à $331\sqrt{1 + \alpha t}$, α étant le coefficient de dilatation de l'air; à 15° , elle atteint 340 mètres. A une même température, la vitesse de propagation du son est *indépendante de la force élastique* du gaz, elle est la même sur les montagnes où l'air est plus raréfié que dans les plaines, elle est la même dans le sens vertical et dans le sens horizontal. Les sons forts ou faibles, graves ou aigus, se propagent sensiblement avec la même vitesse.

Dans un gaz, dont la *densité par rapport à l'air* est d , la vitesse V_g de propagation du son à t° est

$$V_g = 331\sqrt{\frac{1 + \alpha t}{d}} = \frac{V_a}{\sqrt{d}}$$

533. Vitesse de propagation du son dans l'eau (fig. 355). — En 1827, Colladon et Sturm ont mesuré la vitesse de propagation du son dans l'eau du lac de Genève, entre deux bateaux maintenus fixes à une distance d'environ 13 kilomètres. A la station A était suspendue une cloche C immergée dans l'eau. A un moment donné, en appuyant sur un levier L, on frappait la cloche avec un marteau b et on abaissait une mèche allumée a qui enflammait un tas de poudre m au moment où le son était produit. A la station B, le pavillon d'un cornet acoustique en tôle mince était plongé dans l'eau : il était rempli d'air et fermé par une membrane tendue tournée vers la cloche : la partie supérieure et étroite O du cornet sortait de l'eau et aboutissait à

l'oreille d'un observateur. Celui-ci voyait d'abord l'inflammation de la poudre et il entendait plus tard un son quand la vibration du liquide

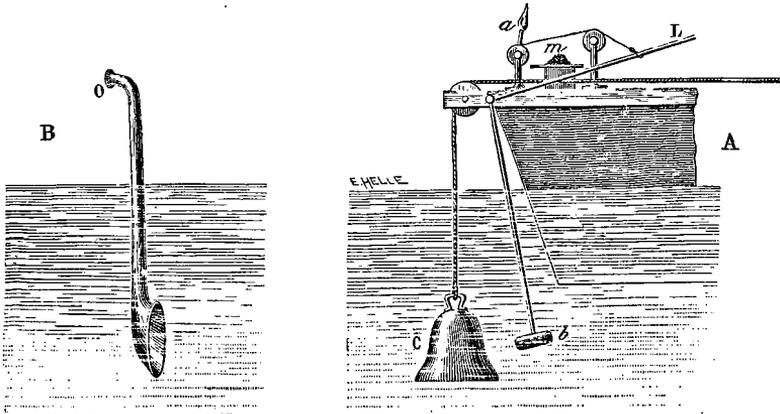


Fig. 355.

atteignait la membrane. Le temps écoulé entre l'apparition de la flamme et l'audition du son donnait le temps de la propagation entre les deux stations. La vitesse fut trouvée égale à 1435 mètres par seconde dans l'eau à 8°.

534. Vitesse de propagation du son dans la fonte de fer. — Biot a déterminé la vitesse de propagation du son dans une conduite en fonte longue d'environ 1 kilomètre et remplie d'air au moment de l'expérience. On produisait le son à l'une des extrémités en frappant directement sur le tuyau ; on observait le temps τ qui s'écoulait entre la perception de deux sons transmis, le premier par le métal et le second par la colonne d'air du tuyau.

Soit V la vitesse dans l'air, L la longueur du tuyau, $\frac{L}{V}$ était la durée de la propagation dans l'air du tuyau ; x étant la vitesse dans la fonte, $\frac{L}{x}$ était la durée de la propagation dans la fonte.

$$\tau = \frac{L}{V} - \frac{L}{x}.$$

On en déduit x puisqu'on connaît V : la propagation fut trouvée plus de 10 fois plus rapide dans la fonte que dans l'air.

MODE DE PROPAGATION DU SON

535. Propagation du son dans un tuyau cylindrique. — Pour donner une idée du mode de propagation du son dans un milieu élastique, par exemple dans l'air, considérons une *lame vibrante*, telle qu'une lame de diapason placée à l'origine d'un tuyau indéfini.

Suivons le mouvement de cette lame (fig. 356) pendant une demi-vibration de A' en A''. Sa vitesse est nulle en A', elle augmente progressivement, devient maximum au milieu de l'amplitude, puis décroît; les vitesses suivent *la loi des vitesses des pendules*. Nous supposons le mouvement total décomposé en une succession de petits mouvements de durée très courte, et nous examinerons comment se fait la transmission d'un de ces mouvements élémentaires.

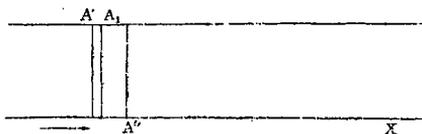


Fig. 356.

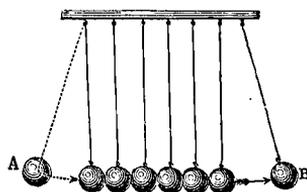


Fig. 357.

Propagation d'un mouvement élémentaire. — Soit la lame dans une position quelconque de son mouvement en A₁, elle pousse la tranche d'air contiguë et lui communique sa vitesse de vibration. Cette tranche poussée vers la tranche voisine est comprimée et acquiert une pression supérieure à la pression atmosphérique; comme elle est élastique, elle réagit pour reprendre son volume primitif, mais éprouvant de la résistance du côté de la lame vibrante, elle *comprime* à son tour la tranche suivante et lui communique sa vitesse de vibration. La transmission de la vitesse de vibration de la lame se fait ainsi de tranche en tranche avec une vitesse de propagation de 340^m par seconde à 15°. Cette transmission se fait *sans transport de matière*, car les molécules d'air n'exécutent dans chaque tranche et suivant l'axe du tuyau que des excursions de va-et-vient très limitées.

En raison de la parfaite élasticité de l'air, cette transmission a lieu sans perte comme dans une *série de billes d'ivoires*, égales, suspendues isolément par un fil à une traverse et en contact (fig. 357). Quand on écarte une des billes extrêmes A de la verticale et qu'on la laisse retomber d'une certaine hauteur sur la bille suivante, elle transmet toute sa vitesse à la bille suivante et revient, au repos; la seconde agit de même sur la troisième, et ainsi de suite; le mouvement se transmet jusqu'à la dernière qui prend une vitesse égale à celle de A au moment du choc et s'élève jusqu'en B à la hauteur d'où A est tombée.

Propagation d'une suite de mouvements élémentaires — Comme les mouvements élémentaires de la lame vibrante se succèdent sans discontinuité, les vitesses de la demi-vibration A'A" se communiquent chacune à leur tour à la tranche d'air en contact avec la lame pour passer de proche en proche à des tranches plus éloignées. A la fin d'une demi-vibration, la vitesse communiquée par la lame au moment où elle avait la position A' sera parvenue en C₂, tandis que la vitesse correspondant à la position A" sera la vitesse d'une tranche C₁ encore en contact avec la lame à l'origine du tuyau. Les différentes tranches de la couche C₁C₂ ont à ce moment des vitesses parallèles à l'axe du tuyau, dans le sens de la propagation AX; leurs vitesses respectives sont celles de la lame aux différents points de sa demi-vibration.

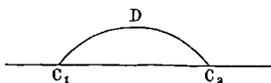


Fig. 358.

Si l'on convient de représenter la grandeur de la vitesse de chaque tranche par une perpendiculaire à l'axe du tuyau élevée en cette tranche, la courbe C₁DC₂ figurera la distribution des vitesses dans la tranche C₁C₂ à la fin de la demi-vibration (fig. 358). Les ordonnées sont nulles aux extrémités de la courbe, ce sont les vitesses provenant des points A' et A" de la lame; la vitesse est maximum au milieu D, c'est la vitesse qu'avait la lame lorsqu'elle a traversé sa position d'équilibre A.

Si le mouvement de la lame s'arrêtait après cette demi-vibration, les vitesses déjà transmises continueraient à se propager le long du tuyau, et on se représenterait les états successifs en *faisant glisser la courbe figurative* suivant l'axe avec une vitesse de 340 mètres par seconde.

Mais après avoir accompli sa demi-vibration de A' en A", la lame vibrante revient sur elle-même de A" en A' et produit, dans chacun des mouvements élémentaires du retour, une *dilatation* de la tranche d'air qui la touche

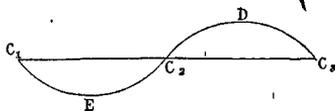


Fig. 359.

immédiatement : cette dilatation et la vitesse inverse qui en résulte se communiquent de proche en proche aux tranches suivantes dans le sens de la propagation. Quand la lame a accompli sa demi-vibration de retour, ses vitesses successives se sont distribuées de C₁ en C₂; la courbe figurative de ces vitesses sera la courbe C₁EC₂, où les vitesses de vibration sont portées au-dessous de l'axe du tuyau, pour indiquer qu'elles sont dirigées en sens contraire de la propagation. Pendant la durée de la demi-vibration de retour, la première courbe C₁DC₂ s'est transportée en C₂DC₃. Le temps du retour étant égal à celui de l'aller, C₁C₂ = C₂C₃. La fig. 359 représente l'état du tuyau après une vibration complète de la lame

Onde sonore. Longueur d'onde. — L'ensemble des deux couches C_1C_2 et C_2C_3 a la forme d'une vague ou onde et constitue une **onde sonore**; l'onde C_1C_3 se subdivise en deux demi-ondes, les tranches comprises entre C_2 et C_3 sont condensées, les tranches comprises entre C_1 et C_2 sont dilatées. L'espace C_1C_3 parcouru dans le tuyau par le mouvement pendant une vibration entière de la lame s'appelle **longueur de l'onde sonore** et se désigne par la lettre λ ; V étant la vitesse de propagation et T la durée de la vibration, on a d'après l'équation du mouvement uniforme : $\lambda = VT$. Soit N le nombre de vibrations de la lame en une seconde, $NT = 1$, et par suite $V = N\lambda$.

État du tuyau à un instant donné. — Comme les vibrations de la lame ont une égale durée, après un certain nombre de vibrations, le tuyau sera occupé à un instant donné par des ondes sonores équidistantes, et la courbe représentative des vitesses à cet instant se composera de courbes identiques à la courbe C_1C_2 (*sinusoïde*), se succédant sans interruption.

La courbe ondulée qui représente le mouvement à un instant donné com-

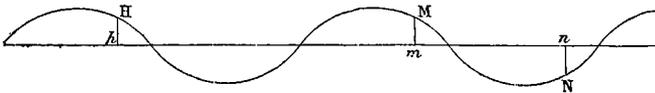


Fig. 360.

prend ainsi une suite de sinusoides; cette courbe offre des crêtes et des creux alternant à des intervalles égaux. La longueur d'onde est la distance qui sépare les sommets de deux crêtes consécutives.

Les vitesses ainsi transmises suivent la loi des vitesses de l'oscillation d'un pendule; par suite, *au même instant*, deux tranches II et M *distantes d'une longueur d'ondulation* ou d'un nombre entier de longueurs d'ondulation ont des vitesses égales et de mêmes sens; deux tranches M et N *distantes d'une demi-longueur d'ondulation* ou d'un nombre impair de demi-longueurs d'ondulation ont des vitesses égales et de signes contraires (fig. 360).

États successifs du tuyau cylindrique indéfini. — Considérons l'état du tuyau à différents instants: la courbe représentative se transporte dans le tuyau dans le sens de la propagation avec une vitesse V , de telle sorte qu'il passe en un point M pendant la durée d'une vibration une longueur de la courbe égale à λ (d'après l'équation $\lambda = VT$); une tranche M prendra donc pendant le temps T toutes les vitesses de la lame vibrante pendant une période et dans le même ordre.

Une tranche d'air quelconque M possède donc le même mouvement vibratoire que la source sonore. Une membrane tendue en un point quelconque du trajet et munie d'un style (546) inscrirait sur un cylindre enregistreur les mêmes vibrations que la lame élastique elle-même et en même nombre par seconde. Toutefois, elle ne reproduit ce mouvement qu'avec un retard $\frac{L}{V}$, L désignant la distance de la tranche M à la source.

Posons $\frac{L}{V} = (m + \varepsilon) T$, m étant entier et ε une fraction.

Les deux mouvements vibratoires ou pendulaires ne sont au même instant les mêmes en M et sur la source que si ε est nul ; dans tout autre cas, on dit qu'il y a une différence de phase ε .

Lorsque ε est nul, on dit que les deux mouvements sont dans la *même phase de vibration*, alors $L = mVT$ ou $L = m\lambda$, le point M est distant de la source d'un nombre entier de longueurs d'ondulation.

Si $\varepsilon = \frac{1}{2}$, les vitesses sont égales et contraires en M et sur la source, on dit que les deux mouvements sont dans des *phases opposées* de vibration ; dans ce cas, $L = \left(m + \frac{1}{2}\right) T$, le point M est distant de la source d'un nombre impair de demi-longueurs d'ondulation.

536. Propagation dans un milieu indéfini. — Si la source sonore, au lieu de vibrer à l'origine d'un tuyau, vibre dans un milieu indéfini, la propagation du mouvement s'opèrera par le même mécanisme que dans un tuyau, c'est-à-dire de proche en proche et avec la même vitesse, mais dans toutes les directions à la fois.

Dans un tuyau étroit, tous les points d'une tranche sont au même instant dans le même état vibratoire ; dans un milieu indéfini, les molécules qui ont au même instant la même vitesse de vibration forment par leur ensemble une *surface d'onde* ; dans un milieu offrant la même élasticité dans tous les sens, cette surface d'onde est une sphère ayant pour centre le point vibrant S. Les ondes sonores, au lieu d'être formées comme dans un tuyau par des couches cylindriques d'épaisseur λ , ont la forme de couches concentriques ayant pour centre le point S et pour épaisseur λ . Deux points situés sur un même rayon et distants d'un nombre *pair* de demi-longueurs d'onde, seront au même instant *dans la même phase de vibration* ; deux points situés sur un même rayon et distants d'un nombre *impair* de demi-longueurs d'ondulation, seront au même instant *dans des phases opposées de vibration*.

537. Longueur d'ondulation. — Les résultats obtenus par l'analyse précédente du mode de propagation du son peuvent être déduits d'un examen plus rapide.

Soit une lame élastique vibrant à l'orifice d'un tuyau contenant de l'air, les vibrations successives de la lame se communiquent de proche en proche aux diverses tranches du tuyau, car une membrane placée en un point quelconque du trajet et munie d'un style inscrirait sur un cylindre enregistreur les mêmes vibrations que la lame élastique elle-même et en même nombre par seconde.

L'ensemble des mouvements de la lame pendant une seconde agite un espace égal à la vitesse de propagation de telle façon que si la lame exécute 500 vibrations par seconde, le premier mouvement a

parcouru 340 mètres (à 15°) quand la 501^e vibration commence à l'ouverture du tuyau. Les mouvements de chacune des vibrations seront donc répartis sur un espace d'une longueur égale à $\frac{340}{500}$ mètres, appelé *longueur d'onde* du son considéré. On désigne cette longueur par la lettre λ ,

$$\text{et on pose } \frac{340}{500} = \lambda$$

$$\text{ou, en général } V = n\lambda$$

V désigne la vitesse de propagation du son dans le milieu où la propagation a lieu, n est le nombre de vibrations par seconde.

Si T est la durée d'une vibration, il est clair qu'on a : $nT = 1$; d'où, en remplaçant n par sa valeur, on déduit :

$$\lambda = VT$$

la longueur d'ondulation est l'espace parcouru par le mouvement vibratoire pendant la durée d'une vibration.

RÉFLEXION DU SON

538. Un mouvement vibratoire sonore se réfléchit sur un plan rigide, comme la lumière sur une surface polie.

On appelle *rayon sonore* la direction rectiligne issue de la source ; la ligne droite qui joint un point sonore O à un point I du plan sera un *rayon incident*, il y aura un *rayon réfléchi* en I .

539. Lois de la réflexion du son. — Les lois de la réflexion du son sont celles de la réflexion de la lumière et de la chaleur rayonnante (609). 1° *Le rayon réfléchi est dans le plan d'incidence*, c'est-à-dire dans le plan du rayon incident et de la normale au point d'incidence.

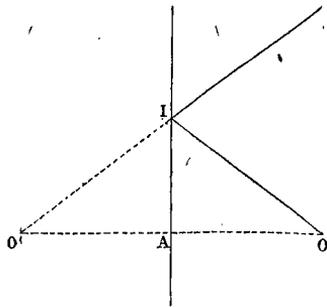


Fig. 361.

2° *L'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence*, ou les deux rayons sonores, incident et réfléchi, font le même angle avec la normale au point d'incidence.

Il résulte de là que, si un centre sonore O est placé devant un plan, les rayons réfléchis semblent venir du point O' symétrique par rapport au plan (613); ce point symétrique peut être appelé *image sonore* (fig. 361).

Expérience des miroirs conjugués. — L'expérience des miroirs conjugués permet de vérifier l'identité des lois géométriques de la réflexion du son et de la lumière.

Deux miroirs sphériques concaves sont disposés en face l'un de

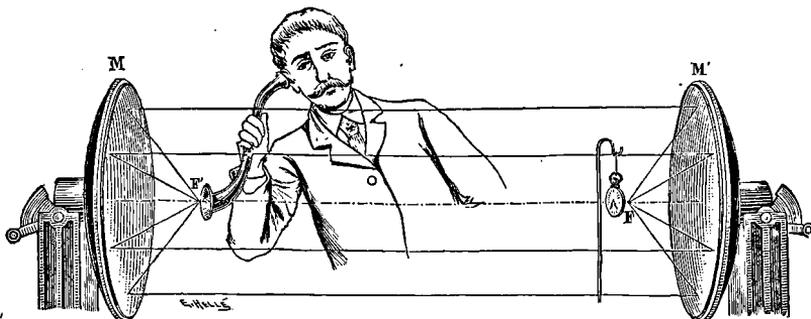


Fig. 362.

l'autre, à une distance de plusieurs mètres, de telle sorte que leurs surfaces concaves se regardent et que leurs *axes de figure coïncident exactement*. On place une bougie au foyer principal F du premier miroir, les rayons lumineux qui en émanent sont réfléchis parallèlement à l'axe commun des deux miroirs et concentrés après une nouvelle réflexion au foyer principal F' du deuxième miroir où on les reçoit sur un petit écran. On remplace alors la bougie par une montre, on place à l'autre foyer l'oreille ou mieux le pavillon d'un cornet acoustique qui intercepte moins de rayons sonores (fig. 362) : on entend distinctement le tic-tac de la montre ; il cesse d'être perçu dès qu'on s'écarte du foyer.

La réflexion du son joue un rôle dans le porte-voix et dans le cornet acoustique. Dans le *porte-voix*, les réflexions successives des rayons sonores sur les parois du tube les amènent à se propager, au sortir du pavillon, dans la direction de l'axe de l'instrument. Le *cornet acoustique* se comporte comme un porte-voix renversé, il recueille les rayons sonores qui tombent sur sa partie élargie et les fait converger vers le conduit auditif externe de l'oreille après des réflexions multiples.

540. **Échos.** — On appelle *écho* la répétition d'un son réfléchi par un obstacle, tel qu'un mur, un bouquet d'arbres.

Supposons un observateur O placé en face d'une surface réfléchissante plane MN . Il émet un son, ce son est réfléchi comme s'il venait de l'image virtuelle O' du centre sonore (fig. 363). Soit d la distance AO de l'observateur à l'obstacle, le son parcourt $2d$ pour l'aller et le retour; entre l'instant où un son extrêmement bref est émis et celui où il revient, il s'est écoulé un temps $\frac{2d}{V}$ (V vitesse de propagation du son).

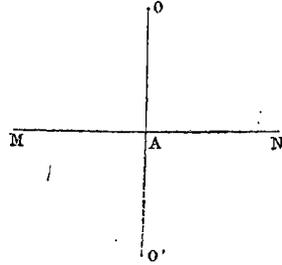


Fig. 363.

La sensation sonore du son direct *persiste* en moyenne $\frac{1}{10}$ de seconde; si le son réfléchi arrive à l'observateur avant qu'il se soit écoulé $\frac{1}{10}$ de seconde, la nouvelle sensation prolonge la première et

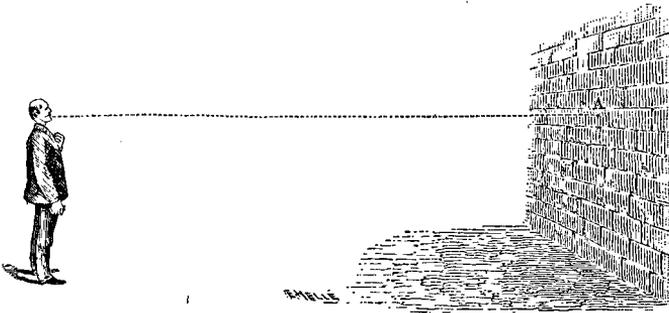


Fig. 364.

ne s'en distingue pas. On n'aura conscience de l'écho que si le son met au moins $\frac{1}{10}$ de seconde à parcourir $2OA$. Le son parcourant 340 mètres en une seconde à 15° ou 34 mètres en $\frac{1}{10}$ de seconde, il faut que $2OA$ soit supérieur à 34 mètres ou OA à 17 mètres. Un observateur placé à un peu plus de 17 mètres d'un mur servant de réflecteur percevra un écho, *s'il émet un son très bref* (fig. 364).

(Les sons articulés exigent une distance minimum notablement plus grande pour que l'écho soit net. Si l'on admet qu'on entend distinctement quatre

syllabes par seconde, pour que l'audition d'une syllabe réfléchie suive immédiatement, mais sans superposition, l'audition d'une syllabe directe, il faut qu'il s'écoule $\frac{1}{4}$ de seconde entre le commencement du son direct et le commencement du son réfléchi; la distance OA doit donc être telle que $\frac{2 \cdot OA}{V} = \frac{1}{4}$, $OA = \frac{V}{8} = 42^m,5$. A cette distance, si l'on prononce une seule syllabe, la syllabe réfléchie suit immédiatement. Si plusieurs syllabes sont prononcées sans interruption, les premières syllabes réfléchies se superposent pour l'oreille aux syllabes directes et seront couvertes par les directes parce qu'elles sont moins intenses, la dernière syllabe réfléchie arrivera seule quand le son direct aura cessé et semblera seule répétée. L'écho sera dit *monosyllabique*.

Les deux dernières syllabes, ... les n dernières syllabes seront répétées si la distance OA est égale à $2 \cdot 42,5 \dots n \cdot 42,5$. L'écho sera *polysyllabique*.

La même syllabe sera répétée plusieurs fois si l'observateur se trouve au point de croisement des normales de plusieurs surfaces réfléchissantes suffisamment éloignées. L'écho sera dit *multiple*. Deux murs parallèles éloignés peuvent encore produire un écho multiple, de la même manière que deux miroirs parallèles donnent lieu à des images lumineuses multiples.

Quand la réflexion se fait contre des obstacles très voisins, par exemple dans une salle non tapissée de petites dimensions, où les murs, le plancher, le plafond renvoient le son après des temps inappréciables, l'audition des sons réfléchis se confond, syllabe par syllabe, avec l'audition des sons directs et les *renforce*. Si les dimensions de la salle sont plus grandes et telles que la superposition ne soit plus exacte, il en résulte un bourdonnement appelé *résonance*. On atténue les effets de cette résonance en couvrant les murs de draperies, substances non élastiques *qui éteignent les vibrations* parce qu'elles les reçoivent sans entrer elles-mêmes en vibration.)

541. Réfraction du son. — Quand un mouvement vibratoire rencontre la surface de séparation de deux milieux inégalement élastiques, il se décompose en deux parties : l'une revient dans le premier milieu dans une direction généralement différente de la direction incidente, en *se réfléchissant*; l'autre pénètre dans le second milieu en changeant de direction, en *se réfractant*.

La réfraction du son a été démontrée au moyen d'une lentille creuse en collodion remplie d'acide carbonique. On dispose une montre sur l'axe de la lentille, et on promène l'oreille *sur l'axe* de l'autre côté de la lentille jusqu'à ce qu'on entende distinctement le son. Le son cesse d'être entendu si l'on déplace alors l'oreille.

QUALITÉS DU SON

542. Les sons se distinguent les uns des autres par trois caractères ou *qualités* que l'on nomme : **intensité, hauteur, timbre**. Ces qualités du son correspondent aux éléments qui caractérisent toute vibration : **amplitude, nombre et forme (527)**.

1° **Intensité**. — L'intensité nous fait dire du son qu'il est *fort* ou *faible*. Les conditions dont dépend l'intensité résultent d'une loi que l'on démontre théoriquement et d'après laquelle l'intensité est *proportionnelle à la force vive du corps vibrant*⁽¹⁾. L'expression $\frac{1}{2}mv^2$ de cette force vive nous apprend que l'intensité croît avec la masse mise en vibration et par conséquent avec la *masse* du corps sonore. L'intensité augmente aussi avec l'*amplitude* des vibrations, la vitesse *v* étant proportionnelle à l'amplitude. Si le mouvement vibratoire du corps sonore n'est pas entretenu, l'amplitude des vibrations va en décroissant et l'intensité s'affaiblit graduellement.

L'intensité décroît avec la *densité* du milieu par lequel se fait la propagation. Un coup de fusil tiré sur une montagne où l'air est plus raréfié donne lieu à un son moins intense qu'en plaine. La masse agitée pendant la durée d'une vibration décroissant avec la densité du milieu, l'intensité s'annule par une raréfaction extrême. On comprend ainsi que le son ne se propage pas dans le vide (529).

Loi du carré des distances. — Dans un milieu indéfini, la force vive d'une source sonore se communique à un nombre de molécules croissant avec la distance. En effet, le nombre des molécules ébranlées à une distance *r* est proportionnel à la surface $4\pi r^2$ d'une sphère ayant pour centre le corps sonore. Le travail étant uniformément réparti sur cette surface, un centimètre carré *y* possédera une force vive $\frac{A}{4\pi r^2}$, *inversement proportionnelle au carré de la distance à la source*.

(1) Force vive moyenne de la masse agitée pendant la durée d'une vibration.

En acoustique, cette propriété est difficile à vérifier : on observe seulement que le son est d'autant plus faible qu'on s'éloigne davantage de la source sonore.

Si la propagation a lieu dans un cylindre, la force vive se communique à des masses égales dans les sections droites successives du cylindre et se maintient invariable à toute distance de la source. L'intensité ou la force vive sur un centimètre carré de la section reste constante ; de là vient l'usage des *tuyaux acoustiques* qui transmettent la parole à de grandes distances sans affaiblissement.

2° **Hauteur.** — La hauteur nous fait dire d'un son qu'il est *grave* ou *aigu* ; la hauteur dépend exclusivement du *nombre de vibrations* ⁽¹⁾ exécutées en une seconde par le corps sonore, quelle que soit sa nature. Les sons aigus répondent aux vibrations les plus rapides.

La hauteur d'un son ou le nombre de vibrations par seconde ne varie pas quand l'intensité du son s'affaiblit, c'est-à-dire quand l'amplitude des vibrations diminue. La durée d'une vibration d'un corps sonore est donc indépendante de l'amplitude ; cela prouve que les vibrations sonores sont *isochrones* ou de même durée comme les petites oscillations d'un pendule.

3° **Timbre.** — Le timbre nous fait distinguer deux sons de même intensité et de même hauteur rendus par deux instruments différents indépendamment de leur intensité relative. Le timbre est dû à la superposition de divers harmoniques au son principal (589).

MESURE DU NOMBRE DE VIBRATIONS

543. Pour déterminer le nombre absolu de vibrations correspondant à un son donné, on emploie deux procédés :

1° On établit l'*unisson* entre le son étudié et un appareil capable de produire des sons variables, de hauteur connue. L'oreille apprécie très exactement l'unisson. C'est la *méthode de la sirène*.

2° On fait tracer par le corps vibrant une *courbe sinueuse* dont le nombre de sinuosités en un temps connu permet de calculer le nombre de vibrations par seconde. C'est la *méthode graphique*.

(1) Nous appellerons toujours vibration une *vibration double*, ou complète, c'est-à-dire une allée et venue du corps sonore.

544. *Sirène.* — *Principe de l'appareil.* — Une sirène comprend dans sa partie principale un disque qu'on fait tourner d'un mouvement uniforme autour d'un axe A perpendiculaire à son plan. Ce disque

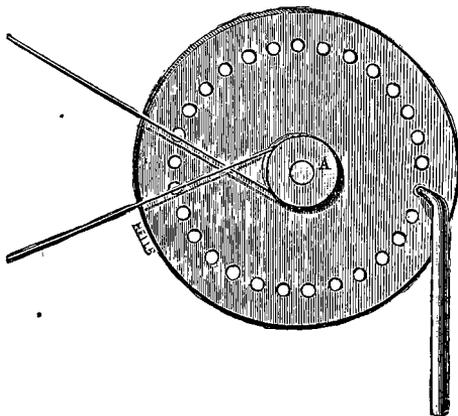


Fig. 365.

est percé d'orifices équidistants distribués sur une circonférence ayant son centre sur l'axe de rotation (fig. 365). En face de ces orifices est fixé un tube communiquant avec une soufflerie ⁽¹⁾ (fig. 366). Au moment où l'ouverture du tube coïncide avec un orifice du disque, le vent de la soufflerie traverse l'orifice du disque et comprime l'air extérieur en le refoulant, mais presque aussitôt par le mouvement du disque une partie pleine intercepte le courant d'air, et l'air extérieur en vertu de son élasticité revient en arrière en se dilatant. Ce double déplacement produit une vibration complète de l'air extérieur.

Si le disque mobile a 30 orifices, une nouvelle coïncidence des orifices a lieu après une rotation de $\frac{1}{30}$ de circonférence : de là une nouvelle sortie de l'air bientôt suivie d'une nouvelle interruption. Pour une vitesse suffisante du disque, les vibrations se fondent en un son dont la hauteur s'élève quand la vitesse de rotation croît. Avec n

(1) Une *soufflerie* se compose d'un soufflet que l'on fait fonctionner au moyen d'une pédale P. L'air est poussé dans un réservoir R dont les parois latérales sont en peau très flexible et arrive par un gros tuyau T dans une caisse AB appelée *sommier*. La paroi supérieure du *sommier* est percée d'une rangée de trous destinés à recevoir des tuyaux. Ces trous sont fermés par des soupapes à ressort qu'on ouvre en pressant sur des touches. On peut accélérer la vitesse du vent en comprimant l'air du soufflet, ce qui se fait soit en chargeant de poids le réservoir du soufflet, soit en appuyant sur une tige CD qui sert à presser plus ou moins ce réservoir.

tours du disque par seconde, le son de la sirène correspond à $30n$ vibrations complètes par seconde.

Pour déterminer la hauteur d'un son, on augmente la vitesse de rotation du disque jusqu'à ce que le son rendu par le disque soit à l'unisson du son étudié. Quand l'unisson est obtenu, on *maintient*

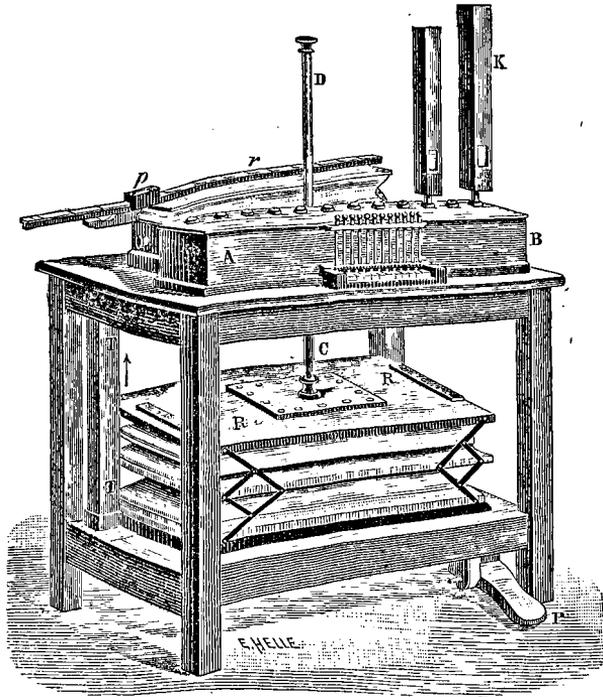


Fig. 366.

constante la vitesse de rotation du disque, et on *compte le nombre de tours* qu'il effectue par seconde.

Cette sirène ne produit que des sons très faibles. Si, au lieu d'avoir un seul tuyau d'échappement de l'air de la soufflerie, on dispose un tuyau en face de chacun des orifices du disque, le courant d'air traversera *simultanément* tous ces orifices et les sorties seront également interceptées à la fois, les 30 ouvertures vibreront donc à l'unisson. Le nombre des vibrations sera donc *le même qu'avec un seul tuyau*, mais l'intensité du son sera notablement augmentée.

545. Sirène de Cagniard-Latour. — Cet appareil n'exige pas de moteur indépendant pour faire tourner le disque, celui-ci est

entraîné par le vent même de la soufflerie et met en outre en mouvement un compteur de tours.

Description. — Cette sirène se compose d'une boîte cylindrique en laiton B dont la base inférieure porte un tube T que l'on monte sur une soufflerie. Sur le centre du plateau fixe F qui forme la base supérieure de la boîte repose un axe vertical A portant un disque mobile D, très voisin du plateau fixe et horizontal comme lui. Le plateau et le disque sont tous deux percés d'un même nombre d'orifices circulaires répartis uniformément sur une circonférence ayant son centre sur l'axe (fig. 367).

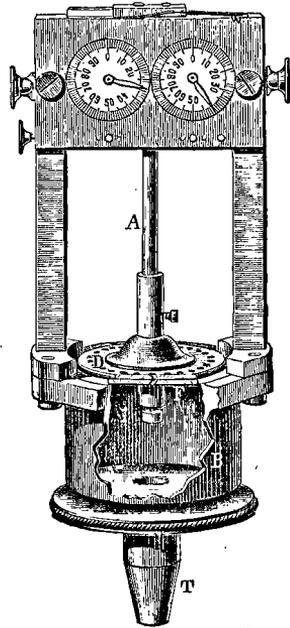


Fig. 367.

Afin de faire tourner le disque par le courant d'air lui-même, les orifices, au lieu d'être percés dans l'épaisseur normalement aux surfaces, sont inclinés à 45° . Les axes de deux orifices en regard, rectangulaires entre eux, se trouvent dans un même plan vertical perpendiculaire en A au rayon OA; sur un plan horizontal mené parallèlement au plateau et au disque, l'axe de rotation se projette en O, et les axes des deux orifices se projettent suivant la tangente MN (fig. 368).

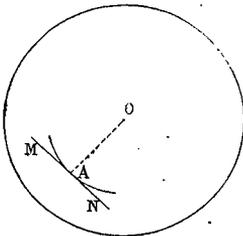


Fig. 368.

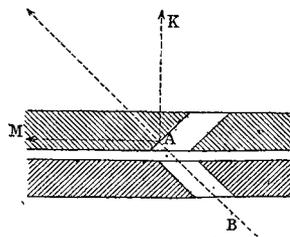


Fig. 369.

malement la paroi de l'orifice superposé et exerce une force qu'on peut décomposer en deux : une composante verticale AK inefficace,

car elle tend à soulever le disque et une *composante horizontale tangentielle*, dirigée suivant AM et faisant tourner le disque (fig. 369).

Le mouvement s'accélère, et, pour une pression donnée de l'air de la soufflerie, il devient *uniforme* quand la résistance due aux frottements arrive à compenser l'accroissement de vitesse provenant du courant d'air.

Le son, d'abord grave, s'est élevé à mesure que la vitesse de rotation croissait, puis sa hauteur est devenue fixe en même temps que le mouvement devenait uniforme.

Compteur de tours. — L'axe de rotation A, entraîné par le disque mobile, porte une vis sans fin v qui engrène avec une roue dentée R dont la circonférence a 100 dents. Cette roue est munie d'une aiguille qui parcourt un cadran ayant également 100 divisions (fig. 370).

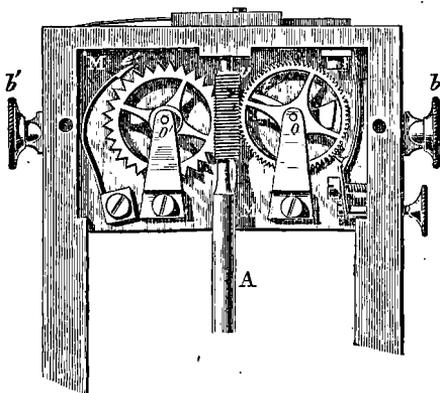


Fig. 370.

A chaque tour du disque, la roue avance d'une dent et l'aiguille d'une division. Pour compter les centaines de tours, la roue R porte sur son axe, parallèlement à un rayon, un *taquet* t qui, à chaque tour de la roue, fait avancer d'une dent une deuxième roue dentée R'

(portant ici 30 dents) située dans le plan du taquet, en arrière du plan de la roue R; la roue R' est munie d'une aiguille qui se déplace sur un deuxième cadran. Les deux roues R et R' sont fixées par leurs axes O et O' sur une même plaque métallique verticale M qu'on peut faire glisser latéralement à l'aide de deux boutons. En poussant le bouton b , on met en prise la roue R et la vis sans fin. En poussant le bouton b' , on désengrène la roue d'avec la vis; en même temps une pointe e s'engage entre deux dents de la roue R et l'arrête immédiatement.

Mesure. — La sirène étant plantée sur la soufflerie, avec les deux aiguilles du compteur au zéro et la roue R désengrenée, on met en marche la soufflerie et on fait varier la vitesse du vent jusqu'à ce que la note rendue par la sirène soit à l'unisson du son étudié; puis, à un instant donné, on appuie à la fois sur le bouton d'un chronomètre à

secondes et sur le bouton *b* pour engrener la roue avec la vis sans fin. Après un certain temps, *l'unisson ayant été maintenu*, on appuie à la fois sur le bouton du chronomètre et sur le bouton *b'* pour désengrener. Le disque mobile tourne encore, mais le compteur de tours ne fonctionne plus. Supposons que la lecture du chronomètre donne 20 secondes pour la durée de l'expérience, que l'aiguille des centaines de tours marque *N* divisions, et l'aiguille des tours *n*, le nombre des tours du disque mobile sera $100N + n$, et le nombre des vibrations doubles pour 20 secondes $(100N + n) 25$ si le *disque mobile* porte 25 trous. On aura pour le nombre des vibrations par seconde :

$$\frac{(100N + n) 25}{20}.$$

La difficulté de l'expérience consiste à maintenir à l'unisson pendant un temps suffisant le son de la sirène et le son à étudier.

En faisant parler la sirène dans l'eau sous l'influence d'un courant d'eau sous pression, on constate qu'elle donne à vitesse égale un son de même hauteur sous l'eau et dans l'air ; la hauteur résulte en effet du nombre de vibrations et ne dépend pas de la nature du corps sonore.

546. Méthode graphique. — Cette méthode où le corps sonore inscrit lui-même ses vibrations est la plus simple et la plus précise.

Sur la surface d'un cylindre *C* mobile autour de son axe on a collé une feuille de papier que l'on recouvre d'une couche non adhérente

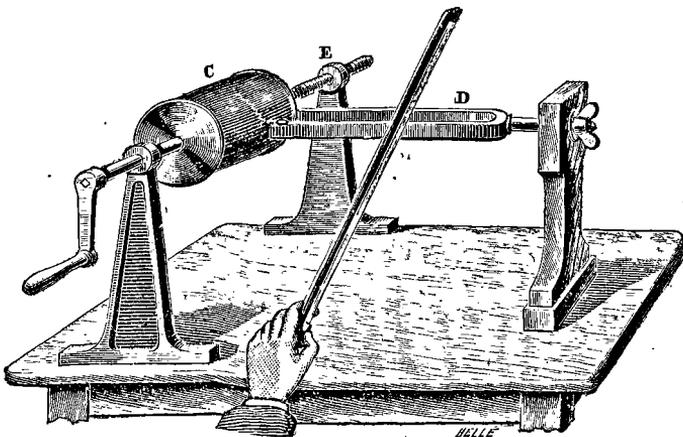


Fig. 371.

de noir de fumée. En tournant, le cylindre dont l'axe est fileté, s'avance dans un écrou fixe E. Au corps sonore D on a fixé un *style*, c'est une pointe fine en laiton très mince, assez légère pour ne pas modifier la vibration; on approche le style de la surface du cylindre (fig. 371). Si le cylindre tourne et se déplace parallèlement à son axe sans que le corps sonore vibre, le style trace une hélice sur la surface couverte de noir de fumée; lorsque le corps sonore vient à être mis en vibration et oscille parallèlement à l'axe du cylindre, l'hélice tracée est *ondulée* et chacune des sinuosités correspond à une vibration double. Les sinuosités sont d'autant plus accusées que l'amplitude des excursions du corps vibrant est plus grande. En un temps donné le nombre des sinuosités croît lorsque le son devient plus aigu.

Dans la courbe représentative que le corps vibrant trace de son mouvement, les *abscisses* sont les temps comptés sur une circonférence perpendiculaire à l'axe du cylindre; les *ordonnées*, parallèles à l'axe du cylindre sont égales aux excursions du style de part et d'autre de sa position moyenne. La pointe du style trace un trait continu qui réunit les extrémités des ordonnées.

Lorsque le cylindre enregistreur possède une vitesse de rotation constante et connue, il suffit de compter les sinuosités comprises entre deux génératrices déterminées pour en déduire le nombre des vibrations par seconde.

Pour deux sons vibrant à l'unisson, le nombre de sinuosités par seconde est le même, quelle que soit leur nature. Le nombre de vibrations d'un corps sonore ne varie pas quand l'amplitude augmente ou diminue (542): les sinuosités restent régulièrement espacées, ce qui prouve que les oscillations sonores durent le même temps ou sont isochrones.

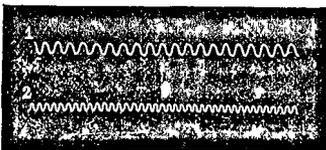


Fig. 372.

Pour deux corps vibrant simultanément et rendant des sons de hauteurs différentes, le rapport des nombres de vibrations dans le même temps est le quotient du nombre des sinuosités comprises entre deux génératrices (fig. 372).

Habituellement, en même temps que le corps sonore étudié, on fait vibrer un diapason dont l'une des branches est également munie d'un style. Les deux pointes tracent sur le cylindre *deux lignes sinuieuses parallèles* dont on compte facilement les sinuosités après avoir déroulé le papier.

Si l'on connaît le nombre absolu des vibrations du diapason, on obtiendra aisément le nombre absolu des vibrations de l'autre corps. Supposons que le diapason de comparaison soit le diapason donnant le *la* normal, dont le nombre de vibrations doubles est 435 par seconde. Si le diapason a tracé 70 sinuosités entre deux génératrices du cylindre enregistreur, et l'autre corps 92, le nombre n des vibrations doubles par seconde sera donné pour ce dernier par la proportion

$$\frac{n}{435} = \frac{92}{70}$$

$$n = \frac{4}{70} \times 435 = 248 \frac{2}{5}$$

Le procédé graphique s'applique à tous les cas.

547. Limite des sons perceptibles. — Pour être perçu, un mouvement vibratoire doit être compris entre certaines limites. Ces limites varient avec les observateurs. On admet généralement comme limites extrêmes 8 et 24 000 vibrations doubles par seconde. Les sons en usage en musique ont pour limites 16 et 4 000 vibrations doubles. Les sons perceptibles embrassent un intervalle de plus de onze octaves, les sons musicaux comprennent environ 8 octaves.

Applications. — 1° La vitesse du son dans l'air à 0° étant 331^m, quelle est la vitesse à 30°?

2° A quelle température la vitesse de propagation du son dans l'air est-elle 336 mètres?

3° On demande la distance qui sépare deux stations, sachant que le bruit du canon a parcouru cette distance en 20 secondes à 22°.

4° Calculer la vitesse du son dans l'hydrogène, lorsque la vitesse dans l'air est 340 mètres.

5° Un cri poussé devant un mur par un observateur lui revient après une seconde et demie. Quelle est sa distance au mur?

6° On laisse tomber une pierre au fond d'un puits, et entre le moment où on l'abandonne et celui où on entend le bruit de sa chute dans l'eau, on compte 3 secondes. On demande la profondeur du puits. On prendra 340 mètres pour vitesse du son et $g = 9^m8$.

7° Quelle est la longueur d'onde dans l'air d'un son dont le nombre des vibrations est 435, la vitesse de propagation du son dans l'air étant 331 mètres?

8° Quelle est la longueur d'onde dans l'air d'un son qui correspond à 40 vibrations par seconde, à une température où la vitesse de propagation dans l'air est 336 mètres?

9° Quelle est la longueur d'onde dans l'eau du son précédent? La vitesse de propagation du son dans l'eau est 1435^m à 8°.

10° Le disque mobile d'une sirène a 24 trous. Quelle est la hauteur du son rendu quand il fait 1104 tours par minute?

SONS MUSICAUX

548. Intervalle de deux sons. — L'audition simultanée ou successive de deux sons produit sur notre oreille une impression particulière qui ne dépend pas de leur hauteur absolue, mais de leur **intervalle** ou de leur rapport.

Si l'on considère quatre sons tels que l'intervalle de A à B soit jugé à l'oreille égal à l'intervalle de A' à B', on constate en mesurant les nombres de vibrations par seconde a et b , a' et b' , que le rapport $\frac{a}{b}$ est égal au rapport $\frac{a'}{b'}$. Pour cette raison, on appelle en acoustique,

intervalle de deux sons le rapport des nombres de vibrations par seconde de ces deux sons. Comme l'usage a prévalu de prendre pour numérateur du rapport le nombre de vibrations du son le plus aigu, un intervalle est toujours exprimé par un nombre supérieur à l'unité.

Notre oreille n'accepte volontiers des sons successifs ou simultanés que si leurs intervalles sont des rapports simples. C'est pour cela qu'en musique on ne passe pas d'un son à un autre par les intermédiaires, et que les sons employés forment des séries où n'entrent que des intervalles spéciaux en petit nombre.

Unisson ; octave. — Lorsque les nombres de vibrations de deux sons sont les mêmes, on les dit à l'*unisson*. Quand l'un fait deux fois plus de vibrations que l'autre dans le même temps, l'intervalle est caractérisé par le nombre 2 et est appelé intervalle d'*octave*.

549. Gamme. — Si nous produisons successivement à partir d'un premier son appelé **tonique**, 6 autres sons offrant avec le premier les intervalles ou rapports $\frac{9}{8}$, $\frac{5}{4}$, $\frac{4}{3}$, $\frac{3}{2}$, $\frac{5}{3}$, $\frac{15}{8}$, classés par ordre de grandeur croissante, nous obtenons 7 sons formant une mélodie⁽¹⁾ type appelée *gamme*.

(1) Dans la *mélodie* les sons sont successifs, dans l'*harmonie* ils sont simultanés.

L'intervalle $\frac{9}{8}$ est dit intervalle de seconde (l'un des corps sonores fait 9 vibrations par seconde pendant que l'autre en fait 8).

L'intervalle $\frac{5}{4}$	est dit intervalle de tierce.
$\frac{4}{3}$	— de quarte.
$\frac{3}{2}$	— de quinte.
$\frac{5}{3}$	— de sixte.
$\frac{15}{8}$	— de septième.

Le musicien à l'habitude de ces intervalles, les reconnaît et les nomme à l'audition. Pour le physicien, ces dénominations conservent leur valeur, mais il les complète en y ajoutant les rapports des nombres de vibrations.

Réduisons ces rapports au même dénominateur, nous aurons :

Unisson	$\frac{24}{24}$	ou encore	$\frac{240}{240}$
Seconde	$\frac{27}{24}$	—	$\frac{270}{240}$
Tierce	$\frac{30}{24}$	—	$\frac{300}{240}$
Quarte	$\frac{32}{24}$	—	$\frac{320}{240}$
Quinte	$\frac{36}{24}$	—	$\frac{360}{240}$
Sixte	$\frac{40}{24}$	—	$\frac{400}{240}$
Septième	$\frac{45}{24}$	—	$\frac{450}{240}$
Huitième	$\frac{48}{24}$	—	$\frac{480}{240}$

Nous voyons que si nous produisons un son faisant 360 vibrations par seconde, puis un autre faisant 240 vibrations, l'intervalle sera l'intervalle de quinte.

Faisons entendre dans l'ordre croissant, à partir du plus grave, 7 sons produisant 240, 270, 300, 320, 360, 400, 450, 480 vibrations, ou encore 120, 135, 150,.... 240, ces 7 sons, définis par l'intervalle qui les sépare du plus grave ou de la *tonique*, forment la *gamme*. Le

nombre des vibrations du premier son est arbitraire, l'impression que produit la gamme n'en dépend pas; pourvu que les intervalles restent les mêmes, les sons peuvent être graves ou aigus.

550. Notes. — Les signes des sons ou *notes* de la gamme ont reçu des noms particuliers. Voici les noms adoptés en France, avec les intervalles de chaque note à la première

	<i>ut</i>	<i>ré</i>	<i>mi</i>	<i>fa</i>	<i>sol</i>	<i>la</i>	<i>si</i>	<i>ut</i> ₂
	1	$\frac{9}{8}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{15}{8}$	2

A la suite de cette gamme de 7 notes, on peut former une nouvelle gamme dont les sons ont entre eux les mêmes intervalles que dans la première; cette nouvelle série a pour point de départ la note *ut*₂ :

$$ut_2 \quad ré_2 \quad mi_2 \quad fa_2 \quad sol_2 \quad la_2 \quad si_2 \quad ut_3$$

puis une autre commençant par *ut*₃, etc. La première note d'une gamme et la première note de la gamme consécutive sont à l'intervalle d'octave.

551. Diapason normal. — Pour éviter les variations de hauteur, on a attribué aux notes usitées en musique une hauteur absolue. Le son correspondant à 435 vibrations doubles a été appelé *la*.

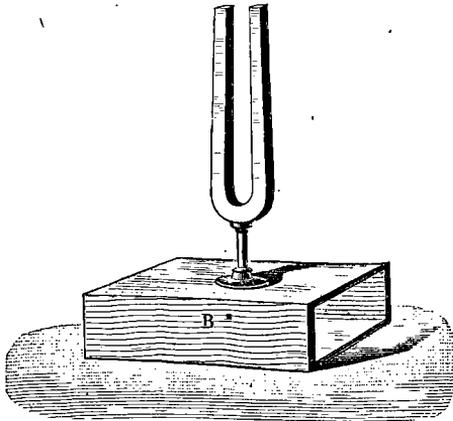


Fig. 373.

Ce *la* est donné par un diapason type (fig. 373) ou *diapason normal* faisant 435 vibrations doubles par seconde à 15°; ce *la* appartient à une gamme dont l'*ut* aura 261 vibrations,

$$435 \cdot \frac{3}{5} = 261.$$

552. Échelle musicale. — La gamme à laquelle appartient ce *la* est dite *gamme fondamentale*; on affecte ses notes de l'indice 3 inscrit à droite et au-dessous de la note :

$$ut_3 \quad ré_3 \dots \quad la_3 \quad si_3.$$

Les gammes plus aiguës ont les indices 4, 5, 6..., les gammes plus graves les indices 2, 1, — 1, — 2... Une gamme peut être comparée à une échelle à échelons irrégulièrement espacés.

L'échelle musicale tout entière comprend environ 8 octaves depuis ut_{-2} , son le plus grave, donné par le plus grand tuyau d'orgue et correspondant à 16,31 vibrations, jusqu'au $ré_7$ de la petite flûte. (Les pianos vont du la_{-2} à l' ut_7 . Autrefois, ut_{-2} correspondait à 16 vibrations, ce qui donnait 256 vibrations pour l' ut_3 et 426,666 pour le la_3 ; la valeur actuelle de l' ut_{-2} provient de la valeur 435 attribuée au la normal (la_3).

L'ensemble des sons de l'échelle musicale sera donc $ut_{-2}...$; $ut_{-1}...$; $ut_1...$; $ut_2...$; $ut_3...$; $ut_4...$; $ut_5...$; $ut_6...$; ut_7 . En partant de ut_3 , voici pour les toniques des gammes successives les nombres de vibrations simples pour les sons les plus aigus :

$$\begin{array}{ll} ut_4 & 261.2 = 522, & ut_5 & 261.2^3 = 1044 \\ ut_6 & 261.2^3 = 2088, & ut_7 & 271.2^4 = 4176 \end{array}$$

et pour les sons plus graves :

$$\begin{array}{ll} ut_2 & \frac{261}{2} = 130,5 & ut_1 & \frac{261}{2^2} = 65,25, \\ ut_{-1} & \frac{261}{2^3} = 32,525, & ut_{-2} & \frac{261}{2^4} = 16,3125. \end{array}$$

Au moyen de ces nombres et des intervalles connus on calculera le nombre de vibrations correspondant à un son musical quelconque.)

553. Accords. — L'émission simultanée de deux ou plusieurs sons séparés par des intervalles musicaux donne un *accord*.

L'accord est dit *consonant* s'il produit une sensation agréable à l'oreille, il est *dissonant* si la sensation est désagréable. Les intervalles consonants sont en petit nombre; l'intervalle le plus consonant est l'unisson $\frac{1}{1}$; puis viennent les intervalles :

d'octave	$\frac{2}{1}$
de quinte	$\frac{3}{2}$
de quarte	$\frac{4}{3}$
de tierce majeure	$\frac{5}{4}$
de tierce mineure	$\frac{6}{5}$

Ce dernier intervalle n'est pas compris dans les intervalles de la gamme définie plus haut.

On voit que les nombres de vibrations qui correspondent à deux sons formant un accord harmonieux sont entre eux comme des *nombres entiers très petits*.

Accord parfait. — La production de trois sons dont les deux derniers présentent avec le premier des intervalles de tierce majeure et de quinte donne un accord dit *accord parfait*; c'est le plus consonnant des accords de trois sons. Tel est l'accord *ut, mi, sol* formé par la première, la troisième et la cinquième note de la gamme.

$$\begin{array}{r} \text{Nombre de vibrations} \quad 1 \quad \frac{5}{4} \quad \frac{3}{2} \\ \text{ou} \quad 4 \quad 5 \quad 6. \end{array}$$

L'accord parfait se retrouve encore avec *fa, la, ut₂* ou avec *sol, si, ré₂*.

554. Intervalles successifs de la gamme. Tons et demi-tons. — Au lieu de calculer dans une gamme l'intervalle entre une note et la première, comme nous l'avons fait plus haut (550), si l'on calcule l'intervalle entre deux notes consécutives, on obtient les rapports suivants :

<i>ré</i> à <i>ut</i>	$\frac{9}{8}$	intervalle dit <i>ton majeur</i> .
<i>mi</i> à <i>ré</i>	$\frac{10}{9}$	— <i>ton mineur</i> .
<i>fa</i> à <i>mi</i>	$\frac{16}{15}$	— <i>demi-ton majeur</i>
<i>sol</i> à <i>fa</i>	$\frac{9}{8}$	— <i>ton majeur</i> .
<i>la</i> à <i>sol</i>	$\frac{10}{9}$	— <i>ton mineur</i> .
<i>si</i> à <i>la</i>	$\frac{9}{8}$	— <i>ton majeur</i> .
<i>ut₂</i> à <i>si</i>	$\frac{16}{15}$	— <i>demi-ton majeur</i> .

Ces 7 intervalles successifs se réduisent à 3 : $\frac{9}{8}$, $\frac{10}{9}$, $\frac{16}{15}$.

De plus, le rapport entre le ton majeur et le ton mineur est : $\frac{9}{8} : \frac{10}{9} = \frac{81}{80}$. Cet intervalle, appelé *comma*, le plus voisin de l'unité

qu'on considère en musique, est regardé comme égal à l'unité. On confond ainsi les deux intervalles $\frac{9}{8}$ et $\frac{10}{9}$, c'est-à-dire le ton majeur et le ton mineur, et on leur donne le même nom de ton. Une oreille exercée perçoit la différence, mais la tolère au point de vue musical. On appelle demi-ton l'intervalle $\frac{16}{15}$ et on définit une gamme : la succession de deux tons et un demi-ton, trois tons et un demi-ton, ce que l'on peut représenter par 2T, t, 3T, t.

555. Dièzes, bémols. — Les besoins de la musique exigent un plus grand nombre de notes que celles que nous avons considérées dans nos gammes successives.

L'échelle musicale se compose [de gammes d'*ut*, ou de gammes naturelles, c'est-à-dire de gammes ayant une note *ut* pour tonique ou pour note la plus grave ; c'est en partant de la note *ut* que nous avons la succession qui forme une gamme :

$$2T, t, 3T, t.$$

Si nous partons d'une autre note comme première note ou comme tonique, par exemple de *sol*, la série des 7 notes qui suivent présente des intervalles successifs qui ne sont pas distribués comme dans la gamme naturelle. On a en effet la série suivante :

$$\begin{array}{cccccccc} \text{sol}_1 & \text{la}_1 & \text{si}_1 & \text{ut}_2 & \text{ré}_2 & \text{mi}_2 & \text{fa}_2 & \text{sol}_2 \\ & & & \frac{10}{9} & \frac{9}{8} & \frac{16}{15} & \frac{9}{8} & \frac{10}{9} & \frac{16}{15} & \frac{9}{8} \end{array}$$

ce qui donne 2T, t, 2T, t, T.

On n'a pas une gamme parce que l'intervalle entre mi_2 et fa_2 est trop petit (un demi-ton au lieu d'un ton) et que l'intervalle entre fa_2 et sol_2 est trop grand (un ton au lieu d'un demi-ton). Multiplions le nombre de vibrations de fa_2 par $\frac{25}{24}$, nous aurons fa_2 dièze. En substituant à fa_2 la nouvelle note fa_2 dièze ou $fa\sharp_2$, le rapport de $fa\sharp_2$ à mi_2 sera $\frac{16}{15} \cdot \frac{25}{24} = \frac{10}{9}$, nous obtiendrons un ton $fa\sharp_2$ et mi_2 ; le rapport de sol_2 à $fa\sharp_2$ sera $\frac{10}{9} \cdot \frac{25}{24} = \frac{16}{15}$, on aura donc un demi-ton entre sol_2 et $fa\sharp_2$.

La nouvelle gamme sera :

$$sol_1 \quad la_1 \quad si_1 \quad ut_2 \quad ré_2 \quad mi_2 \quad fa\sharp_2 \quad sol_2.$$

Diézer une note, c'est la hausser d'un demi-ton en multipliant son nombre de vibrations par $\frac{25}{24}$.

Dans certains cas, au lieu de diézer une note, il faut la baisser d'un demi-ton ou la *bémoliser* en multipliant le nombre de ses vibrations par $\frac{24}{25}$. Ainsi, pour avoir une gamme en partant de la note *fa* (gamme du ton de *fa*), il faut remplacer *si* par *si♭*.

On peut former autant de gammes qu'il y a de notes, mais la seule dont les notes ne sont altérées par aucun *accident* (diéze ou bémol) est la gamme d'*ut* ; on la nomme **gamme diatonique**.

A la gamme d'*ut* correspond l'accord parfait :

$$ut, \quad mi, \quad sol.$$

Chacune des autres gammes est caractérisée par un accord parfait ; ainsi, pour la gamme de *sol*, nous aurons l'accord : *sol si ré*.

(556. **Gamme tempérée.** — On conçoit qu'on peut diézer et bémoliser toutes les notes ; cela donnerait pour une octave complète 21 notes : les 7 notes principales, les 7 notes diézées et les 7 notes bémolisées. Toutes ces notes peuvent être exécutées par un instrument à son variable, tel que le violon ; mais il ne serait pas possible de les conserver dans un instrument à sons fixes, tel que le piano, le doigté serait rendu très difficile par le nombre excessif de touches qui serait nécessaire pour plusieurs octaves. D'ailleurs, plusieurs de ces notes diffèrent de moins d'un comma.

Les musiciens ont adopté pour les instruments à sons fixes une gamme spéciale dite *gamme tempérée* comprenant 12 intervalles consécutifs égaux entre eux ; l'intervalle se nomme *tempérament* ou demi-ton moyen ; il diffère peu du demi-ton. On y confond une note diézée avec la note bémolisée suivante, quoique l'intervalle de ces deux notes soit supérieur à un comma.

Voici les notes de la gamme tempérée avec les intervalles correspondants :

$$\begin{array}{ll} ut = 1 & fa\sharp \text{ ou } sol\flat = \left(\sqrt[12]{2}\right)^6 \\ ut\sharp \text{ ou } ré\flat = \sqrt[12]{2} & sol = \left(\sqrt[12]{2}\right)^7 \\ ré = \left(\sqrt[12]{2}\right)^2 & sol\sharp \text{ ou } la\flat = \left(\sqrt[12]{2}\right)^8 \\ ré\sharp \text{ ou } mi\flat = \left(\sqrt[12]{2}\right)^3 & la = \left(\sqrt[12]{2}\right)^9 \\ mi \text{ ou } fa\flat = \left(\sqrt[12]{2}\right)^4 & la\sharp \text{ ou } si\flat = \left(\sqrt[12]{2}\right)^{10} \\ mi\sharp \text{ ou } fa = \left(\sqrt[12]{2}\right)^5 & si \text{ ou } ut_2\sharp = \left(\sqrt[12]{2}\right)^{11} \\ & si\sharp \text{ ou } ut_2 = \left(\sqrt[12]{2}\right)^{12} \end{array}$$

Les tons entiers de la gamme ordinaire ont été ainsi remplacés par un intervalle décomposable en deux demi-tons moyens.

L'intervalle d'octave est rigoureusement conservé : la tierce et la quinte ont sensiblement la même valeur dans la gamme ordinaire et dans la gamme tempérée.

557. Gammes mineures. — Outre les gammes ordinaires appelées gammes majeures, on emploie aussi en musique des gammes mineures.

Une *gamme mineure* se compose aussi de 5 tons et de 2 demi-tons, mais autrement distribués que dans une gamme majeure.

Les intervalles successifs y sont :

$$T, t, 2T, t, 2T.$$

Telle est, par exemple, la gamme formée de notes naturelles, et ayant *la* pour tonique ou pour première note :

$$la_1 \quad si_1 \quad ut_2 \quad ré_2 \quad mi_2 \quad fa_2 \quad sol_2 \quad la_2.$$

$$\frac{9}{8} \quad \frac{16}{15} \quad \frac{9}{8} \quad \frac{10}{9} \quad \frac{16}{15} \quad \frac{9}{8} \quad \frac{10}{9}$$

A cette gamme mineure correspond un **accord parfait mineur** où la tierce mineure $\frac{6}{5}$ remplace la tierce majeure $\frac{5}{4}$.

$$\text{Nombres de vibrations} \quad 1 \quad \frac{6}{5} \quad \frac{3}{2}$$

ou 10 12 15

cet accord parfait mineur est formé par la première, la troisième et la cinquième note de la gamme mineure :

$$la_1 \quad ut_2 \quad mi_2)$$

558. Harmoniques. — On nomme *harmoniques* des sons dont les nombres de vibrations sont entre eux comme la suite naturelle des nombres entiers 1, 2, 3, 4, 5, 6...

Les sons harmoniques ont en musique un rôle important.

La superposition de deux de ces sons donne un accord d'autant plus consonant qu'ils se trouvent plus bas dans la série. Les deux premiers harmoniques ont un intervalle d'octave, le deuxième et le troisième un intervalle de quinte, le troisième et le quatrième un intervalle de quarte, le quatrième et le cinquième un intervalle de tierce majeure, le cinquième et le sixième un intervalle de tierce mineure.

Certains de ces harmoniques appartiennent à l'échelle musicale des gammes ordinaires ; voici les notes correspondantes en supposant que le son le plus grave est *ut*₁.

Nombre de vibrations n $2n$ $3n$ $4n$ $5n$ $6n$ $7n$ $8n$
 ut_1 ut_2 sol_2 ut_3 mi_3 sol_3 ut_4
 l'harmonique 7 n'appartient pas à la suite des notes de la gamme, il est compris entre la_3 et si_3 , il est voisin de $si\flat_3$.

TUYAUX SONORES

559. Un *tuyau sonore* est un tube à parois résistantes et lisses qui rend un son quand on met en vibration la colonne d'air qu'il renferme.

Embouchure. — On produit ces vibrations à l'extrémité du tuyau par une embouchure.

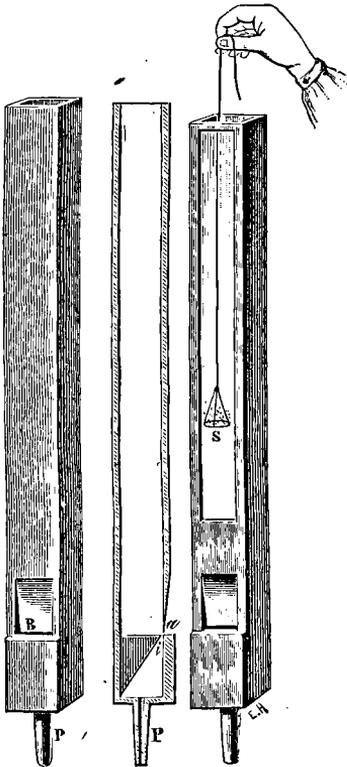


Fig. 374.

Fig. 375.

Dans l'*embouchure de flûte*, l'air qui sort de la soufflerie où il est comprimé traverse un tube P appelé *ped* du tuyau et arrive dans une chambre à air qui est fermée à son sommet à l'exception d'une fente étroite *i* appelée *lumière* par laquelle l'air sort. Le courant d'air vient frapper une lame taillée en biseau *a*, appelée *lèvre*, formant le bord supérieur d'une ouverture transversale B que l'on nomme *bouche* (fig. 374). Le brisement du courant d'air contre le biseau produit une série d'impulsions qui se transmettent à la colonne d'air. L'embouchure rend un mélange discordant de plusieurs sons. Le tuyau, lorsqu'il parle, renforce un de ces sons à l'exclusion de tous les autres.

L'air vibre dans un tuyau sonore. — Dans un tuyau qui résonne et dont une des faces est

fermée par une vitre, on fait descendre, à l'aide d'un cordon, une membrane S tendue sur un cadre et couverte de sable (fig. 375). Le frémissement de la membrane et le sautilllement du sable rendent manifeste l'état vibratoire de l'air du tuyau.

Influence des parois. — Le corps sonore est l'air du tuyau et les parois n'influent pas sur la hauteur du son. Pour le montrer, on dispose sur une soufflerie trois tuyaux de même longueur et de même diamètre, ayant des embouchures identiques, mais de substances différentes : le premier en bois, le deuxième en cuivre, le troisième en carton épais. Les trois sons rendus sont de même hauteur, leur timbre seul diffère. Il faut toutefois que les parois du tuyau ne soient pas très minces, car leurs vibrations modifieraient la hauteur du son.

Influence de la nature du gaz. — La hauteur s'élève quand la densité du gaz diminue. Le son est plus aigu avec l'hydrogène qu'avec l'air et plus grave avec l'acide carbonique.

560. Un tuyau sonore se comporte comme un résonateur. — Un tuyau sonore est un appareil capable de renforcer certains sons déterminés. Pour le montrer, on fait vibrer un diapason D au-dessus d'une éprouvette à pied V contenant de l'eau (fig. 376). On arrive à produire un *renforcement* notable du son du diapason en versant de l'eau dans l'éprouvette jusqu'à une certaine hauteur pour donner à la colonne d'air une *longueur convenable*. Avec un diapason rendant un autre son, le renforcement n'a plus lieu ; on le reproduit en modifiant convenablement la longueur de la colonne d'air.

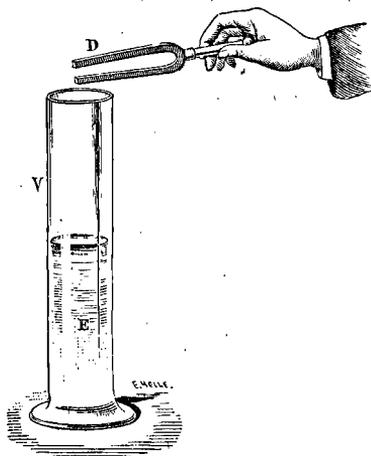


Fig. 376.

De même, les sons rendus par l'embouchure d'un tuyau sont très faibles ; le tuyau renforce considérablement certains d'entre eux.

Un son rendu par un tuyau peut encore être obtenu, sans le secours du courant d'air lancé par la soufflerie, en approchant de la bouche du tuyau un diapason qui rend un son que le tuyau peut renforcer.

LOIS DES TUYAUX CYLINDRIQUES OU PRISMATIQUES

561. Avec les tuyaux cylindriques ou prismatiques dont le *diamètre est très petit par rapport à la longueur*, la hauteur des sons rendus ne dépend pas du diamètre et les sons renforcés suivent des lois simples. Un tuyau droit et un tuyau coudé rendent les mêmes sons s'ils sont de même longueur. Un tuyau d'une certaine longueur étant planté sur une soufflerie, la hauteur des sons rendus par l'embouchure s'élève à mesure que la vitesse du vent de la soufflerie augmente, et les sons renforcés pour des vitesses croissantes du courant d'air sont de plus en plus aigus.

Les sons renforcés diffèrent suivant que l'extrémité opposée à l'embouchure des tuyaux est *fermée* (tuyaux fermés) ou *ouverte* (tuyaux ouverts).

562. Lois des harmoniques. — Tuyaux fermés. — *L'extrémité opposée à l'embouchure est fermée.* Leurs nombres de vibrations sont $n, 3n, 5n, 7n, \dots$. Le son le plus grave est appelé **son fondamental**. Les autres sons renforcés sont des *harmoniques impairs* du son fondamental. On peut obtenir successivement ces différents sons en augmentant la vitesse du vent de la soufflerie et les sons intermédiaires ne sont pas renforcés.

Tuyaux ouverts. — *L'extrémité opposée à l'embouchure est ouverte.* Les nombres de vibrations des sons renforcés sont $n', 2n', 3n', \dots$. Un tuyau ouvert renforce les *harmoniques successifs* du son fondamental.

La vérification expérimentale de ces lois se fait en employant un tuyau long et étroit soit ouvert, soit fermé, monté sur une embouchure de flûte. On accélère graduellement la vitesse du vent en appuyant sur la tige de la soufflerie.

563. Loi des longueurs. — Au lieu d'opérer sur des tuyaux de longueur constante, faisons varier la longueur.

Les nombres de vibrations du son fondamental pour des tuyaux de même espèce (soit ouverts, soit fermés), sont inversement proportionnels aux longueurs. En outre, un tuyau fermé donne le même son fondamental qu'un tuyau ouvert de longueur double.

Si l'on monte sur une soufflerie un tuyau ouvert traversé en son milieu par une coulisse N dont l'une des moitiés est pleine et l'autre évidée (fig. 377), et si l'on fait rendre au tuyau ouvert le son fondamental qui lui est propre, la hauteur du son ne change pas quand on tire la coulisse de façon à substituer la partie pleine à la partie évidée, c'est-à-dire quand on remplace le tuyau ouvert par un tuyau fermé de longueur moitié moindre.

D'après ces lois, pour un tuyau fermé et un tuyau ouvert de même longueur, le son fondamental du tuyau ouvert est l'octave aiguë du son fondamental du tuyau fermé.

n étant le nombre de vibrations du son fondamental d'un tuyau fermé, $n' = 2n$ est le nombre de vibrations du son fondamental du tuyau ouvert de même longueur.

Cette remarque permet de réunir dans un même énoncé les lois des harmoniques pour les tuyaux ouverts et fermés, en considérant à la fois un tuyau ouvert et un tuyau fermé de même longueur.

564. Série complète des harmoniques. — Désignons par n le nombre des vibrations du son fondamental d'un tuyau fermé, ce tuyau fermé renforcera les sons $n, 3n, 5n, 7n, \dots$ et le tuyau ouvert de même longueur les sons $2n, 4n, 6n, \dots$. Les deux tuyaux fourniront donc la *série complète des harmoniques du son fondamental du tuyau fermé* : $n, 2n, 3n, 4n, 5n, 6n, \dots$, le tuyau fermé renforçant les harmoniques impairs du son n et le tuyau ouvert renforçant les harmoniques pairs.

565. Nœuds et ventres fixes. — *Tuyaux ouverts.* — 1° Dans un tuyau ouvert rendant le son fondamental ($2n$), faisons descendre la membrane couverte de sable qui nous a servi à vérifier l'état vibratoire de la colonne d'air du tuyau (fig. 375), le sable est partout agité sauf au milieu N. Cette tranche immobile est appelée un *nœud*⁽¹⁾; elle peut être remplacée par une cloison fixe; en poussant en ce point une coulisse pleine qui divise le tuyau en deux parties égales, la hauteur du son rendue par le tuyau n'est

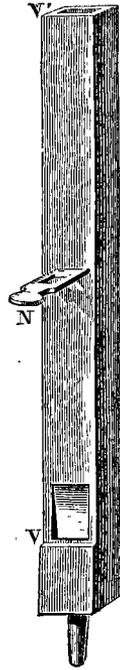


Fig. 377.

(1) Les dénominations de *nœuds* et de *ventres* sont empruntées aux vibrations transversales des cordes (581).

pas changée. Les deux segments égaux NO et NO' du tuyau ouvert *vibrent à l'unisson* (fig. 378).

2° Lorsque le même tuyau ouvert rend son premier harmonique ($4n$), on peut isoler par une coulisse le premier ou le dernier quart du tuyau sans changer la hauteur du son; les tranches N_1 et N_2 sont des tranches de mouvement nul ou des nœuds (fig. 379).

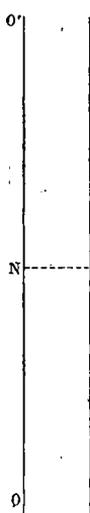


Fig. 378.

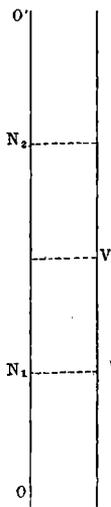


Fig. 379.

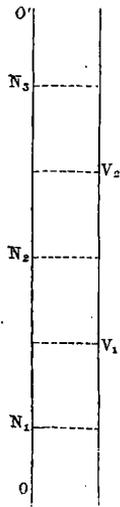


Fig. 380.



Fig. 381.



Fig. 382.

Au milieu de l'intervalle $N_1 N_2$ le mouvement de la membrane couverte de sable est maximum : cette tranche s'appelle un **ventre**. On peut y pratiquer une ouverture sans changer la hauteur. Si l'on fait au milieu V du tuyau une ouverture qui se ferme avec une plaque de bois mobile, on peut, lorsque le tuyau rend son premier harmonique, ouvrir ou fermer l'opercule sans que le son change. Le son changerait si l'on ouvrait un opercule qui couvre un nœud (fig. 381). La tranche V pouvant ainsi communiquer avec l'air extérieur, sa force élastique est égale à la pression atmosphérique, et le tuyau peut alors être considéré comme formé de deux tuyaux ouverts réunis en V et vibrant à l'unisson. On le vérifie en prenant un tuyau ouvert composé de deux tronçons d'égale longueur ajustés l'un sur l'autre (fig. 382), et en faisant rendre à ce tuyau le premier harmonique du son fondamental : le son conserve sa hauteur quand on supprime le tronçon supérieur, ce qui montre bien que les deux tronçons vibraient isolément et à l'unisson.

Chacun des deux tronçons OV et VO' (fig. 379) vibre comme le feraient deux tuyaux ouverts, car il présente en son milieu un nœud où l'on peut passer une cloison : la colonne d'air OO' est donc *subdivisée en quatre fragments vibrant à l'unisson*, ON_1 , N_1V , VN_2 , N_2O' .

3° Lorsque le tuyau ouvert rend son deuxième harmonique ($6n$), on trouve trois nœuds N_1, N_2, N_3 et deux ventres V_1 et V_2 partageant la colonne en *six parties égales*, vibrant à l'unisson (fig. 380).

On peut assimiler les extrémités d'un tuyau ouvert à des ventres, puisque ces extrémités communiquent avec l'atmosphère.

Tuyaux fermés. — Dans un tuyau fermé, on ne trouve ni nœud ni ventre à l'intérieur du tuyau pour le son fondamental, mais on peut assimiler le fond du tuyau à un nœud puisque la tranche qui est en contact avec le fond ne peut se déplacer et l'orifice à un ventre puisque la pression à l'orifice est la pression atmosphérique.

Dans un tuyau fermé, d'après la répartition des nœuds et des ventres, la colonne vibrante présente *trois subdivisions* pour le premier harmonique du son fondamental, *cinq* pour l'harmonique suivant, etc.

566. Vue d'ensemble sur la répartition des nœuds et des ventres.

— En résumé, les nœuds et les ventres sont *fixes* pour un même son rendu, ils sont *équidistants*, ils *alternent*, deux nœuds consécutifs étant toujours séparés par un ventre. La répartition a lieu de telle façon qu'un fond solide tient la place d'un nœud et que les extrémités ouvertes sont des ventres. *Les nœuds et les ventres subdivisent la colonne gazeuse d'un tuyau sonore en segments vibrant à l'unisson.* La longueur des segments varie en raison inverse du nombre de vibrations du son rendu. En comprenant dans une même série les sons renforcés par un tuyau fermé et par un tuyau ouvert de même longueur, le nombre des segments est, pour chaque harmonique, précisément égal au numéro d'ordre de cet harmonique (2 pour l'harmonique 2 ; 3 pour l'harmonique 3 ; 4 pour l'harmonique 4, etc...).

567. Étude des nœuds et des ventres par les flammes manométriques. — L'emploi des *tuyaux à flammes manométriques* confirme les résultats déjà obtenus sur la distribution des nœuds et des ventres et démontre en outre que les *nœuds sont le siège de compressions et de dilatations alternatives*. Une portion de la paroi du tuyau est remplacée par une membrane élastique *m* sur laquelle est appliquée une capsule ou boîte cylindrique aplatie que traverse un courant de gaz d'éclairage (fig. 383). Deux ajutages sont adaptés à la capsule, l'un *a* sert à l'arrivée du gaz, l'autre porte un bec où l'on allume le gaz sortant. Si l'on augmente la pression dans le tuyau, le gaz est comprimé dans la capsule et la flamme s'allonge ; si on diminue la pression, la membrane est attirée et la flamme se raccourcit.

Aux ventres, la pression du gaz ne varie pas, car la flamme est immobile. Aux nœuds, la flamme présente des allongements et des raccourcissements dus à des mouvements du gaz de la capsule qui accompagnent des compressions et des dilatations alternatives de la colonne intérieure. Ces allongements et ces raccourcissements de la flamme se succèdent à de très courts intervalles et se

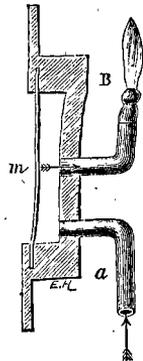


Fig. 383.

superposent à l'œil : on les rend visibles en regardant l'image de la flamme dans un miroir tournant (fig. 384). Aux ventres on voit une bande

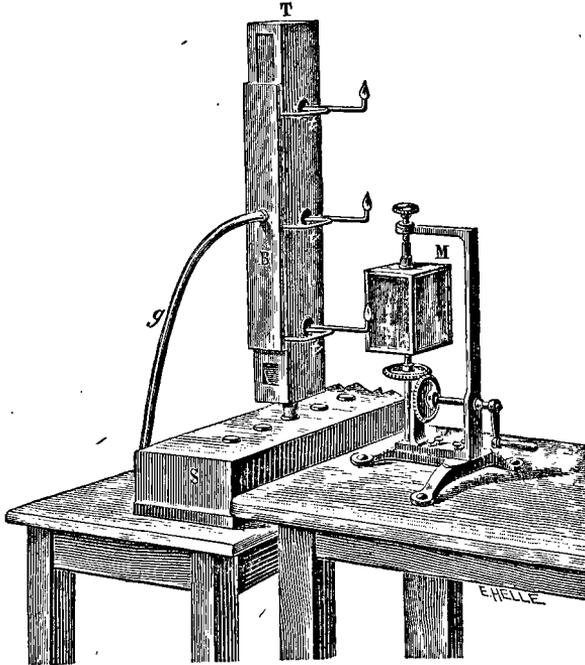


Fig. 384.

lumineuse uniforme, aux nœuds on voit des interruptions correspondant aux raccourcissements (fig. 385).

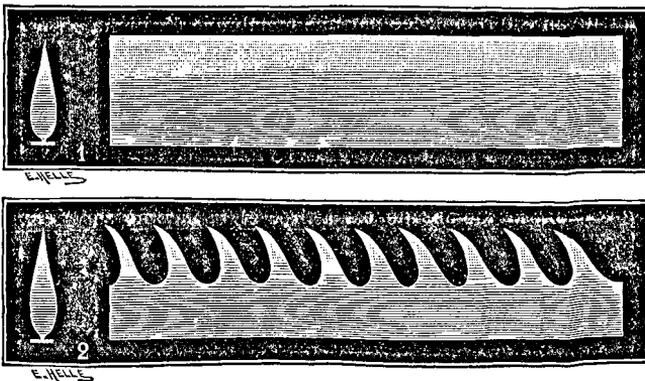


Fig. 385.

568. Longueurs d'ondulation des sons rendus par un tuyau. — La longueur d'ondulation d'un mouvement vibratoire (537) est l'espace λ parcouru par le mouvement vibratoire pendant la durée T d'une vibration; V désignant la vitesse de propagation dans le milieu où ont lieu les vibrations, $\lambda = VT$. D'autre part, n étant le nombre de vibrations par seconde, $nT = 1$ ou $T = \frac{1}{n}$; on déduit de ces deux relations

$$V = n\lambda.$$

Soit un tuyau rendant un son dans l'air, nous déterminerons avec la sirène le nombre n de vibrations, et connaissant V dans l'air, nous calculerons $\lambda = \frac{V}{n}$.

λ étant calculé comme il vient d'être indiqué pour un son déterminé, on constate expérimentalement que la distance de deux nœuds consécutifs est égale à $\frac{\lambda}{2}$ et que la distance d'un ventre et d'un nœud est égale à $\frac{\lambda}{4}$.

569. Nombre absolu de vibrations d'un son renforcé par un tuyau de longueur donnée. — *Tuyaux fermés.* — D'après la subdivision de la colonne gazeuse en segments, le nombre des segments dans un tuyau fermé est *impair* et, comme d'autre part, la longueur de chaque segment est égale à $\frac{\lambda}{4}$, la longueur L du tuyau vaut un nombre impair de fois $\frac{\lambda}{4}$.

$$L = (2k + 1) \frac{\lambda}{4}.$$

$$L = \frac{\lambda_1}{4} \text{ pour le son fondamental.}$$

$$L = \frac{3\lambda_3}{4} = \frac{5\lambda_5}{4} \dots \text{ pour les harmoniques impairs.}$$

Remplaçons λ par $\frac{V}{n}$.

$$L = \frac{V}{4n_1} = \frac{3V}{4n_3} = \frac{5V}{4n_5} = \dots$$

Les nombres absolus de vibrations du son fondamental et des harmoniques renforcés seront

$$n_1 = \frac{V}{4L}, \quad n_3 = \frac{3V}{4L}, \quad n_5 = \frac{5V}{4L} \dots$$

Tuyaux ouverts. — Ici le nombre des segments est *pair* et comme la lon-

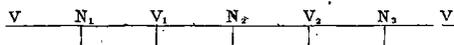


Fig. 386.

gueur de chaque segment est égale à $\frac{\lambda}{5}$, la longueur L du tuyau vaut un nombre pair de fois $\frac{\lambda}{4}$ (fig. 386).

$$L = 2k \frac{\lambda}{4}.$$

$$\text{de là } L = \frac{2\lambda_2}{4} = \frac{4\lambda_4}{4} = \frac{6\lambda_6}{4} \dots$$

$$\text{et } L = \frac{2V}{4n_2} = \frac{4V}{4n_4} = \dots$$

Les nombres absolus de vibrations des sons renforcés seront :

$$n_2 = \frac{2V}{4L}, \quad n_4 = \frac{4V}{4L}, \quad n_6 = \frac{6V}{4L} \dots$$

$\frac{V}{4L}$ est le nombre n_1 de vibrations du son fondamental d'un tuyau fermé de même longueur.

570. Mesure indirecte de la vitesse du son dans les gaz au moyen des tuyaux sonores. — De la relation $V = n\lambda$, on déduira V si l'on sait mesurer n et λ . La mesure de n se fait avec la sirène, la mesure de λ se fait sur le tuyau.

Prenons un tuyau long et étroit ayant pour fond un piston mobile P à tête graduée t (fig. 387). Faisons-lui rendre un harmonique supérieur dont nous déterminons le nombre n de vibrations et déplaçons graduellement le piston de manière à lui faire prendre de nouvelles positions où la hauteur du son redevient la même. Ces positions sont des nœuds (tranches immobiles). Puisque la distance de deux nœuds consécutifs est égale à $\frac{\lambda}{2}$, le déplacement du piston de N en N_1 ou de N_1 en N_2 mesurera $\frac{\lambda}{2}$ (fig. 388).

On peut encore procéder par comparaison. On fait rendre à un tuyau ouvert un harmonique *de même ordre* dans l'air et dans un gaz. La subdivision est la même, car elle est indépendante de la nature du gaz vibrant.

$$L = 2k \frac{\lambda}{4} = 2k \frac{\lambda'}{4}.$$

λ et λ' sont les longueurs d'ondulations des deux sons entendus,

$$\text{d'où } L = 2k \frac{V}{4n} = 2k \frac{V'}{4n'}$$

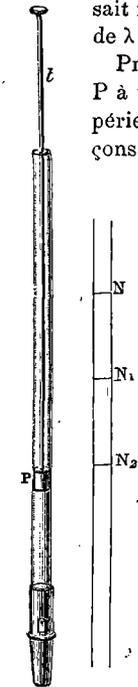


Fig. 387 Fig. 388 n et n' nombres de vibrations des sons rendus par le tuyau

vibrant dans l'air et par le tuyau vibrant dans le gaz; V vitesse de propagation dans l'air, V' vitesse de propagation dans le gaz.

$$\frac{V'}{V} = \frac{n'}{n} \quad \text{d'où} \quad V' = V \frac{n'}{n}.$$

n et n' sont mesurés avec la sirène. On aura V' en multipliant par V (vitesse de propagation du son dans l'air à la température de l'expérience) le rapport $\frac{n'}{n}$.

571. Tuyaux à anches. — Dans ces tuyaux, les sorties périodiques du courant d'air sont réglées par les vibrations d'une lame élastique appelée **anche**.

Dans les tuyaux d'orgue, l'anche est placée à la partie supérieure du tuyau. L'air d'une soufflerie arrive par la partie inférieure d'un tuyau fermé en haut par un couvercle en bois portant un prolongement creux en forme de boîte qui pénètre dans l'intérieur du tuyau (fig. 389). Cette boîte est percée latéralement d'une fente F en forme de rectangle allongé contre laquelle est appliquée une mince lame de laiton t attachée par son extrémité supérieure à l'un des petits côtés de l'ouverture : elle rase les bords de la fente rectangulaire *sans la toucher*. Cette anche est l'anche libre. L'air du tuyau pousse la lame en dedans de la boîte et s'échappe par l'orifice O du couvercle; par son élasticité, la lame revient à sa première position, la dépasse et vibre transversalement. Le nombre d'ouvertures et de fermetures de la fente est égal au nombre de vibrations de l'anche. On rend le son plus aigu en diminuant la longueur de la partie vibrante à l'aide d'une petite tige de métal r appelée *rasette*, passant à frottement dur à travers le couvercle, et pouvant être descendue à volonté; par sa partie recourbée inférieure, elle s'appuie sur l'anche et fait varier la longueur de la partie libre qui est la partie vibrante. Le tuyau renforce un des sons de la languette vibrante.

Dans l'anche battante (fig. 390), la lame élastique l est un peu plus

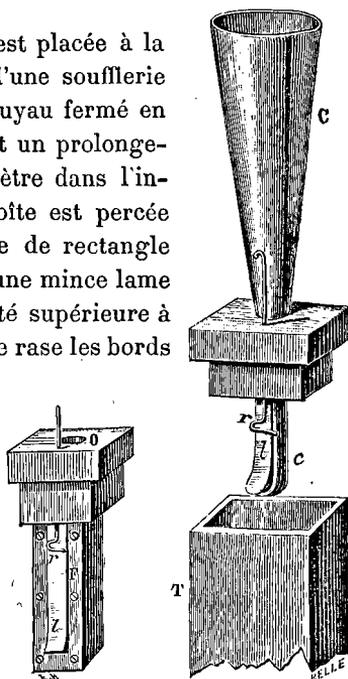


Fig. 389.

Fig. 390.

large que la fente et bat ses bords en vibrant. Cette lame ferme comme une cloison la boîte qui prolonge le couvercle et qui est creusée inférieurement en une sorte de rigole *c*, dans laquelle l'air ne peut pénétrer pour s'échapper, qu'en soulevant la lame élastique.

572. Instruments à vent. — Ce sont généralement des tuyaux droits ou courbés où l'air est mis en vibration dans le sens de la longueur. Le *flageolet*, la *flûte* sont à embouchure de flûte; la *clarinette*, le *hautbois* sont des instruments à anche.

Dans les *orgues* on n'utilise que le son fondamental : chaque note exige un tuyau.

Dans la *flûte*, si les trous sont bouchés, on ne peut obtenir que le son fondamental et ses harmoniques, comme dans un tuyau ouvert de longueur égale à celle de l'instrument; mais si on ouvre un des trous latéraux, on fait naître un ventre comme si le tuyau était ouvert au point où l'ouverture est produite; cela permet d'obtenir des sons intermédiaires entre les harmoniques du tuyau.

Dans le *cornet à piston*, on fait varier la longueur même du tuyau.

LOI DE SIMILITUDE

573. Quand deux corps sonores de même substance et géométriquement semblables vibrent suivant le même mode, leurs nombres de

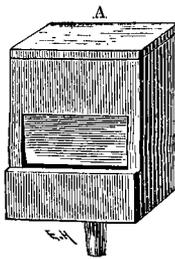


Fig. 391.

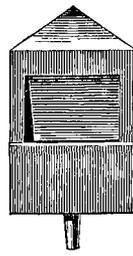


Fig. 392.



vibrations sont inversement proportionnels aux dimensions homologues.

Cette loi générale s'applique aux corps sonores les plus divers : plaques, timbres, cloches, tuyaux de formes variées, semblables⁽¹⁾ et embouchés semblablement, sphériques, cubiques, prismatiques, etc.

(1) Pour les tuyaux, nous avons vu que la nature des parois est indifférente, puisque le corps vibrant est le gaz intérieur.

Plaçons en particulier sur une soufflerie deux tuyaux cubiques semblables dont les dimensions homologues soient dans le rapport de 2 à 1 ; nous constatons que le son produit par le petit tuyau B est à l'octave aiguë de celui du grand tuyau A : il fait par conséquent deux fois plus de vibrations par seconde que le grand tuyau (fig. 391).

Si les dimensions sont dans le rapport de 3 à 2 (fig. 392), le son produit par le petit tuyau est la quinte du son rendu par le plus grand ; le petit tuyau fait 3 vibrations pendant que l'autre en fait 2.

Loi des longueurs des tuyaux. — La loi de similitude conduit à la loi des longueurs pour les tuyaux *longs et étroits* ou pour les tiges vibrant longitudinalement (576).

Considérons en effet deux tuyaux de longueurs différentes contenant le même gaz et rendant un harmonique de même ordre : on peut les supposer géométriquement semblables puisque les dimensions transversales n'ont pas d'influence sur les sons rendus par les tuyaux longs et étroits. Les longueurs sont donc des dimensions homologues et on aura :

$$\frac{n}{n'} = \frac{l'}{l}.$$

Applications. — 1° Quelle est dans l'air à 0° la longueur d'onde du son ut_3 ? Vitesse du son dans l'air à 0° 331 mètres.

2° Un tuyau ouvert de 64,56 centimètres de long est rempli d'air à 10° ; quelle est la hauteur du son fondamental? Vitesse du son dans l'air à 10° 337 mètres.

3° Quelle est la longueur L du tuyau fermé qui, rempli d'air à 10°, donne un son fondamental de 261 vibrations?

4° Le plateau mobile d'une sirène porte 24 trous, il fait 979 tours en une minute. Quelle est la note rendue?

5° Quelle est la longueur L d'un tuyau ouvert ayant à 10° si_3 pour note fondamentale? Le nombre de vibrations de si_3 est $435 \frac{9}{8} = 489,375$.

6° Un tuyau fermé donne $ré_3$ pour troisième harmonique à 10° ; quelle est la longueur L de ce tuyau?

7° Un tuyau donne dans l'air à 10° un son de 256 vibrations par seconde ; plongé dans l'eau il donne 1150 vibrations. La vitesse V du son dans l'air à 10° étant 337 mètres, quelle est la vitesse V' du son dans l'eau?

VIBRATIONS DES CORPS SOLIDES

574. Au point de vue des vibrations qu'ils peuvent produire, les corps solides élastiques peuvent être partagés en plusieurs groupes suivant leur forme et les conditions de l'expérience.

I. *Corps dont la longueur est très grande par rapport à la largeur et à l'épaisseur* : 1° Cordes (flexibles); 2° Verges ou tiges (rigides).

II. *Corps dont la longueur et la largeur sont comparables, mais dont l'épaisseur est trop petite* : 1° Membranes (flexibles); 2° Plaques (rigides).

Des corps de formes quelconques, tels que les timbres, les cloches, les cymbales, les tam-tams peuvent rendre des sons musicaux, mais on ne connaît pas sur leurs vibrations d'autres lois que la loi générale de similitude (573).

Les vibrations transversales des cordes qui produisent les sons de beaucoup d'instruments de musique nous occuperont surtout.

575. Vibrations longitudinales des tiges. — La rigidité d'une tige suffit pour la tenir tendue, et il n'est pas nécessaire qu'elle soit fixée à ses deux extrémités pour être mise en vibration.

Pour produire les vibrations longitudinales des tiges, on les frotte dans le sens de la longueur avec un morceau de drap saupoudré de colophane, ou imbibé d'eau acidulée s'il s'agit de tiges de verre. Comme pour un tuyau sonore, les sons produits ne dépendent pas de la section pourvu que cette section reste *très petite* par rapport à la longueur.

Une tige éprouve en vibrant longitudinalement un *allongement considérable* égal à celui que produirait la traction d'un fort poids. La répétition de l'effort qui met la tige en vibration augmente considérablement l'amplitude du déplacement des molécules et peut amener la rupture de la tige. C'est ainsi que les cordes en fil de fer de *ponts suspendus* ont pu se rompre par suite de l'accroissement de l'amplitude des vibrations dues au mouvement régulier et cadencé d'une troupe en marche.

(**576. Lois des vibrations longitudinales des tiges.** — Ces lois présentent une analogie complète avec les lois des vibrations des tuyaux sonores. Cela tient à ce que les phénomènes produits dans une colonne vibrante ont pour cause première l'élasticité de la matière et se produisent avec une substance quelconque : gaz, vapeurs, liquides et solides. La nature de la substance influe seulement sur la hauteur des sons rendus.

La tige peut être *fixée à l'une des extrémités*, l'autre extrémité étant libre, ou *fixée par le milieu*, les deux extrémités étant libres, ou *fixée aux deux extrémités*.

Pour un mode de vibration déterminé, une même tige peut rendre différents sons. Elle se divise en *segments vibrant à l'unisson*; il y a production

de nœuds et de ventres fixes dont la répartition est la même que dans un tuyau sonore; pour un son déterminé, la distance d'un ventre et d'un nœud consécutifs est $\frac{\lambda}{4}$.

Le son le plus grave est produit par une **tige fixée par un bout**; elle est assimilable à un *tuyau fermé*, l'extrémité fixée se comporte comme un nœud. Le son fondamental d'une tige de même substance et de même longueur fixée par son milieu et libre à ses extrémités est à l'octave aiguë du précédent; la tige est dans ce cas assimilable à un tuyau ouvert, le milieu fixé est un nœud.

Examinons spécialement le cas où les **deux extrémités sont libres**. Les lois sont celles des *tuyaux ouverts*. Les extrémités sont des ventres. Si l'on soutient la tige en son milieu pour lui faire rendre le son fondamental, le milieu est alors un nœud (tranche immobile). La tige rend l'octave aiguë du son fondamental si le point fixé est au quart de la longueur. Les nombres de vibrations du son fondamental et des sons successifs varient comme les nombres entiers consécutifs. Pour des tiges de même nature et de longueurs différentes, le nombre de vibrations du son fondamental est inversement proportionnel à la longueur.

L étant la longueur d'une tige et V la *vitesse de propagation du son dans la substance de la tige*, les nombres des vibrations des sons renforcés (son fondamental et ses harmoniques) seront exprimés par la formule des tuyaux ouverts :

$$n = 2k \frac{V}{4L}$$

577. Mesure indirecte de la vitesse du son dans un solide. — Mettons en vibration une tige libre à ses deux extrémités et faisons-lui rendre un harmonique déterminé, par exemple le deuxième ($k=3$); cet harmonique correspond au partage de la tige en six segments égaux vibrant à l'unisson, le milieu est un nœud. Soit $N_1 N_2$ la distance de deux nœuds consécutifs,

$$N_1 N_2 = \frac{\lambda}{2} = \frac{L}{3}$$

$$\text{ou } \lambda = \frac{2}{3} L.$$

On détermine d'autre part le nombre n de vibrations et l'équation $V = n\lambda$ nous donne $V = \frac{2}{3} nL$.

VIBRATIONS TRANSVERSALES DES CORDES

578. Une corde est un fil en boyau ou en métal, *fixé par ses deux extrémités et tendu*; si on l'écarte de sa position d'équilibre en la tirant perpendiculairement à sa longueur pour l'abandonner ensuite

à elle-même, la corde exécute des oscillations rapides de part et d'autre de sa position rectiligne primitive et on entend un son. Ces vibrations perpendiculaires à la longueur de la corde sont appelées **vibrations transversales**.

Le son rendu est d'autant plus aigu que la corde est plus courte, plus fine, plus tendue et que sa densité est plus faible. Les cordes en boyau, plus légères que les cordes métalliques, rendent un son plus aigu.

579. Lois. — Les lois des vibrations transversales des cordes sont comprises dans une formule qui a été déduite de considérations théoriques, mais qu'on peut vérifier expérimentalement :

$$n = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{Mg}{sD}}$$

n est le nombre de vibrations complètes effectuées en une seconde par une corde *vibrant dans toute sa longueur* (nombre de vibrations du son le plus grave rendu par la corde).

M est le poids tenseur en grammes, Mg sa valeur en dynes .

l longueur de la corde, s sa section, D sa densité. Posons : $s = \pi r^2$

$$n = \frac{1}{2rl} \sqrt{\frac{Mg}{\pi D}}$$

l et r s'expriment en centimètres.

Le nombre de vibrations par seconde du son le plus grave varie donc *en raison inverse de la longueur de la corde, en raison inverse de son diamètre, en raison inverse de la racine carrée de sa densité, proportionnellement à la racine carrée du poids tenseur.*

580. Vérifications expérimentales. — Sonomètre. — Les vérifications expérimentales se font à l'aide du sonomètre.

Le *sonomètre* est une longue caisse rectangulaire en bois de sapin destinée à renforcer les sons (fig. 393).

Sur la face supérieure de la caisse sont fixés deux chevalets triangulaires A et B, parallèles entre eux et distants de 1 mètre. Sur ces chevalets sont tendues deux cordes attachées toutes les deux à l'une de leurs extrémités en H et en H'; à l'autre extrémité l'une des cordes m s'enroule sur une cheville que l'on peut faire tourner avec une clef K de façon à faire varier la tension ; l'autre corde passe sur une poulie

et supporte des poids tenseurs P. Entre les deux chevalets fixes, un chevalet mobile C peut glisser sous cette dernière corde, le long d'une division en millimètres. On limite la longueur de la partie vibrante de

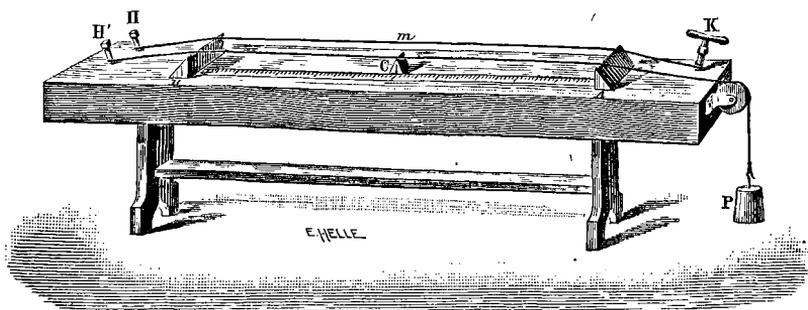


Fig. 393.

la corde en l'appuyant sur le chevalet mobile : la distance comprise entre un chevalet fixe et le chevalet mobile est alors la longueur de la corde.

La corde tendue est droite dans sa position d'équilibre : on provoque ses vibrations transversales soit en la frappant, soit en la pinçant et l'écartant, soit en la frottant perpendiculairement à sa longueur avec un archet enduit de colophane.

Loi des longueurs. — On règle d'abord avec des poids la tension de la corde enroulée sur la poulie, puis on tend l'autre avec la clef pour la mettre à l'unisson. Cette corde sert de corde témoin, elle conserve le premier son pour la *comparaison*.

On pousse le chevalet mobile au milieu de la corde et l'on fait vibrer l'une des moitiés : on a ainsi l'octave aiguë du son de la corde entière. Si l'on place le chevalet au tiers de la corde, en faisant vibrer les $\frac{2}{3}$, on obtient la quinte du son produit par la corde entière. En faisant vibrer le $\frac{1}{3}$ de la corde, on a l'octave aiguë du son obtenu en faisant vibrer les $\frac{2}{3}$.

Longueurs de la corde :	1	$\frac{1}{2}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{1}{3}$
-------------------------	---	---------------	---------------	---------------

Nombres de vibrations :	1	2	$\frac{3}{2}$	3
-------------------------	---	---	---------------	---

Notes : *ut ut₂ sol sol₂*.

En admettant la loi des longueurs, on peut faire usage du sonomètre pour mesurer le nombre des vibrations d'un son quelconque. Soit L la longueur d'une corde vibrant à l'unisson du diapason normal (435 vibrations) et l la longueur de la corde vibrant à l'unisson du son étudié (x vibrations) :

$$\frac{L}{l} = \frac{x}{435}.$$

Loi des diamètres. — On prend deux cordes de même nature ayant des diamètres égaux à 1 et 2, on les place successivement sur le sonomètre en les tendant par le même poids. La corde de comparaison est mise à l'unisson de la corde de diamètre 2; si l'on substitue à celle-ci la corde de diamètre 1, on a l'octave aiguë du premier son.

Loi des tensions. — On tend avec un poids P la corde enroulée sur la poulie et avec la clef on met à l'unisson la corde de comparaison. Si l'on remplace le poids P par un poids $4P$, on a l'octave aiguë de premier son. La corde tendue par un poids $4P$ rend le même son que la corde réduite à la moitié de sa longueur et tendue par le poids P .

Loi des densités. — On opère avec deux cordes de même longueur, de même diamètre et de densités différentes. La première étant tendue avec un poids P , on met à l'unisson la corde de comparaison. On remplace la première corde par la deuxième, tendue par le même poids P et on cherche quelle longueur il faut lui donner pour qu'elle rende le même son de hauteur n . On trouve que les longueurs et les densités des deux cordes sont liées par la relation :

$$\frac{l'}{l} = \frac{\sqrt{d'}}{\sqrt{d}} \quad (1)$$

Soit n' le nombre de vibrations que donnerait la corde de densité d' si elle avait la longueur l ; d'après la loi des longueurs, n' sera donné par la proportion :

$$\frac{n}{n'} = \frac{l'}{l} \quad (2)$$

On sait ainsi qu'une corde de longueur l et de densité d donne un

son n et qu'une corde de même longueur l et de densité d' donnerait un son n' ; d'après les équations (1) et (2) :

$$\frac{n}{n'} = \frac{\sqrt{d'}}{\sqrt{d}}^{(1)}$$

c'est la loi des densités.

Au lieu d'apprécier les intervalles musicaux entre le son de comparaison et les sons rendus par la corde variable, on peut supprimer la corde de comparaison et *mesurer directement avec la sirène* le nombre absolu des vibrations de la corde variable. Il vaut mieux encore fixer sur cette corde un style très léger et lui faire *inscrire ses vibrations* sur un cylindre enregistreur. La vérification pourra ainsi être effectuée avec des longueurs, des diamètres, des tensions et des densités quelconques.

Les vérifications doivent être faites avec des cordes *longues, fines, flexibles et fortement tendues*. En effet, la formule théorique qui résume les lois a été établie en admettant que la corde avait une flexibilité parfaite; or la raideur de la corde agit comme une tension constante qui devrait être ajoutée à la force de tension et qui ne peut être négligée que si elle est faible et la tension considérable.

581. Nœuds et ventres de vibrations. Harmoniques. — Quand on attaque, comme nous l'avons fait dans les expériences précédentes, en un point voisin de son milieu, une corde fixée à ses deux extrémités, on lui fait

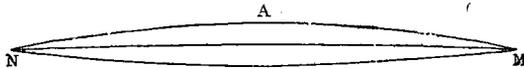


Fig. 394.

rendre le son le plus grave qu'elle puisse rendre ou le **son fondamental**. La corde vibre alors dans toutes ses parties, à l'exception des deux extrémités M et N qui ne se déplacent pas et qu'on appelle *nœuds* de vibration. Le milieu A, où l'amplitude des vibrations est plus grande, est appelé *ventre* de vibration (fig. 394).

Il y a d'autres modes de vibrations pour une même corde. Elle peut encore vibrer *dans sa totalité* en rendant les harmoniques du son fondamental. Si l'on appuie *très légèrement* avec le doigt la corde sur le chevalet mobile placé en son milieu O, et si l'on attaque la corde en une de ses

(1) C'est une loi générale que les corps de faible densité donnent des sons plus aigus que des corps plus denses vibrant suivant le même mode. Une tige de bois qu'on fait vibrer longitudinalement ou transversalement donne des sons plus aigus qu'une tige métallique.

moitiés, le milieu O reste immobile alors que le doigt est enlevé et la corde se divise en deux moitiés vibrant toutes les deux à l'unisson et comme deux cordes de longueur moitié moindre (fig. 395). Le son rendu est l'octave

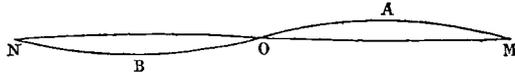


Fig. 395.

aiguë du son fondamental. Les points M, O et N sont des nœuds; A et B sont des ventres. Des cavaliers de papier posés en A et B sont vivement projetés. Les deux moitiés MAO et OBN s'infléchissent au même instant en sens contraires par rapport à la position d'équilibre⁽¹⁾.

En plaçant le chevalet mobile au premier tiers de la corde en P et en appuyant *très légèrement* avec le doigt la corde sur le chevalet, on obtient, si l'on attaque la partie NP avec l'archet, un nombre de vibrations triple de

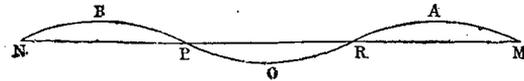


Fig. 396.

celui du son fondamental. La corde s'est subdivisée en trois parties vibrant à l'unisson : N, P, R et M sont des nœuds; A, O, B sont des ventres. Des cavaliers en papier posés en A, O, B sont vivement projetés. Un cavalier posé en R reste immobile (fig. 396.).

On fait rendre à la corde entière, le quatrième, le cinquième harmonique

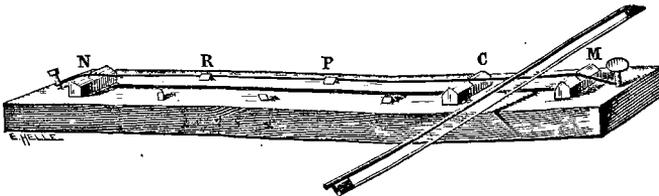


Fig. 397.

du son fondamental, en plaçant le chevalet mobile au $\frac{1}{4}$ de la corde puis au $\frac{1}{5}$ et en attaquant la courte portion de la corde. Les ventres et les nœuds sont équidistants.

La fig. 397 représente le chevalet mobile C placé au quart de la corde; on pose le doigt très légèrement sur C et avec l'archet on met en vibration la

(1) C'est une loi générale pour un corps sonore; en vibrant, il se décompose en segments vibrant à l'unisson et deux segments consécutifs ont *au même instant* des vibrations de sens contraires. Nous l'avons déjà constaté pour les tuyaux sonores.

courte portion de la corde. Le doigt est ensuite enlevé. Les points M, C, P, R, N sont des *nœuds*, les milieux des espaces intermédiaires sont des *ventres*. Des cavaliers en papier posés en P et R restent immobiles, des cavaliers posés au milieu de l'intervalle de deux nœuds sont projetés.



Fig. 398.

Cette subdivision en segments vibrant *simultanément* se manifeste nettement quand on fait vibrer une corde blanche tendue au-dessus d'une table peinte en noir. En raison de la persistance des impressions sur la rétine, nous percevons à la fois la corde dans toutes les positions qu'elle occupe et pour une subdivision en trois parties nous voyons trois fuseaux blancs séparés par des nœuds immobiles P et R (fig. 398).

582. Instruments à cordes. — Dans les instruments à *sous fixes*, à chaque note correspond une corde. Dans le *piano*, on fait varier la longueur, le diamètre et même la nature des cordes pour obtenir les diverses notes. L'une des extrémités est enroulée sur une cheville que l'on tourne pour accorder l'instrument en modifiant la tension. Les vibrations sont produites par le choc de petits marteaux qu'on soulève par l'intermédiaire de touches. Les notes des instruments à sons fixes sont les notes de la gamme tempérée.

Le *violon*, instrument à archet et à *sous variables* n'a que 4 cordes tendues avec des chevilles au-dessus d'une caisse sonore. L'artiste limite avec le doigt la longueur de la partie vibrante. Le son est d'autant plus aigu que la partie comprise entre le doigt et le chevalet est plus courte.

583. Vibrations transversales des tiges. — Les tiges élastiques peuvent vibrer transversalement. Il suffit de les fixer par une extrémité ou par le milieu dans un étau et de les frotter sur l'épaisseur avec un archet.

Les tiges étant rigides tandis que les cordes sont flexibles, les lois des vibrations transversales des tiges ne sont pas les mêmes que les lois des vibrations transversales des cordes.

Une même tige, fixée d'une façon déterminée, peut rendre différents sons et présenter comme les cordes des *nœuds* et des *ventres*. Si l'on fait vibrer une tige plate, recouverte sur sa face supérieure d'une légère couche de sable fin et sec, on voit le sable sautiller sur cette face et se rassembler sur des lignes perpendiculaires à la longueur, ces lignes sont les nœuds ou *lignes nodales*.

Pour des *tiges prismatiques, semblablement assujetties*, la hauteur du son fondamental ne dépend pas de la largeur (dimension perpendiculaire au plan de vibration), elle est proportionnelle à l'épaisseur et en raison inverse du carré de la longueur.

$$n = k \frac{e}{l^2}$$

Une tige rend donc un son d'autant plus aigu qu'elle est plus épaisse et plus courte.

Les lois restent les mêmes si les lames sont courbes au lieu d'être droites.

584. Diapason. — Un diapason est une tige d'acier à section rectangulaire recourbée sur elle-même en forme de fourche; les deux branches sont parallèles ou légèrement convergentes. Pour le faire vibrer transversalement, on écarte brusquement les deux bords d'un diapason en y passant de force un petit cylindre de bois ou de métal. On peut se contenter de frotter l'une des branches avec un archet pour que les deux vibrent à l'unisson (fig. 399).

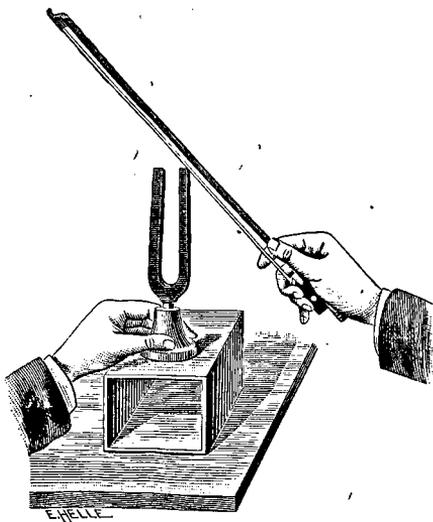


Fig. 399.



Fig. 400.

Le diapason en vibrant présente deux *nœuds* *a* et *b* voisins de la courbure; le sommet *c* de la courbure est un *ventre* (fig. 400). La base de la fourche est prolongée par une tige verticale *p* qui sert à fixer l'instrument sur une *caisse de résonance* ouverte à l'une de ses extrémités. Comme on le voit sur la figure, la base de la fourche subit pendant les vibrations des

déplacements verticaux qui se communiquent à la tige et la font vibrer longitudinalement.

D'après les lois des vibrations transversales des tiges, les diapasons à branches courtes et épaisses donnent des sons aigus ; on a des sons graves avec des diapasons à branches longues et minces.

A une température constante et pour de petites oscillations, un diapason exécute des vibrations isochrones. On l'emploie à la mesure du temps dans un grand nombre de cas : on munit alors l'une des branches d'un style très léger et on lui fait inscrire directement ses vibrations sur un cylindre enregistreur. Si l'expérience doit être prolongée, il est commode d'entretenir le mouvement du diapason avec un électro-aimant (fig. 401) (*électro diapason*) situé entre ses branches et traversé par un courant que le diapason interrompt lui-même périodiquement.

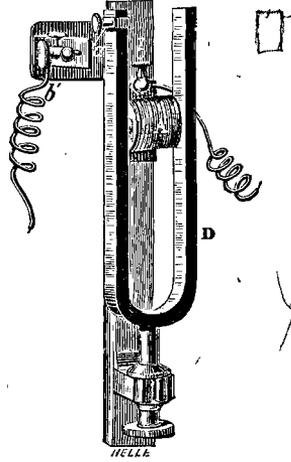


Fig. 401.

Dans un électro-diapason, le fil de l'électro-aimant se termine d'une part à une borne b à laquelle aboutit l'un des conducteurs d'une pile et d'autre part au diapason. Celui-ci porte sur une de ses branches un fil de platine a dont le bout libre se trouve à une très faible distance d'une lame de platine isolée reliée à la pile par une borne b' (fig. 401).

Si l'on fait vibrer le diapason avec un archet, le fil a vient à toucher la lame de platine et ferme le circuit de la pile, le noyau de fer doux de l'électro-aimant A s'aimante et attire les branches d'acier du diapason, le fil a s'éloigne alors de la lame de platine et ouvre le circuit, le circuit est de nouveau fermé au retour des branches du diapason. L'impulsion communiquée par l'attraction du noyau de fer doux se reproduit à chaque oscillation et compense les causes d'affaiblissement de l'amplitude du mouvement.

Le diapason sert d'*étalon de hauteur musicale* et est employé pour accorder les instruments. Un diapason donnant 435 vibrations (870 vibrations simples) par seconde est dit **diapason normal**. Sa note est appelée le la_3 , elle sert à fixer les nombres absolus de vibrations des notes en usage en musique (551).

TIMBRE

585. Des sons de même hauteur et de même intensité rendus par des instruments différents se distinguent par le *timbre*. Nous allons étudier cette troisième différence caractéristique des sons (542) et reconnaître qu'elle est due à la superposition, au son dominant, de plusieurs de ses harmoniques (558).

586. **Vibration par influence ou résonance.** — Un corps sonore se met à vibrer s'il est en présence d'un autre corps sonore produisant un des sons qu'il peut rendre par lui-même. Cette vibration par influence s'appelle *résonance*.

Elle prouve que des ébranlements répétés transmis par le milieu élastique ambiant agissent d'une façon efficace sur un corps sonore en accumulant leurs effets si leur période est celle d'un son que le corps sonore peut émettre.

Le faible son que rend un diapason prend une ampleur considérable si on le pose sur un résonateur ou caisse de résonance⁽¹⁾ de dimensions appropriées formant tuyau sonore, et quand son mouvement vibratoire paraît éteint, il suffit de le placer sur sa caisse pour l'entendre de nouveau.

Prenons deux diapasons munis de leurs caisses de résonance et vibrant à l'unisson, les ouvertures de ces caisses se faisant face à plusieurs mètres de distance. On met en vibration l'un des diapasons en le frottant à plusieurs reprises avec un archet, bientôt le second se met à vibrer; si, en effet, on arrête avec la main le mouvement vibratoire du premier, *le son du second se prolonge seul* et est entendu très nettement.

Quand une corde est attaquée sur un instrument quelconque pendant un temps suffisant, une autre corde d'un autre instrument, par exemple d'un piano, qui peut rendre ce son (ou un de ses harmo-

(1) Les résonateurs ne doivent pas être confondus avec les caisses d'harmonie du sonomètre, du violon et des autres instruments à cordes qui renforcent un très grand nombre de sons.

riques) *entre elle-même en vibration*. (Pour faire l'expérience, on soulève les étouffoirs avec la pédale.) C'est ainsi que plusieurs instruments placés dans une même pièce résonnent quand l'un d'eux est mis en vibration.

La résonance va être utilisée dans l'étude du timbre.

587. Son simple. — Son composé. — Nous savons qu'une corde vibrant transversalement ou une colonne élastique vibrant longitudinalement sont capables de rendre *successivement* un son fondamental et des sons plus aigus qui sont les harmoniques de ce son fondamental. Mais il est très important de remarquer, à propos de la théorie du timbre, que ces harmoniques *coexistent* habituellement avec le son fondamental.

Lorsque, par exemple, une corde vibre transversalement dans toute sa longueur, une oreille exercée peut reconnaître que le son fondamental, qui est le son dominant, est accompagné de sons harmoniques. *En même temps que la corde vibre dans sa totalité, elle s'est subdivisée d'elle-même en 2, en 3, en 4... segments égaux vibrant simultanément.* On appelle *son simple* un son qui ne correspond qu'à un nombre déterminé et unique de vibrations. Les sons simples ne se distinguent entre eux que par l'intensité et la hauteur. Le son, dû à une corde vibrante, ne peut pas être appelé un *son simple*, puisqu'il correspond à des nombres de vibrations $n, 2n, 3n...$ produits simultanément; c'est un *son composé*. Un son, quel que soit son origine, est le plus souvent un son composé et résulte de la superposition de plusieurs sons, de même que la couleur d'un objet naturel résulte habituellement de la superposition de radiations colorées simples.

Les diapasons, les tuyaux sphériques rendent des sons simples. — Il est rare qu'un corps sonore rende un son simple. Un *diapason* émet un son simple parce que les harmoniques qui accompagnent le son fondamental d'un diapason s'éteignent très rapidement. Pratiquement, un *tuyau sphérique* ne renforce également qu'un seul son.

La propriété des tuyaux sphériques de ne renforcer qu'un seul son a été utilisée pour l'analyse des sons. Dans cette application, on les appelle plus spécialement **résonateurs**. Le son d'un de ces résonateurs est d'autant plus aigu que le rayon de la sphère est plus petit.

D'après la loi de similitude (573), les hauteurs des sons renforcés par différents tuyaux sphériques varient en raison inverse de leurs

rayons. On peut donc construire aisément une série de résonateurs rendant des notes déterminées.

588. Résonateurs. — Pour l'analyse des sons, on emploie des *sphères creuses* de verre ou de cuivre S munies de deux orifices oppo-

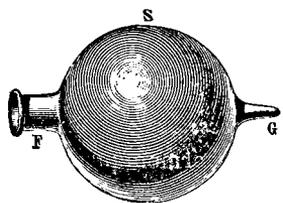


Fig. 402.

sés. Le plus grand F est une sorte de pavillon qui s'ouvre au dehors, l'autre G a la forme d'un col allongé et creux qu'on introduit dans l'oreille (fig. 402). Ce tuyau sphérique vibre bruyamment par influence lorsque le son qu'il peut renforcer est produit devant lui. S'il est relié à une capsule manométrique, ses vibrations se trans-

mettent à la membrane de la capsule et les oscillations de la flamme dans un miroir tournant rendent visible le renforcement.

589. Analyse des sons. — Pour analyser un son, on le soutient pendant quelque temps et on introduit successivement dans l'oreille les conduits de divers résonateurs : les sons des résonateurs qui manifestent un renforcement sont des éléments constituants du son que l'on étudie.

Si l'on présente différents résonateurs à un diapason, par exemple au diapason normal, le son du diapason ne pourra être renforcé que par un seul résonateur ; les autres restent silencieux.

La plupart des sons musicaux sont des sons composés. Supposons deux instruments différents rendant *une même note*, cette note *prédomine* et le nombre de vibrations fourni par la sirène ou par la méthode graphique sera le même dans les deux cas ; mais des *harmoniques s'ajoutent au son principal*. Si l'on a construit une série de résonateurs capables de rendre la note considérée et ses harmoniques successifs, on reconnaîtra pour chaque instrument les harmoniques spéciaux qui accompagnent la même note en introduisant successivement dans l'oreille chacun des résonateurs de la série ; on pourra en outre juger de leur intensité.

L'analyse des sons confirme le rôle important joué en musique par les sons harmoniques. Un son qui n'est pas accompagné d'harmoniques est sourd et peu musical ; un son paraît d'autant plus musical qu'il est plus riche en harmoniques superposés au son principal.

590. Nature du timbre. — Les divers timbres se distinguent par le *nombre*, le *rang* et l'*intensité* des harmoniques superposés au son

qui prédomine; c'est la fusion des sensations dues au son principal et aux sons accessoires qui produit le timbre. Deux corps sonores qui rendent un même son simple ont le même timbre.

591. Synthèse des sons. — L'analyse des sons est due à Helmholtz; il est parvenu dans certains cas à en faire la synthèse. Imaginons une série de diapasons rendant un son déterminé et ses harmoniques successifs. Devant chacun de ces diapasons entretenus électriquement, plaçons le résonateur sphérique qui le renforce; nous pourrons, en ouvrant plus ou moins ou en fermant certains de ces résonateurs, associer au son fondamental un ou plusieurs de ses harmoniques avec une intensité variable et réaliser ainsi des timbres différents par la fusion de ces sons accessoires et du son principal.

592. Distinction entre un son musical et un bruit. — Les sons composés qui ne sont pas formés par la superposition d'harmoniques n'ont pas le caractère musical: ce sont des *bruits* (par exemple le bruit des vagues). *Les bruits résultent donc de la réunion de sons discordants dont les nombres de vibrations ne présentent pas de rapports simples.* On obtiendrait un bruit en faisant parler une sirène dont le disque mobile serait percé de trous irrégulièrement distribués sur une circonférence ayant l'axe pour centre.

593. Étude du timbre par les tracés graphiques. — Les tracés enregistrés par la méthode graphique fournissent un moyen de distinguer les différents timbres. Pour des sons de même hauteur, le nombre des ondulations comprises entre les deux mêmes génératrices du cylindre enregistreur est le même. La forme de ces ondulations varie avec le timbre.

Un son simple, comme le son d'un diapason, est caractérisé par une courbe ondulée régulière, le mouvement vibratoire étant comparable au mouvement d'un pendule (courbe A de la fig. 403, courbe 1 de la fig. 404).

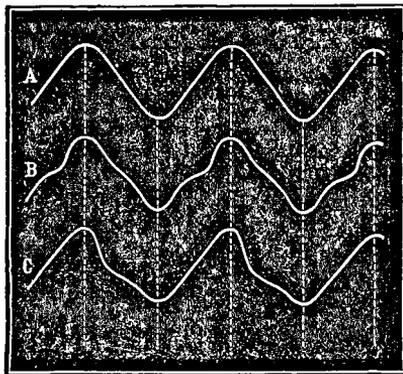


Fig. 403.

Dans le tracé de sons composés de même hauteur, mais de timbres différents qui résultent de la superposition à un même son principal de plusieurs harmoniques qui diffèrent par le rang et les intensités relatives, chaque ordonnée est en chaque point la *somme algébrique de plusieurs ordonnées*. Des tracés où la longueur de l'oscillation est

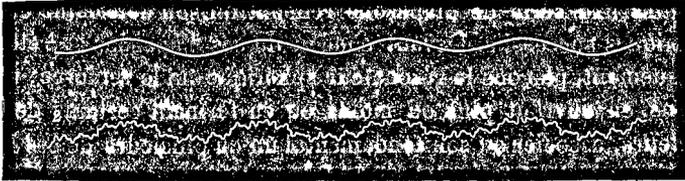


Fig. 404.

la même, mais où les formes sont différentes, proviennent d'une association différente de sons accessoires. La période du son principal étant un multiple entier de la période de chacun des harmoniques, l'addition de ces sons ne modifie pas le nombre des ondulations principales. Dans les figures 403 et 404, les grandes vibrations correspondent au son principal, les sinuosités sont produites par les harmoniques du timbre, des *formes différentes* proviennent d'une association différente de sons accessoires.

594. Phonautographe. — Les tracés graphiques sont fournis par le corps sonore lui-même s'il est possible d'y adapter directe-

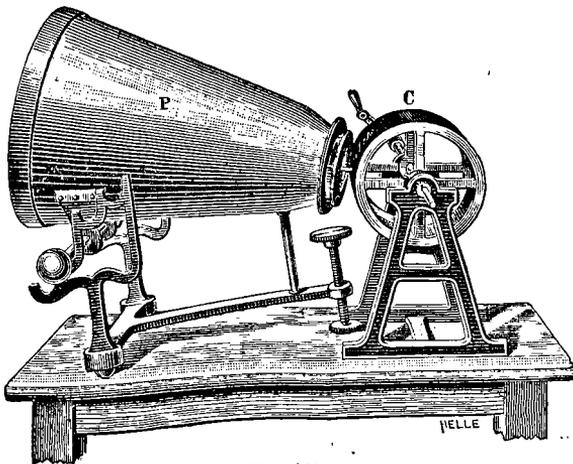


Fig. 405.

ment un style, et par le phonautographe si le corps sonore ne se prête pas à l'inscription directe. Le phonautographe est formé d'une *membrane tendue* dans le plan focal d'un paraboloïde de révolution P. Le corps sonore est placé à l'orifice du paraboloïde qui renforce le son en fonctionnant comme une caisse harmonique. La membrane entre en vibration, et un style très léger fixé perpendiculairement à sa face extérieure inscrit les vibrations sur un cylindre enregistreur (fig. 405). On peut ainsi faire l'étude de la forme des tracés.

595. Phonographe (fig. 406). — Edison a fait servir l'inscription graphique à la *reproduction des sons* qui l'ont produite.

La partie essentielle d'un phonographe est une *membrane élas-*

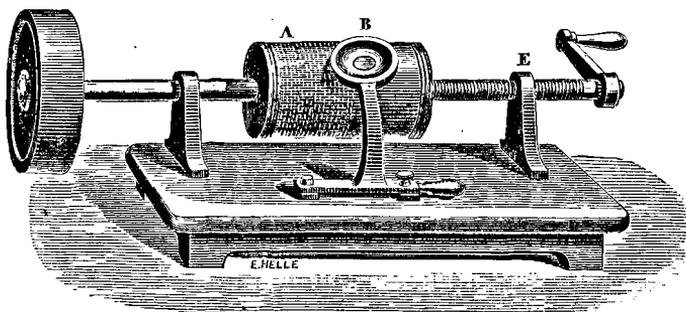


Fig. 406.

tique en verre très mince, fermant l'un des orifices d'un cornet B, devant lequel on produit les sons qu'on veut inscrire et reproduire. La membrane vibre à l'unisson des mouvements oscillatoires variés que l'air lui transmet.

Une pointe *p* implantée normalement à la membrane *a* appuie sur un cylindre de cire A (fig. 407). Quand la pointe est immobile et que le cylindre tourne uniformément en même temps qu'il se déplace suivant son axe dans un écrou E (fig. 406), la pointe trace dans la cire un

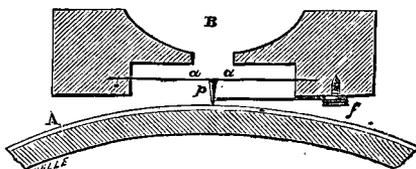


Fig. 407.

léger sillon en spirale de profondeur constante. Si la membrane vibre, la pointe pénètre plus ou moins dans la cire et y inscrit en profondeur des sinuosités dont le nombre et la forme correspondent à la hauteur et au timbre des sons émis. Ce tracé constitue

le *phonogramme* qu'on peut retirer et conserver sans altération.

Pour la reproduction des sons inscrits, qu'ils proviennent d'une conversation, d'un discours ou d'un air de musique, on ajuste le phonogramme sur le cylindre du même appareil et, en partant de l'origine du tracé, on fait appuyer sur les empreintes la pointe fixée à la membrane. Si maintenant, le cylindre *est mis en mouvement dans le même sens que primitivement*, la pointe suit le fond du sillon qu'elle a tracé, le sillon réagit sur la pointe et l'oblige à exécuter de nouveau et avec toutes leurs particularités les mouvements qu'elle a pris pendant l'inscription. Ces mouvements se communiquent à la membrane, lui font répéter les vibrations du tracé et reproduisent les sons primitifs avec leur timbre. Le même phonogramme peut être utilisé pour de nouvelles reproductions.

Applications. — 1° Le marteau interrupteur d'une bobine de Ruhmkorff fait entendre la note fa_2 ; quel est le nombre de vibrations par seconde?

2° Une corde de 50 centimètres de longueur et ayant une masse de 80 grammes exécute 100 vibrations par seconde. Quel est, en grammes, le poids tenseur?

3° Trouver la hauteur du son rendu par un fil d'acier, de densité 7,8 ayant 1 mètre de longueur, 1 millimètre de diamètre et tendu par un poids de 42,54 kilogrammes.

4° Quelle est la note rendue par une corde de 50 centimètres de longueur, pesant 25 31 par mètre, et tendue par un poids de 25 kilos? Quelle est la longueur d'onde de cette note à 10°?

5° Une corde métallique tendue sur un sonomètre donne le son fa_1 de la gamme dont le la_3 correspond à 435 vibrations doubles par seconde. Quels sont les nombres de vibrations qui correspondent aux six premiers harmoniques qui suivent le son fondamental?

6° Deux cordes identiques rendent deux sons à l'intervalle de quinte; le poids tenseur étant 2 kilogrammes pour la note la plus grave, quel est-il pour l'autre?

7° Quelle doit être la vitesse v d'une locomotive qui s'approche d'un observateur pour que le son rendu par le sifflet soit diésé? Température 10°.

HISTORIQUE

596. Les connaissances des anciens en Acoustique tiraient leur origine de la Musique. *Pythagore*, au VI^e siècle avant l'ère chrétienne, s'est beaucoup occupé de la gamme et de ses divisions. *Aristote* savait que le son est le résultat d'un mouvement excité dans le corps sonore et transmis à l'oreille par un milieu; il attribuait l'écho à la réflexion du son; il savait aussi que les impulsions imprimées à l'air par un son aigu sont en plus grand nombre dans un même temps que pour un son grave.

Le P. *Mersenne*, contemporain de Pascal et de Descartes, fut le premier qui parvint à compter les nombres de vibrations qui correspondent aux différents

sons. Vers 1630, il commença par établir expérimentalement les lois des vibrations des cordes sur des cordes très longues, ne faisant qu'un très petit nombre de vibrations par seconde et ne rendant pas de son. Admettant ces lois pour des cordes courtes, vibrant rapidement et rendant un son, on cherche quelle longueur il faut donner à une corde pour la mettre à l'unisson du son étudié.

La sirène de *Cagniard-Latour* date de 1818. L'idée de la méthode graphique est due au physicien anglais *Thomas Young* ; elle a été appliquée pour la première fois par *W. Weber* (1830). Le phonographe a été inventé en 1877 par l'Américain *Edison*.

Chez les Grecs et les Romains, les notes de la gamme étaient désignées par des lettres, comme elles le sont encore en Allemagne et en Angleterre. Au XI^e siècle, *Gui d'Arezzo*, l'inventeur de l'écriture musicale, les représenta par les premières syllabes des premiers vers de l'hymne de la fête de saint Jean-Baptiste.

Les premières expériences méthodiques sur la vitesse du son dans l'air ont été effectuées en 1738 par des membres de l'Académie des Sciences ; les expériences de *Regnault* ont été faites en 1866. *Otto de Guéricke* avait démontré que le son ne se propage pas dans le vide. *Colladon*, en 1827, mesura, sur le lac de Genève, la vitesse de propagation du son dans l'eau.

Les lois des harmoniques des tuyaux ont été formulées par *Daniel Bernouilli*, en 1762 ; le P. *Mersenne* avait fait connaître antérieurement la loi de similitude.

L'origine du timbre, entrevue par *Monge*, a été établie expérimentalement par les recherches d'*Helmholtz*, en 1863.

OPTIQUE

La *lumière* est un agent qui provoque dans notre œil la sensation de la vision. Cette sensation peut être forte ou faible, blanche ou colorée. L'*Optique* est la branche de la physique qui s'occupe des phénomènes produits par la lumière.

597. Corps lumineux. — Tout corps qui émet de la lumière est appelé *source lumineuse*. Parmi les corps de la nature, les uns sont lumineux par eux-mêmes (Soleil, étoiles, flammes, corps incandescents); les autres ne nous deviennent visibles qu'en renvoyant une lumière qu'ils ont reçue; c'est le cas de la plupart des objets qui nous entourent et que nous voyons à la lumière du jour ou à la lumière d'une lampe. C'est aussi le cas de la Lune et des planètes qui n'ont pas de lumière propre et nous renvoient la lumière qu'elles reçoivent du Soleil.

598. Corps transparents, corps translucides, corps opaques. — On appelle *corps transparents* les corps que la lumière peut traverser et au travers desquels on distingue nettement la forme des objets. Les corps transparents *incolores* sont des corps transparents pour toutes les couleurs, tels que l'air et l'eau; les corps transparents *colorés* sont opaques pour certaines couleurs, transparents pour d'autres (verres colorés, dissolutions colorées).

Les corps *translucides* se laissent traverser par la lumière, mais ne permettent pas de distinguer les distances et les contours des objets (papier huilé, verre dépoli).

Les corps *opaques* sont ceux qui interceptent complètement la lumière, comme le bois, le carton, les métaux. Toutefois l'opacité

d'un corps dépend de son épaisseur, les métaux réduits en feuilles très minces sont plus ou moins transparents, tandis que l'air et l'eau, sous une forte épaisseur, absorbent la lumière en notable proportion. La transparence et l'opacité dépendent aussi de la nature des rayons.

PROPAGATION DE LA LUMIÈRE EN LIGNE DROITE

599. Un point lumineux envoie de la lumière *dans toutes les directions*, car il est visible pour tous les observateurs placés autour de lui.

Dans un milieu homogène et transparent, la lumière se propage en ligne droite.

On donne de cette proposition une vérification grossière en disposant parallèlement plusieurs écrans opaques, percés chacun d'un petit trou, et on place toutes les ouvertures B, C... en ligne droite (fig. 408). Suivant la ligne BC on vise une source lumineuse, par

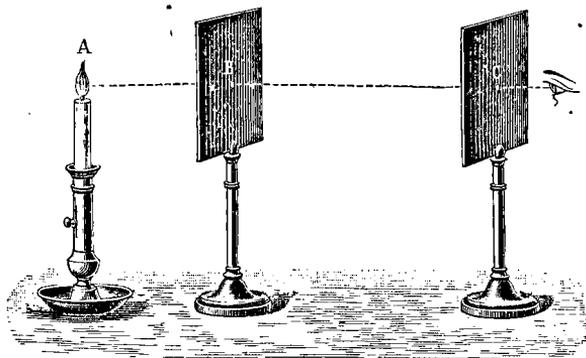


Fig. 408.

exemple la flamme d'une bougie ; si un point A de la flamme se trouve sur la ligne des ouvertures, l'œil aperçoit la lumière. Qu'une seule des ouvertures s'écarte de la ligne qui joint à l'œil le point lumineux, toute lumière est interceptée.

La ligne droite suivie par la lumière est appelée **rayon lumineux**. On appelle *faisceau* un ensemble de rayons issus d'un même point ; dans un milieu homogène, un point lumineux ne peut donner que des faisceaux *coniques*. Un cône lumineux de petite ouverture issu

d'un point lumineux très éloigné est formé de rayons qui peuvent être considérés comme *parallèles*.

La propagation de la lumière en ligne droite est surtout démontrée par ses conséquences; elle donne l'explication du phénomène de la chambre noire et du phénomène des ombres.

600. Chambre noire. — Une *petite ouverture* étant pratiquée dans une paroi MN d'une chambre noire, on voit se dessiner une image des objets extérieurs sur un écran blanc PQ, disposé dans la chambre en face de l'ouverture. Cette image est *renversée, indépendante de la forme de l'ouverture*, et d'autant plus nette que l'ouverture est plus petite et que les objets sont plus éloignés : elle conserve les couleurs des objets représentés.

Considérons un point A de l'objet lumineux : traçons le faisceau

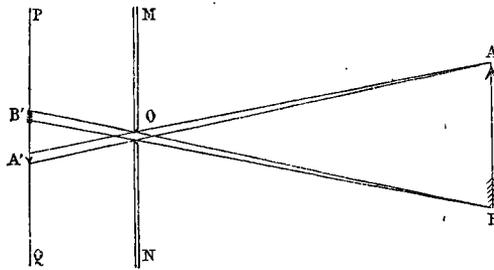


Fig., 409.

conique qui a ce point pour sommet et le contour de l'ouverture pour courbe directrice.

L'écran PQ découpe dans ce cône une petite surface réduite à un point A' si l'ouverture O est assez petite et si le point A est assez éloigné pour que le cône se réduise à son axe AOA'. Le point A' ne reçoit de lumière que du point A, et il n'y a pas de point de l'écran autre que A' qui reçoive de la lumière du point A. De même B' reçoit de la lumière du point B. Les points de l'objet compris entre A et B éclaireront des points de l'écran compris entre A' et B'.

A'B' sera une *image renversée* de AB (fig. 409). Pour une même distance de l'objet lumineux, l'image sera d'autant plus nette que l'ouverture sera plus petite et l'écran plus rapproché de l'ouverture.

Si l'ouverture n'est pas très petite ou si l'écran s'éloigne, l'intersection par l'écran du cône de sommet A ne pourra plus être assimilée à un point : ce sera une tache de dimensions sensibles, géométriquement semblable à l'ouverture si l'écran est perpendiculaire à la

droite qui joint le centre de l'ouverture au point lumineux ; les taches provenant des différents points de AB empièteront alors les unes sur les autres et l'image sera confuse.

601. Image du Soleil. — Si dans une chambre obscure on laisse pénétrer la lumière solaire par une petite ouverture pratiquée dans une paroi, le passage de la lumière est marqué par un cône lumineux à contours *rectilignes* (ce n'est pas l'air qui est illuminé, mais les poussières en suspension dans l'air). Chaque point de l'astre envoie

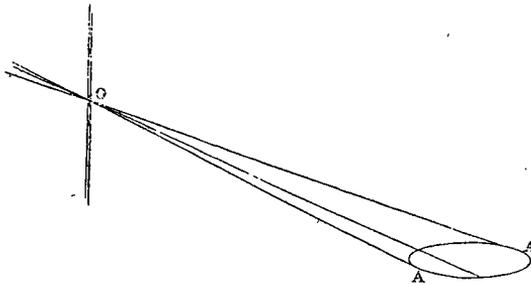


Fig. 410.

sur l'ouverture un faisceau très étroit de rayons sensiblement parallèles qu'on peut réduire à son axe. La section par l'écran d'une surface conique ayant le point O pour sommet et le contour du disque solaire pour directrice donne la forme de l'image. Cette image est *circulaire*, si l'écran est perpendiculaire à la droite qui joint le centre de l'ouverture au centre du disque solaire ; elle est *elliptique* (en AA') pour toute autre position de l'écran (fig. 410).

Ce résultat explique les ronds lumineux que les rayons solaires forment sur le sol en traversant les étroits interstices des feuilles des arbres ; les images du Soleil sont rondes ou elliptiques suivant que la surface du sol est perpendiculaire ou oblique aux rayons solaires. En cas d'éclipse, ces images ont la forme de croissant comme le disque solaire lui-même.

602. Théorie géométrique des ombres. — **Ombre produite par un point lumineux.** — Soit un point lumineux L, et au-devant de lui un corps opaque AB ; menons par le point lumineux un *cône tangent* à la surface du corps opaque : aucun rayon lumineux venant de L ne peut pénétrer dans ce cône au delà du corps opaque, car pour

tout point m intérieur à ce cône, un rayon Lm est intercepté (fig. 411).

La surface du cône d'ombre sépare les points qui reçoivent de la

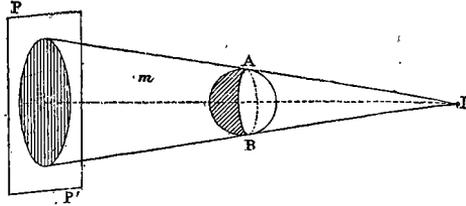


Fig. 411.

lumière du point L et ceux qui n'en reçoivent pas. La trace du cône d'ombre sur un écran PP' limite l'ombre portée sur l'écran par le corps.

Ombre produite par une sphère lumineuse. — Le phénomène change lorsque les dimensions de la source ne sont plus négligeables, ce qui est le cas ordinaire; le passage de la lumière à l'obscurité ne se fait plus brusquement et il existe entre l'ombre et la partie éclairée une région intermédiaire appelée **pénombre** qui n'est éclairée que par une portion de la source.

Nous considérerons le cas où le corps éclairant O et le corps éclairé O' sont deux sphères, et nous prendrons pour plan de la figure un plan quelconque conduit suivant la ligne OO' des centres.

Ombre. — Menons une tangente extérieure commune aux deux cercles d'intersection des sphères par le plan de la figure (fig. 412), elle rencontre en V la ligne des centres; en tournant autour de OO'

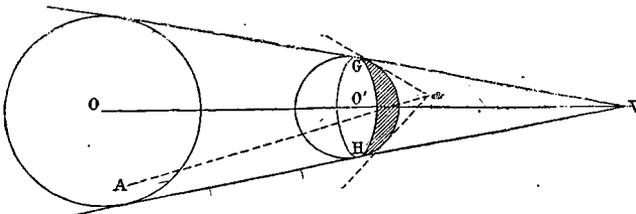


Fig. 412.

et en s'appuyant sur les surfaces des deux sphères, cette tangente décrit un cône tangent extérieurement aux deux sphères; un point a situé dans ce cône au delà de la sphère opaque ne peut recevoir de lumière, car la source est comprise dans le cône mené tangentielle-

ment du point a à la sphère O' , ce qui fait qu'un rayon Aa issu d'un point A de la sphère éclairante est intercepté par la sphère opaque. Tous les points compris dans le cône VGH sont donc dans l'ombre.

Pénombre. — Menons le cône TIJ (fig. 413), circonscrit intérieurement aux deux sphères et obtenu en faisant tourner autour de OO' la tangente intérieure commune TI ; ce cône TIG limite au delà de la sphère opaque O' la région qui est située dans la pénombre.

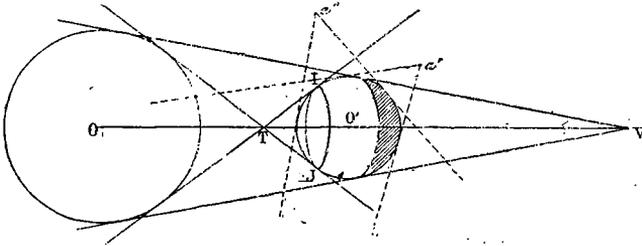


Fig. 413.

Considérons, en effet, un point a' compris dans ce cône au delà de la sphère opaque. Le cône mené tangentielllement à la sphère O' de a' comme sommet ne contient qu'une partie de la source, qui n'éclairera pas a' ; mais a' recevra de la lumière de tous les points de la sphère éclairante qui ne sont pas compris dans ce cône, et sera dans la pénombre. D'après cela, plus un point a' de la pénombre est voisin de l'ombre, plus faible est la partie de la source qui l'éclaire; plus il s'éloigne de l'ombre, plus grande est la partie de la source qui l'éclaire.

Lorsque la sphère O' s'éloigne de la source, l'ouverture du cône de sommet T décroît et pour une même distance de l'écran à la sphère O' l'épaisseur de la pénombre diminue. O et O' ne variant pas de position relative, si l'on rapproche l'écran de la sphère O' , l'épaisseur de la pénombre interceptée sur l'écran diminue. Ainsi l'ombre portée sur un écran horizontal par une sphère éclairée par le soleil n'est entourée que d'une pénombre insensible lorsque la sphère est voisine de l'écran.

Pour un point a'' extérieur aux deux cônes circonscrits extérieurement et intérieurement aux deux sphères, le cône mené tangentielllement à O' de a'' comme sommet ne renferme rien de la source; donc toute droite Aa'' issue d'un point quelconque A de la sphère O parviendra à a'' . Le point a'' sera en pleine lumière.

Prenons comme source lumineuse une bougie S , et plaçons devant cette bougie un écran vertical circulaire E parallèle à un mur de la

salle d'expériences. Nous avons sur le mur une ombre circulaire O entourée d'une pénombre P (fig. 414). L'ombre est intérieure à l'intersection par le mur de la surface conique tangente extérieurement

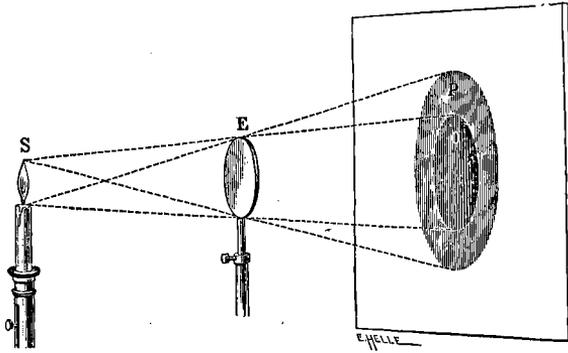


Fig. 414.

à l'écran et à la source. La pénombre a pour limite la trace sur le mur de la surface conique tangente intérieurement à la source et à l'écran.

La théorie des ombres explique le phénomène des éclipses.

VITESSE DE LA LUMIÈRE

603. La propagation de la lumière n'est pas instantanée. Deux observateurs placés à des distances différentes d'une source lumineuse qui apparaît à un moment donné, ne commenceront pas à la voir au même instant *mathématique* : le plus rapproché devra la voir avant le plus éloigné; toutefois, la rapidité de la propagation lumineuse est telle que les distances à la surface de la terre sont trop petites pour qu'on puisse, comme pour le son, constater directement un intervalle appréciable entre l'instant où le phénomène lumineux a lieu et celui où il est perçu à une distance quelconque.

La vitesse de propagation de la lumière est uniforme; dans le vide, elle est sensiblement égale à 300 000 kilomètres par seconde ($3 \cdot 10^{10}$ en centimètres); en une seconde la lumière ferait 7 fois et demie le tour de la terre. La vitesse de propagation de la lumière dans l'air est très peu différente de la vitesse de propagation dans le

vide. Elle est près de un million de fois plus grande que la vitesse de propagation du son dans l'air. On considère pratiquement la vitesse de la lumière comme infinie quand il s'agit d'espaces de quelques kilomètres.

Dans le vide, la vitesse de propagation est la même pour les lumières de diverses couleurs.

La lumière se propage dans les différents milieux homogènes transparents avec une vitesse uniforme propre à chaque milieu.

Dans les milieux plus denses que l'air, la lumière se propage moins vite que dans l'air; en outre, la vitesse de propagation varie dans ce cas un peu avec la couleur : Pour les rayons jaunes, la vitesse de propagation dans le verre est les $\frac{2}{3}$ de la vitesse de propagation dans le vide; la vitesse de propagation dans l'eau est les $\frac{3}{4}$ de la vitesse de propagation dans le vide.

PHOTOMÉTRIE

604. La *photométrie* est la partie de l'optique qui s'occupe de la mesure des intensités lumineuses. Cette mesure se fait à l'aide de photomètres.

Intensité. — On appelle *intensité* d'une source lumineuse la *quantité de lumière* que cette source envoie pendant une seconde sur l'unité de surface (un centimètre carré) recevant normalement la lumière et placée à l'unité de distance.

On dit que deux sources ont la même intensité ou envoient la même quantité de lumière si elles produisent des éclaircissements égaux à la même distance sur deux surfaces identiques qu'elles éclairent séparément et sous la même inclinaison. Les éclaircissements de deux surfaces sont dits égaux si les deux surfaces, semblablement placées par rapport à l'œil, c'est-à-dire dans les mêmes conditions de distance et d'inclinaison, produisent la même sensation. L'œil apprécie assez exactement l'égalité d'éclaircissement pour deux sources de même couleur.

I. Loi du carré des distances. — *L'éclairement produit par une source lumineuse sur une surface qui reçoit normalement les rayons varie en raison inverse du carré de la distance de la source à la surface.*

Nous démontrerons cette proposition expérimentalement avec le **photomètre de Bouguer**.

Ce photomètre (fig. 415) se compose d'un écran translucide (verre dépoli) divisé en deux parties égales par une cloison à faces noircies

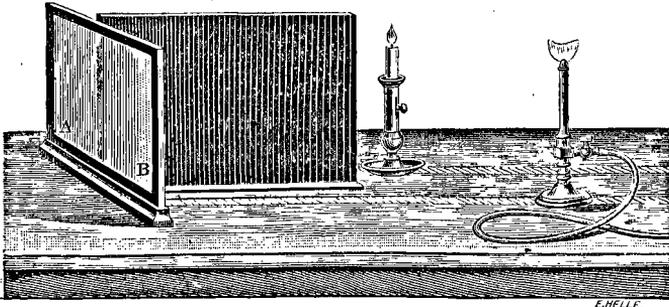


Fig. 415.

perpendiculaire à l'écran. De part et d'autre de la cloison, deux sources éclairent normalement l'écran. L'une des sources éclaire exclusivement la partie A et l'autre la partie B de l'écran.

Deux sources identiques produisent le même éclairement quand on les place à une même distance de l'écran ; *il en est de même pour deux sources de même intensité.*

Nous pouvons admettre que n sources de même intensité placées côte à côte à la même distance d'une surface qu'elles éclairent normalement produisent un éclairement n fois plus grand qu'une seule, ou envoient une quantité de lumière n fois plus grande. Cela posé, plaçons deux bougies égales à une même distance de un mètre de A et de B : l'éclairement est le même. Éloignons l'une des bougies à 2 mètres : l'éclairement qu'elle produit sur la surface correspondante diminue, mais il redevient le même si l'on place à 2 mètres quatre bougies égales à la première ; comme chacune des bougies donne un éclairement égal à $\frac{1}{4}$ de l'éclairement total provenant des quatre bougies, on voit que l'éclairement dû à une bougie est devenu à 2 mètres quatre fois plus petit qu'à 1 mètre, ce qui démontre la proposition énoncée.

Neuf bougies à 3 mètres produiraient le même éclairage qu'une seule à 1 mètre.

Démonstration théorique. — Cette loi peut d'ailleurs être prévue directement.

Considérons en effet différentes sphères concentriques ayant pour centre commun le point lumineux : la quantité totale de lumière émise par ce point parvient en égale quantité sur chacune de ces sphères, sur une sphère de rayon 1 et sur une sphère de rayon 2 ; mais sur la seconde qui a une surface quadruple de la surface de la première, un centimètre carré recevra quatre fois moins de lumière qu'un centimètre carré de la surface de la première.

La quantité de lumière qui tombe sur un centimètre carré d'une sphère de rayon 1 représentant par définition l'intensité de la source, l'éclairage à la distance 2 sera $\frac{1}{4}$ et à la distance D il sera $\frac{1}{D^2}$.

II. Proposition fondamentale de la photométrie. — Si deux sources lumineuses, placées à des distances D et D' de deux surfaces égales qu'elles éclairent normalement produisent un même éclairage L, leurs intensités I et I' sont proportionnelles à D² et à D'², c'est-à-dire aux carrés de leurs distances respectives à ces surfaces.

Cette proposition résulte de la loi de l'inverse du carré des distances.

En effet, d'après cette loi, l'éclairage dû à la première source à la distance D sur l'unité de surface est $L = \frac{I}{D^2}$, la seconde source produisant le même éclairage à la distance D', on a : $L = \frac{I'}{D'^2}$

$$\text{donc } \frac{I}{D^2} = \frac{I'}{D'^2} \text{ ou } \frac{I}{I'} = \frac{D^2}{D'^2}.$$

La proposition s'applique à deux surfaces égales, éclairées sous une même inclinaison, car ces surfaces sont les projections de surfaces égales éclairées normalement et reçoivent la même quantité de lumière que celles-ci.

Pour comparer les intensités de deux sources, il suffit donc de déterminer les distances D et D' auxquelles on doit placer deux surfaces identiques éclairées⁽¹⁾ par chacune des deux sources, pour que

(1) Normalement ou sous la même inclinaison.

l'éclairément soit le même. Les photomètres servent à constater cette égalité d'éclairément.

605. Photomètre de Foucault. — C'est un perfectionnement du photomètre de Bouguer. Dans le photomètre de Bouguer, l'observateur placé derrière le verre dépoli voit deux surfaces éclairées séparées par une ligne d'ombre due à la cloison. Foucault a rendu la cloison R mobile par le jeu d'un pignon et d'une crémaillère, ce qui permet de régler sa position de façon que les deux surfaces éclairées soient *exactement juxtaposées*; on réduit ainsi la ligne de séparation à une ligne géométrique I (fig. 416). Cette juxtaposition des deux surfaces à comparer rend l'appréciation beaucoup plus précise. Laissant immobile l'une des sources, on fait varier la distance de l'autre jusqu'à ce que l'éclairément des deux moitiés de l'écran paraisse rigoureusement le même. Dans le photomètre de Foucault, l'écran translucide est une lame mince de porcelaine ou une lame de verre sur laquelle on a déposé une couche très régulière d'amidon.

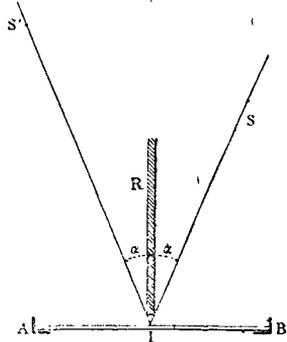


Fig. 416.

606. Photomètre de Rumford. — Devant un écran blanc ver-

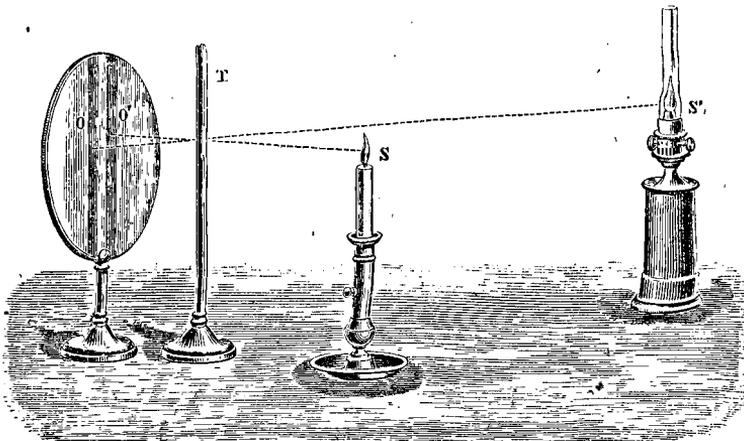


Fig. 417.

tical est disposée une tige opaque également verticale T. Chacune des deux sources projette sur l'écran une ombre de la tige ; l'une des

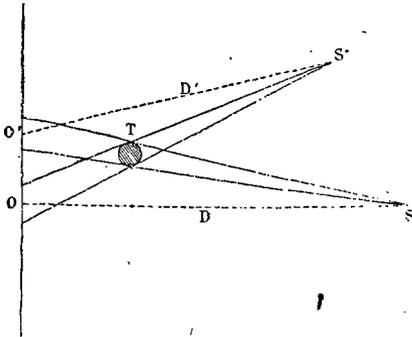


Fig. 418.

deux ombres O n'est éclairée que par la source S, l'autre O' n'est éclairée que par la source S'. On éloigne progressivement la source la plus intense jusqu'à ce que les deux ombres paraissent également éclairées (fig. 417).

Désignons par I l'intensité de la source S, par D sa distance à l'ombre O qu'elle éclaire ; soit I' l'intensité de la source S', et D' sa distance à l'ombre O' qu'elle éclaire (fig. 418).

$$\frac{I}{I'} = \frac{D^2}{D'^2}$$

Pour faciliter la comparaison, on déplace les deux sources de façon à avoir des ombres juxtaposées. Toutefois, la détermination du moment exact où les deux ombres ont le même éclat est difficile.

607. Photomètre de Bunsen. — Ce photomètre, d'un emploi simple et assez précis, consiste en une feuille de papier blanc très

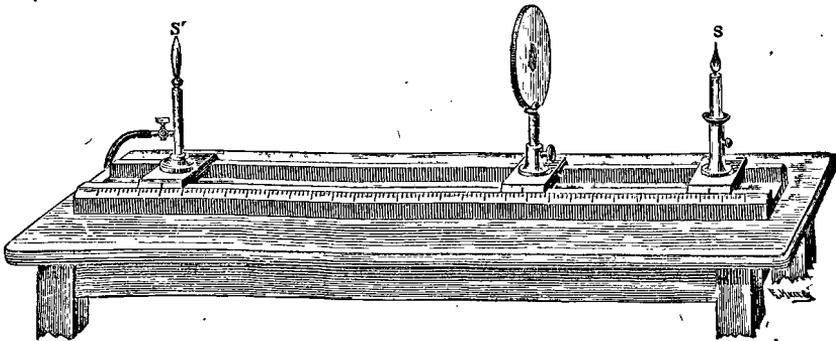


Fig. 419.

fort, tendue sur un cadre et présentant en son milieu une tache translucide faite avec un corps gras. Le cadre est placé perpendiculairement à la ligne qui joint les deux sources lumineuses (fig. 419), la tache étant située sur la ligne des deux sources ; l'expérience

montre que cette *tache disparaît* et que le papier paraît uniformément éclairé lorsque le cadre est à égale distance de deux sources égales. Cette disparition est le signe de l'égalité d'éclairement des deux faces du papier. Si, à ce moment, on rapproche le cadre de la source S en plaçant l'œil du côté de S', la tache vue par transmission du côté où elle reçoit le moins de lumière, apparaît brillante sur un fond sombre ; si le cadre est au contraire plus voisin de la source S', en laissant l'œil du côté de S' on voit une tache sombre sur un fond clair.

Pour comparer deux sources inégales, on les placera de chaque côté de l'écran et on les écartera jusqu'à ce que la tache disparaisse. S étant alors à une distance D, et S' à une distance D', on aura :

$$\frac{I}{I'} = \frac{D^2}{D'^2}$$

Pour faire une mesure, on peut encore placer d'un côté une source constante R, à une distance invariable, et de l'autre côté l'une des deux sources à comparer S à une distance D convenable pour faire disparaître la tache. Laissant R fixe, substituons la source S' à la source S : sa distance à l'écran doit être D' pour que la tache disparaisse. Les deux sources S et S', d'intensités I et I', produisent successivement le même éclairement sur une même surface, pour la

même position de l'œil ; on aura donc $\frac{I}{I'} = \frac{D^2}{D'^2}$.

608. Unité de lumière. — Les intensités lumineuses s'expriment numériquement en unités de lumière. En France, l'unité pratique adoptée est l'*intensité d'une lampe Carcel*, de dimensions fixes, brûlant à l'heure 42 grammes d'huile de colza épurée. On compare, à l'aide d'un photomètre, une source lumineuse quelconque à cette lampe Carcel et on exprime l'intensité en *carcels*. On appelle *carcel-mètre* l'éclairement produit par un *carcel* sur un écran placé à un mètre. C'est l'unité d'éclairement. Dans les mesures scientifiques, une unité d'intensité mieux déterminée, dite *unité absolue*, a été adoptée sur la proposition de M. Violle : c'est l'intensité de la lumière envoyée dans une direction normale par un centimètre carré de la surface d'un bain de platine incandescent amené à sa température de solidification. Cette unité absolue vaut 2,08 carcels.

On prend souvent comme unité secondaire la **bougie décimale**

qui vaut un vingtième de l'unité absolue, c'est-à-dire très sensiblement un dixième de carcel.

Dans les déterminations photométriques que nous avons décrites il n'a été question que de la comparaison de sources lumineuses *de même teinte*. La comparaison exacte de sources diversement colorées exige que l'on opère dans les deux sources successivement sur les diverses couleurs du spectre, les sources de même teinte étant seulement comparables. On se sert pour cette comparaison de *spectrophotomètres*. Pour une même couleur du spectre, les intensités de deux sources sont proportionnelles aux quantités de lumière qu'elles envoient par seconde, à une même distance, sur un centimètre carré de l'écran.

RÉFLEXION

Quand un rayon lumineux tombe sur une surface plane polie, il est renvoyé dans une direction unique en avant du corps poli. C'est le phénomène de la **réflexion régulière**.

LOIS DE LA RÉFLEXION

609. On appelle *rayon incident* une direction rectiligne suivant laquelle la lumière tombe sur la surface polie ; *normale au point d'incidence*, la perpendiculaire à la surface au point d'incidence ; *rayon réfléchi*, la direction suivant laquelle le rayon est réfléchi ; *plan d'incidence*, le plan déterminé par le rayon incident et la normale au point d'incidence ; *plan de réflexion*, le plan du rayon réfléchi et de la normale ; *angle d'incidence*, l'angle du rayon incident et de la normale ; *angle de réflexion*, l'angle du rayon réfléchi et de la normale. Ces deux angles varient de 0° à 90° .

Un rayon qui tombe suivant la normale se réfléchit sur lui-même. A mesure que l'incidence augmente, le rayon réfléchi s'écarte de plus en plus de la normale ; le rayon incident et le rayon réfléchi sont toujours de part et d'autre de la normale.

Lois de la réflexion. — 1° *Le rayon incident et le rayon réfléchi sont dans un même plan perpendiculaire à la surface réfléchissante ;*

ou le rayon incident SI , la normale au point d'incidence IN , et le rayon réfléchi IR sont dans un même plan (fig. 420); ou encore le plan d'incidence et le plan de réflexion coïncident.

2° *L'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence.* L'angle RIN est égal à l'angle SIN ⁽¹⁾.

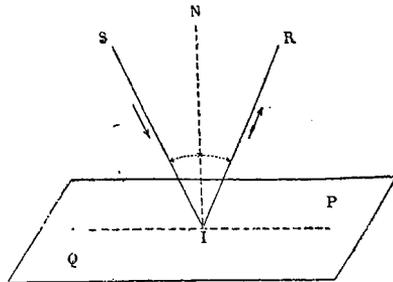


Fig. 420.

610. Démonstration expérimentale des lois de la réflexion.

Un trépied à vis calantes supporte un cercle vertical divisé muni de deux alidades D et E , mobiles autour du centre du cercle (fig. 421). Ces alidades portent deux tubes, fermés à chacune de leurs extrémités par des plaques percées d'une petite ouverture à leur centre. Les axes de ces tubes sont à égale distance du plan du cercle divisé et viennent se couper en M sur la normale élevée au centre du cercle. Perpendiculairement au plan du cercle divisé, est fixé en M un miroir métallique plan et poli, dont la surface est exactement perpendiculaire au diamètre vertical NZ .

Le plan du cercle et le diamètre NZ étant bien verticaux, on dirige un rayon lumineux SE parallèlement au plan du cercle et suivant l'axe de l'un des tubes. Ce rayon vient rencontrer le miroir en M et se réfléchit. En faisant varier la position de la deuxième alidade, on peut la placer de telle façon que le rayon réfléchi suive l'axe du deuxième tube C . Le rayon incident étant parallèle au plan

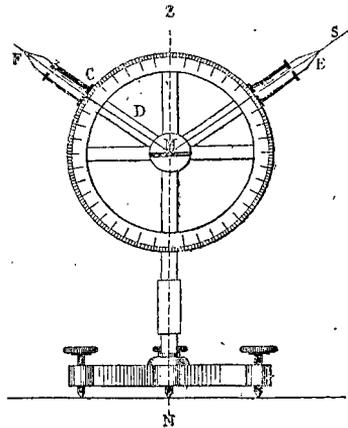


Fig. 421.

du cercle, le rayon réfléchi l'est aussi puisque les axes des deux tubes sont à la même distance du plan du cercle. Le plan du rayon incident et du rayon réfléchi est donc vertical comme le cercle et contient

(1) En désignant par i l'angle d'incidence, la déviation du rayon par la réflexion est $180^\circ - 2i$.

la normale au point d'incidence qui est parallèle au diamètre vertical du cercle. La première loi de la réflexion est donc démontrée.

On voit d'ailleurs que l'alidade mobile DC a pris une position telle que les angles EMZ, FMZ sont égaux, ce qui démontre la deuxième loi.

611. Réversibilité des rayons. — De la coïncidence des plans d'incidence et de réflexion et de l'égalité des angles d'incidence et de réflexion, résulte la *réversibilité des rayons* dans la réflexion; on entend par là que, si on considère un rayon incident EM et le rayon réfléchi correspondant MF, en faisant arriver un rayon dans la direction FM, il se réfléchira suivant ME.

612. Vérification astronomique. — Les deux lois de la réflexion se vérifient avec une grande précision par un procédé astronomique.

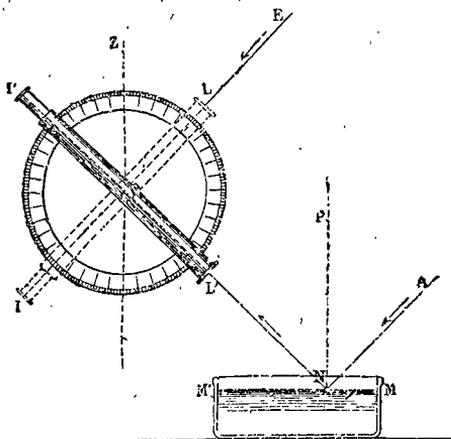


Fig. 422.

Un cercle divisé de centre O est disposé *verticalement* à côté d'un bain de mercure MM' dont la surface libre constitue un miroir plan horizontal (fig. 422). L'axe d'une lunette LI décrit un plan vertical parallèle au plan du cercle divisé. La lunette ayant la position LI, on vise une étoile E et on lit l'angle EOZ. On dirige ensuite la lunette suivant L'I' où elle vise l'étoile par réflexion dans le bain de mercure. On lit l'angle ZOI'.

Le rayon EO et le rayon ON qui suivent l'axe de la lunette dans ses deux positions sont dans un même plan parallèle

au plan du cercle. Comme ce plan est vertical et passe en N, il contient la normale NP au bain de mercure, il contient aussi la parallèle AN à EO qui passe par le point N (AN, vu l'éloignement de l'étoile, est parallèle à EO). Le rayon incident AN, la normale NP et le rayon réfléchi NO sont donc dans un même plan normal à la surface réfléchissante.

Les angles ANP et EOZ ont leurs côtés parallèles et sont égaux, les angles PNO et ZOI' ont leurs côtés parallèles et sont égaux. Les angles mesurés EOZ et ZOI' ayant été trouvés égaux, on en déduit l'égalité en N de l'angle d'incidence ANP et de l'angle de réflexion PNO.

La démonstration des lois de la réflexion résulte aussi de la vérification de ses conséquences et spécialement des propriétés des miroirs.

Miroirs. — On appelle *miroir* une surface parfaitement polie, capable de réfléchir les rayons lumineux.

MIROIRS PLANS

613. Un *miroir plan* est une surface plane réfléchissante. Les normales aux divers points sont parallèles.

Un *miroir plan* donne d'un objet placé devant lui une image symétrique ayant les mêmes dimensions que l'objet. Cela résulte des lois de la réflexion.

1° *Image d'un point.* — Soit un miroir plan et un point lumineux A. De ce point partent des rayons qui se réfléchissent sur le miroir. Considérons un rayon incident quelconque AI et la normale IN au point d'incidence. Abaissons

du point A sur le miroir une perpendiculaire AP, et prolongeons-la au-dessous du miroir. Le plan d'incidence AIN, normal à la surface réfléchissante, contient la perpendiculaire AP. Le rayon réfléchi IR, situé dans le plan d'incidence, coupe en A' la droite AP prolongée. Les deux triangles rectangles API, A'PI sont égaux, car le côté PI est commun et les angles en I

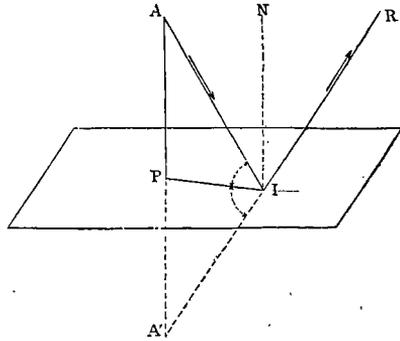


Fig. 423.

sont égaux (AIP et PIA'), l'un est complémentaire de l'angle d'incidence et l'autre est complémentaire de l'angle opposé par le sommet à l'angle de réflexion. Par suite $A'P = AP$ (fig. 423).

La démonstration étant faite pour un rayon incident AI quelconque, tous les rayons réfléchis prolongés vont passer en A'; c'est de ce point que semble partir le faisceau réfléchi reçu dans l'œil. A' s'appelle l'*image* de A. Tous les rayons divergents issus de A divergent de A' après leur réflexion. L'image se fait donc *au-dessous du miroir, à une distance égale à celle du point lumineux, sur la perpendiculaire abaissée de ce point sur le miroir*; en d'autres termes, A' est le *-symétrique* de A. L'œil de l'observateur, quelle que soit sa position

au-dessus du miroir, recevra quelques-uns des rayons réfléchis et verra l'image A' .

2° Image d'un objet. — Soit un objet AD placé devant un miroir MN . La construction géométrique faite pour un point lumineux sera répétée pour tous les points de l'objet ; l'œil verra en A' l'image de A , en D' l'image de D ; les images des différents points de l'objet seront les symétriques de ces points par rapport au miroir. L'image est symétrique de l'objet (fig. 424).

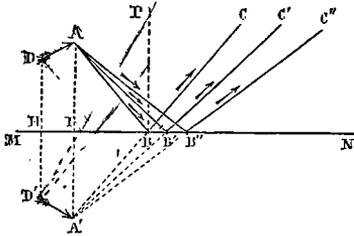


Fig. 424.

Si l'objet est une droite perpendiculaire à la surface du miroir, l'image est une seconde droite symétrique de la première par rapport au plan du miroir ; elle se trouve par conséquent dans le prolongement de l'objet (88).

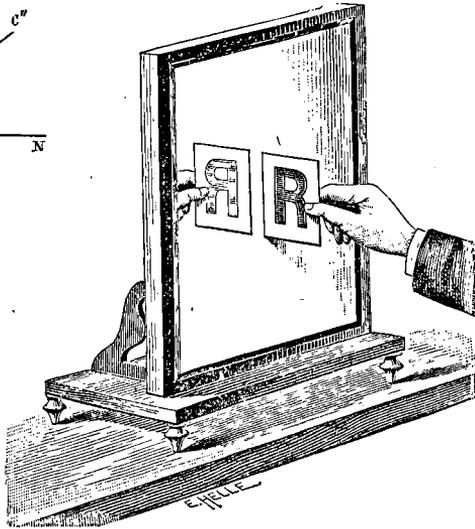


Fig. 425.

L'image d'un objet n'est pas due au concours des rayons réfléchis eux-mêmes, mais au concours de leurs prolongements, ces points de concours ne sont pas lumineux par eux-mêmes puisque la lumière ne passe pas de l'autre côté du miroir ; l'image ne peut donc pas se former sur un écran, elle n'est visible que pour un œil recevant les rayons réfléchis, on la dit *virtuelle*.

L'image diffère à un certain point de vue de l'objet. Une personne regardant son image dans un miroir et étendant son bras droit, voit l'image étendre son bras gauche. Une lettre R vue directement (fig. 425) est dirigée de gauche à droite : vue par réflexion, elle paraît dirigée de droite à gauche.

614. Champ d'un miroir plan pour une position déterminée de l'œil. — La partie de l'espace qui est visible d'un point O après

réflexion sur un miroir, forme le *champ* du miroir; pour la position O de l'œil. D'après la réversibilité des rayons dans la réflexion, les points vus du point O après réflexion sont ceux auxquels arriveraient des rayons réfléchis venant de O . Or on ne voit l'image du point O que si l'on se trouve à l'intérieur du faisceau $PMM'Q$. Les points vus de O seront donc compris dans une pyramide ayant l'image O' de l'œil pour sommet et le miroir pour base (fig. 426).

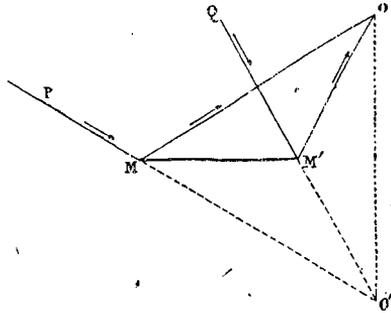


Fig. 426.

Le champ augmente si l'œil se rapproche du miroir.

Réflexion sur deux miroirs plans parallèles

615. Réflexions multiples sur deux miroirs plans parallèles. — Un point lumineux O placé entre deux miroirs plans parallèles donne une *série indéfinie d'images situées sur la perpendiculaire commune abaissée du point O sur les miroirs.*

Pour obtenir la série de ces images, considérons un rayon issu du point O et se réfléchissant en M , il paraît après réflexion venir d'un point a_1 symétrique de O par rapport à M ; ce rayon se réfléchit ensuite sur N et paraît après réflexion venir de a_2 , symétrique de a_1 par rapport à N ; puis il se réfléchit sur M et paraît après réflexion venir de a_3 , symétrique de a_2 par rapport à M ; et ainsi de suite. Une image dans un miroir joue ainsi le rôle d'objet par rapport à l'autre miroir.

Un rayon issu de O , qui se réfléchit d'abord sur N semble venir de b_1 symétrique de O par rapport à N ; après réflexion sur M ,

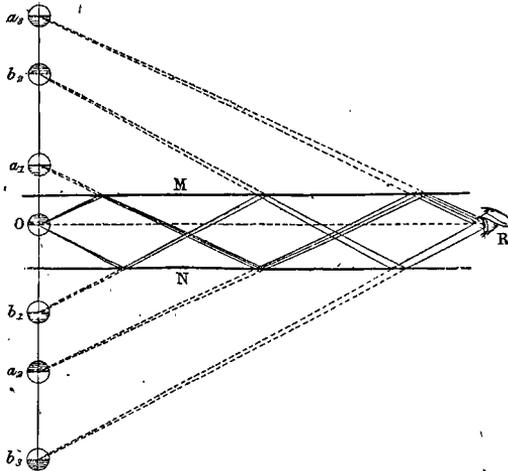


Fig. 427.

il semble venir de b_2 , symétrique de b_1 par rapport à M ; réfléchi ensuite sur N, il vient de b_3 , symétrique de b_2 par rapport à N.

La figure 427 représente la marche d'un rayon dont la première réflexion se fait sur M et dont les réflexions successives font voir les images $a_1, a_2, a_3...$; on voit aussi la marche d'un rayon dont la première réflexion a lieu sur N, et dont les réflexions successives fournissent les images $b_1, b_2, b_3...$

Un observateur situé en R recevra des rayons ayant subi une, deux, trois... réflexions, et pourra voir toutes les images. Théoriquement, le nombre des images est illimité, mais elles sont de moins en moins brillantes à mesure que leur numéro d'ordre s'élève, car chaque réflexion est accompagnée d'une perte de lumière.

Les images sont *non superposables* à l'objet pour un nombre *impair* de réflexions (images d'indices impairs) et *superposables* pour un nombre *pair* de réflexions (images d'indices pairs).

Désignons par D la distance des deux miroirs, par g la distance de O au miroir M, par h la distance de O au miroir N ; les distances des images successives aux miroirs seront :

g distance de a_1 à M		h distance de b_1 à N			
$D + g$	—	a_2 à N	$D + h$	—	b_2 à M
$2D + g$	—	a_3 à M	$2D + h$	—	b_3 à N
$3D + g$	—	a_4 à N	$3D + h$	—	b_4 à M
$4D + g$	—	a_5 à M	$4D + h$	—	b_5 à N

Si nous remplaçons D par $g + h$, les distances à M des images successives vues par un observateur R tourné vers M seront :

$$g, g + 2h, 3g + 2h, 3g + 4h, 5g + 4h...$$

les distances à N des images successives vues par réflexion sur N seront :

$$h, h + 2g, 3h + 2g, 3h + 4g, 5h + 4g...$$

La distance de deux images consécutives est alternativement $2h$ et $2g$. *Reflections sur 2 miroirs inclinés*

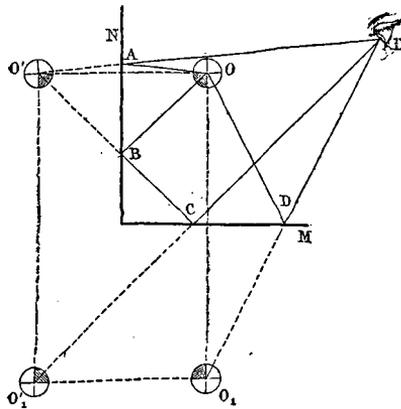


Fig. 428.

616. Images multiples sur deux miroirs rectangulaires.

— Un point lumineux O situé entre deux miroirs rectangulaires M et N (fig. 428), donne trois images : une O' par réflexion sur

N; une O_1 par réflexion sur M; et une troisième O_1' provenant de rayons réfléchis deux fois : soit sur N puis sur M, ou sur M puis sur N. Le point lumineux O et les trois images O' , O_1 et O_1' forment les *sommets d'un rectangle* ayant son plan perpendiculaire à l'intersection des deux miroirs et son centre au point de rencontre des lignes M et N dans ce plan.

^{x mettre après le N° 614.}
617. Miroirs plans recevant des rayons convergents. —

Nous avons supposé jusqu'ici que les rayons incidents divergeaient d'un point lumineux *réel* O : les rayons réfléchis donnaient alors après réflexion un faisceau divergent qui semblait venir d'un point O' *virtuel*, symétrique du point lumineux par rapport au miroir.

Supposons que les rayons incidents suivent une marche inverse et forment un *faisceau convergent* ⁽¹⁾ de sommet O' (fig. 429); le miroir plan réfléchira ces rayons avant leur point de concours et les rayons réfléchis iront se réunir en O, symétrique de O' par rapport au miroir. En effet,

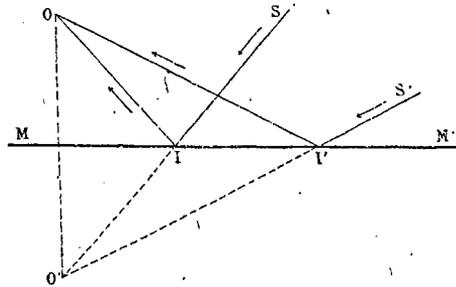


Fig. 429.

d'après la réversibilité des rayons dans la réflexion, un rayon incident SI se réfléchit en IO, et $S'I'$ en $I'O$. Le point O est le point de concours des rayons réfléchis.

Le sommet O' du faisceau incident est dit *virtuel*; le sommet O du faisceau réfléchi est *réel*, car il peut être reçu sur un écran.

Un *objet virtuel* donne par réflexion sur un miroir plan une *image réelle*, symétrique de l'objet par rapport au miroir.

Nous voyons qu'un faisceau incident *convergent* reste convergent après la réflexion; nous avons vu qu'un faisceau *divergent* restait divergent; il est clair qu'un faisceau *parallèle* reste parallèle; la réflexion sur un miroir plan ne modifie donc pas la nature du faisceau incident, elle ne modifie que la direction.

618. Réflexion d'un faisceau de rayons parallèles. — A un rayon incident SI correspond un rayon réfléchi IR, tel que les

(1) Un faisceau incident convergent est un faisceau déjà réfléchi sur un miroir concave ou réfracté par une lentille convergente.

angles i et r soient égaux (fig. 430) ; à un rayon incident $S'I'$ parallèle à SI correspond un rayon réfléchi $I'R'$ tel que $i' = r'$, i' étant égal à i , r' est égal à r et les deux rayons réfléchis sont parallèles.

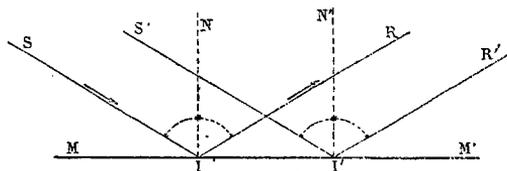


Fig. 430.

Les rayons réfléchis sont donc parallèles entre eux comme l'étaient les rayons incidents.

le Réflexion sur un miroir tournant
619. Miroirs tournants. — Quand un rayon lumineux de direction invariable tombe sur un miroir plan qui tourne autour d'un axe fixe passant dans son plan et perpendiculaire au plan d'incidence, le rayon réfléchi décrit un *angle double* de l'angle de rotation du miroir.

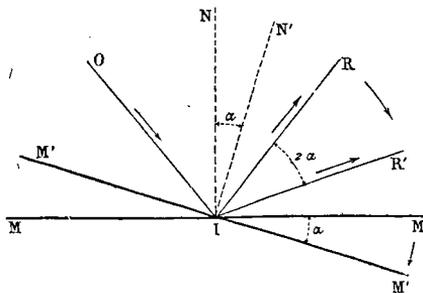


Fig. 431.

Les rayons réfléchis étant parallèles entre eux pour un faisceau de rayons incidents parallèles, considérons un rayon incident OI qui passe par l'axe de rotation I (fig. 431). La normale et le rayon réfléchi tournent en même temps que le miroir, en restant dans un plan perpendiculaire à l'axe de rotation.

Pour une rotation α du miroir, de M en M' , la normale tourne du même angle α ; l'angle d'incidence OIN qui était égal à i devient OIN' ou $i + \alpha$; l'angle du rayon incident OI et du rayon réfléchi IR était $2i$, il devient $2(i + \alpha)$; le rayon réfléchi IR' a donc décrit 2α , c'est-à-dire un angle double de l'angle dont a tourné le miroir.

620. Mesure optique des petits angles. — Soit MM , la trace sur un plan horizontal d'un miroir plan vertical, mobile autour d'un axe vertical qui se projette en I . En face du miroir, plaçons une échelle rectiligne, divisée en millimètres, perpendiculaire à la droite qui joint son milieu O au centre I du miroir (fig. 432).

En O, l'échelle est percée d'une petite ouverture éclairée; le miroir étant dans la position MM_1 , parallèle à l'échelle, un rayon lumineux OI qui tombe sous une incidence normale reprend la direction IO après sa réflexion sur le miroir. Si le miroir vient dans une position $M'M'_1$, après avoir tourné d'un angle α , le rayon incident OI fait cet angle α avec la normale IN au miroir, le rayon réfléchi IA fera avec la normale le même angle α de l'autre côté et viendra tomber en A sur l'échelle divisée.

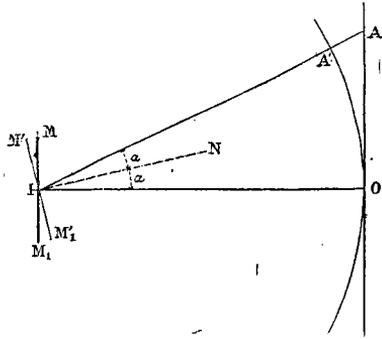


Fig. 432.

$$AIO = 2\alpha \quad \operatorname{tg} 2\alpha = \frac{AO}{OI}.$$

Pour une très petite déviation du miroir, on peut admettre que l'angle 2α est proportionnel à sa tangente, 2α est ainsi mesuré par

$$\frac{AO}{OI}.$$

Si l'échelle est une circonférence divisée de centre I, $2\alpha = \frac{A'O}{OI}$.⁽¹⁾

L'angle de rotation du miroir serait donné en degrés par

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{360}{2\pi} \cdot \frac{A'O}{OI}$$

621. Intensité de la lumière réfléchie. — Un miroir plan, métallique, réfléchit la plus grande partie de la lumière qu'il reçoit et absorbe le reste. Sur un miroir *métallique*, la fraction de la lumière incidente qui est réfléchie *varie peu avec l'incidence*.

Un miroir plan, *transparent* (verre, eau), réfléchit la lumière suivant les mêmes lois de direction qu'un miroir métallique, mais la fraction de la lumière incidente qu'il réfléchit *varie beaucoup avec l'incidence*. Si la surface transparente est bien polie et bien nette, ce qui n'est pas réfléchi traverse la substance. Sous une incidence voisine de la nor-

(1) La sensibilité est la même que si le système mobile portait un index ayant une longueur double de la distance AO. Le rayon lumineux a l'avantage de se comporter comme un index sans poids.

male, la portion du faisceau incident qui est réfléchiée est très faible, environ $\frac{1}{25}$: le faisceau transmis comprend alors presque toute la lumière incidente. A mesure que l'incidence croît, la proportion réfléchiée augmente et la proportion transmise diminue. Sous une incidence très oblique, la réflexion est très forte et la transmission très faible ; c'est ainsi qu'une vitre qui reçoit le soir les rayons solaires sous une incidence très oblique, les réfléchit avec la même intensité qu'un miroir métallique.

RÉFLEXION IRRÉGULIÈRE OU DIFFUSION

622. Une surface *non polie*, telle qu'un mur blanc ne renvoie pas les rayons lumineux dans une direction unique, mais les réfléchit dans tous les sens, grâce aux aspérités de la surface qui constituent de petits éléments plans d'orientations très diverses (fig. 433). Cette dissémination de la lumière, appelée **diffusion**, nous fait voir la surface

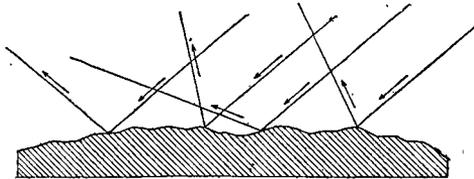


Fig. 433.

éclairée comme par l'effet d'une émission directe de lumière. *C'est par diffusion que les corps éclairés sont visibles.*

Un faisceau lumineux traversant un air parfaitement pur n'est visible que pour un observateur placé dans le prolongement du faisceau, mais cet air s'illumine et devient visible latéralement par diffusion s'il contient des poussières en suspension.

Un observateur placé dans une chambre obscure et recevant les rayons solaires réfléchis sur un miroir parfaitement poli ne voit de lumière que dans la direction géométrique de la réflexion régulière. Dans cette direction, il voit l'image éblouissante du soleil, mais rien ne lui révèle l'existence du miroir et le changement de direction que le faisceau lumineux a subi. Mais le miroir devient visible quand on

projette sur lui un peu de poussière, les rayons solaires se diffusant sur les particules de poussière.

La diffusion joue un rôle important dans beaucoup de circonstances. Par un ciel couvert, la lumière solaire ne nous éclaire pas directement, mais par l'intermédiaire des nuages qui envoient par diffusion sur le sol la lumière qu'ils reçoivent.

MIROIRS SPHÉRIQUES

623. Réflexion sur une surface courbe. — La réflexion se fait sur une surface courbe, comme sur un petit élément superficiel confondu avec le *plan tangent* à la surface au point d'incidence.

Les miroirs courbes les plus habituellement employés sont les miroirs sphériques.

624. Miroirs sphériques. — On appelle *miroir sphérique* une calotte sphérique polie à l'intérieur ou à l'extérieur (fig. 434). Le miroir est *concave* si la réflexion se fait à l'intérieur, sur la concavité; le miroir est *convexe* si la réflexion se fait sur la convexité. Le petit cercle qui limite le miroir est appelé *base* du miroir, la perpendiculaire abaissée du centre C de la sphère sur le cercle de base est l'*axe principal* du miroir. L'axe principal va rencontrer le miroir en un point O qui est le pôle de la calotte sphérique: c'est le centre de figure ou le *sommet* du miroir.

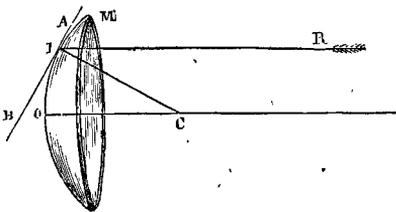


Fig. 434.

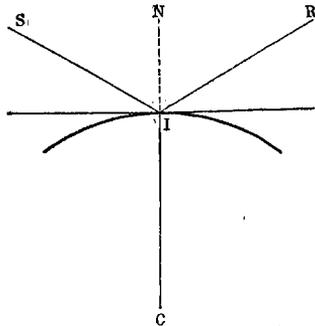


Fig. 435.

Un miroir sphérique n'est ordinairement qu'une faible partie de la sphère à laquelle il appartient, autrement dit, l'*ouverture* du miroir est petite; l'ouverture est l'angle que font entre eux deux rayons de la sphère aboutissant aux extrémités d'un diamètre du cercle de base.

On construit le rayon réfléchi correspondant à un rayon incident SI (fig. 435), en menant au point d'incidence I le rayon CI de la sphère qui est la normale au plan tangent en I et en traçant dans le plan SIC une droite IR faisant avec IN un angle égal à SIN.

MIROIRS CONCAVES

625. Foyer principal. — Des rayons lumineux, parallèles à l'axe principal, vont tous, après réflexion, se réunir en un point unique de cet axe, appelé *foyer principal*. Ce nom de foyer vient de ce que la chaleur de la source, comme sa lumière, se concentre en ce point.

Le foyer principal est situé au milieu du rayon CM (fig. 436).

Considérons, en effet, un rayon incident LI, parallèle à l'axe. Un plan passant par ce rayon et par l'axe principal, coupe le miroir suivant l'arc de grand cercle NMN'; c'est le plan d'incidence du rayon LI, car il contient le rayon incident LI et la normale CI au point d'incidence : le rayon réfléchi sera aussi dans ce plan et rencontrera l'axe en un point F.

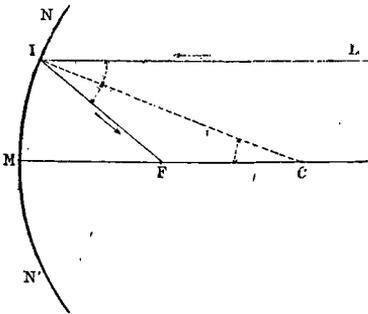


Fig. 436.

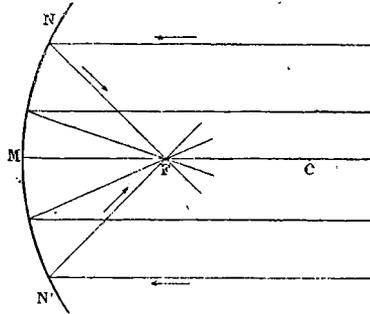


Fig. 437.

Les angles FCI et LIC sont égaux comme alternes-internes, les angles LIC et FIC sont égaux comme angles d'incidence et de réflexion en I; les angles FIC et FCI du triangle FIC sont donc égaux et ce triangle est isocèle, par suite $FI = FC$. Mais si l'ouverture du miroir est petite, FI est *sensiblement* égal à FM, quel que soit le rayon incident considéré et le point F est le milieu du rayon CM qui va du centre de la sphère au sommet du miroir. $MF = \frac{R}{2} = f$ est la *distance focale principale* (646.)

Le faisceau cylindrique de tous les rayons parallèles à l'axe principal forme, après réflexion sur le miroir, un cône dont le sommet est au point F (fig. 437). Inversement, d'après la réversibilité dans la réflexion, un point lumineux situé en F enverra sur le miroir un faisceau divergent qui sera transformé après la réflexion en un faisceau parallèle à l'axe.

Axes secondaires. — Tout diamètre de la sphère à laquelle appartient le miroir jouit des mêmes propriétés géométriques que l'axe principal; c'est un *axe secondaire*.

Un faisceau de rayons parallèles à un axe secondaire donne après réflexion un faisceau conique dont le sommet est situé sur l'axe secondaire en un point F_1 à la distance $\frac{R}{2}$ du centre du miroir (fig. 438).

F_1 est un **foyer secondaire**.

626. Plan focal. — Le lieu des *foyers secondaires* dans un plan qui passe par l'axe principal est un cercle de rayon $\frac{R}{2}$ concentrique à l'arc NMN' et de même ouverture que cet arc. Si l'ouverture est petite, on peut substituer à cet arc sa tangente en F . En faisant tourner le plan de la figure autour de l'axe principal, on a le lieu de tous les foyers secondaires; c'est une calotte sphérique concentrique au miroir, de même ouverture et de rayon moitié; si l'ouverture est petite, cette surface focale peut être remplacée par son plan tangent en F qu'on appelle **plan focal**. Le point où un axe secondaire rencontre le plan focal est le point de concours après réflexion des rayons parallèles à cet axe secondaire.

627. Foyers conjugués. — D'après l'expérience, tous les rayons

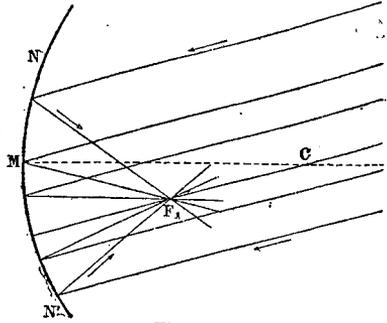


Fig. 438.

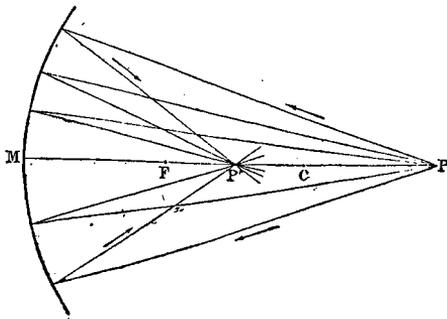


Fig. 439.

incidents qui concourent en un point P situé sur l'axe principal ou sur un axe secondaire d'un miroir concave de *petite ouverture*, vont après réflexion se réunir en un même point P'. Cette *image* P', point de rencontre des rayons réfléchis, est située sur l'axe qui passe par le point lumineux ⁽¹⁾. P et P' sont appelés *foyers conjugués* (fig. 439). Cette

(1) Voici la démonstration géométrique de ce fait expérimental pour un miroir de petite ouverture (fig. 440).

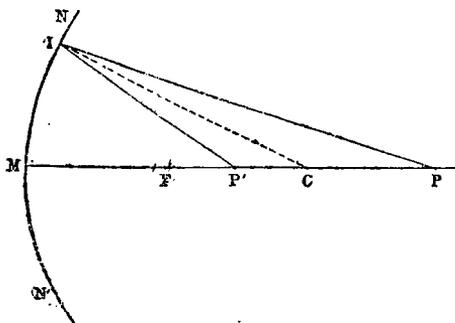


Fig. 440.

Soit un rayon incident quelconque PI issu de P. Le point P' est sur l'axe secondaire, car PC est à la fois rayon incident et rayon réfléchi. Prenons pour plan de la figure un plan passant par le rayon PI et par l'axe. Ce plan est le plan d'incidence, car il contient la normale IC du point d'incidence; il contient donc aussi le rayon réfléchi IP'. La normale IC étant bissectrice de l'angle I du triangle PIP', ce triangle nous donne la proportion

$$\frac{P'C}{PC} = \frac{P'I}{PI}$$

Si l'ouverture du miroir est très petite, P'I peut être confondu avec P'M et PI avec PM; on pourra donc écrire :

$$\frac{P'C}{PC} = \frac{P'M}{PM} \quad (1)$$

Nous voyons que, quel que soit le rayon incident PI, le rapport suivant lequel le point P' correspondant divise la longueur MC est constant; le point P' a donc une position invariable; c'est le point de concours de tous les rayons réfléchis ou l'*image* du point P.

Pour trouver une relation entre les positions des points P et P' et le rayon du miroir,

$$\text{posons } P'M = p' \quad PM = p \quad CM = R = 2f$$

$$P'C = 2f - p' \quad PC = p - 2f$$

$$\text{L'équation (1) devient } \frac{2f - p'}{p - 2f} = \frac{p'}{p}$$

$$\text{d'où } 2fp - pp' = pp' - 2fp'$$

$$\text{ou } fp + fp' = pp' \quad \text{ou } \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}$$

On voit encore par cette équation que la valeur de p' ne dépend pas de l'angle d'incidence, et que le point P' est le même pour tous les rayons incidents.

La distance MP' ne dépend que de MP et CM, c'est-à-dire de la position du point lumineux sur l'axe principal et du rayon du miroir. Tous les rayons issus de P viennent donc après la réflexion converger en un même point P', situé sur l'axe secondaire du point P.

dénomination de conjugués vient de ce que, si les rayons lumineux partaient de P' , ils viendraient, après la réflexion, à cause de la réversibilité, concourir en P . Chacun d'eux peut être regardé comme l'image de l'autre.

Variations de position de l'image d'un point P . — L'image se trouve sur l'axe PC . Il suffit pour trouver géométriquement sa position de chercher l'intersection d'un rayon réfléchi avec cet axe.

1° *Point lumineux très éloigné.* — Les rayons qu'il envoie peuvent être considérés comme parallèles à l'axe : ils viennent se réunir au foyer principal.

2° *Point lumineux situé au delà du centre de courbure.* — L'angle d'incidence PIC est inférieur à LIC ; l'angle de réflexion sera donc plus petit que CIF , et le rayon réfléchi coupera l'axe entre le foyer principal et le centre de courbure (fig. 441).

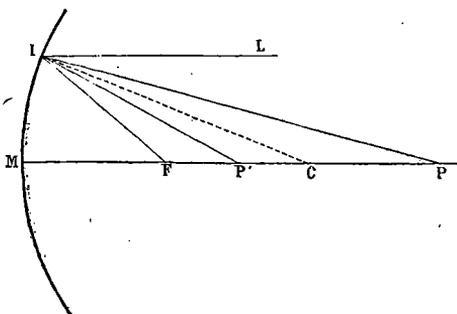


Fig. 441.

3° *Point lumineux situé au centre de courbure.* —

Un rayon incident quelconque rencontre la surface normalement et se réfléchit suivant sa propre direction. Le point lumineux et son image coïncident en C .

4° *Point lumineux compris entre le centre de courbure et le foyer.*

— Il est visible que l'image du point P' passera au delà du centre en P (fig. 441).

5° *Point lumineux au foyer principal.* — L'image s'éloigne à l'infini.

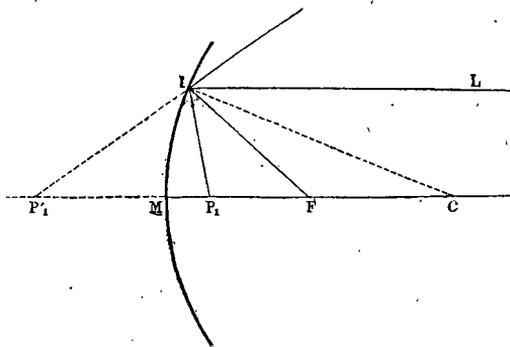


Fig. 442.

6° *Point lumineux compris entre le foyer et le miroir* (fig. 442). — L'angle d'inci-

dence P_1IC formé par un rayon $P'I$ étant plus grand que FIC , l'angle de réflexion sera plus grand que LIC et les rayons réfléchis divergeront. Ils ne se croiseront pas après leur réflexion, mais si on les prolonge au delà du miroir, ils iront couper l'axe en P'_1 de manière que l'œil qui reçoit les rayons réfléchis divergents voit un point lumineux en P'_1 d'où ils semblent provenir. Ce point est appelé *foyer virtuel*.

7° *Point lumineux situé sur le miroir*. — L'image est aussi sur le miroir.

8° *Point lumineux situé au delà du miroir* (fig. 442). — C'est le cas d'un point de concours P'_1 de rayons qui tombent en convergeant sur le miroir ; l'angle d'incidence étant supérieur à l'angle LIC , l'angle de réflexion sera de même plus grand que CIF , et le point de rencontre avec l'axe du rayon réfléchi sera en P_1 entre le centre de figure du miroir et le foyer. Ce sera une image réelle. ⁽¹⁾

628. Champ d'un miroir sphérique. — La région de l'espace qui est

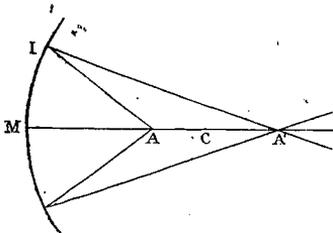


Fig. 443.

visible d'un point A (fig. 443) après réflexion sur le miroir forme ce qu'on appelle le champ du miroir, pour la position A de l'œil. Comme tous les rayons qui aboutissent en A , après leur réflexion sur le miroir, passent avant leur réflexion par le point conjugué A' ; les points vus de A sont compris dans un cône ayant l'image A' pour sommet et le miroir pour base.

629. Construction du conjugué d'un point lumineux. — On pourrait mener du point lumineux P un rayon incident quelconque

(1) Si l'on considère dans tous les cas le triangle PIP' et la bissectrice IC qui est tantôt bissectrice intérieure et tantôt bissectrice extérieure, on trouve constamment la proportion

$$\frac{P'C}{P'C} = \frac{PI}{PI} = \frac{P'M}{PM}$$

qui conduit à la relation unique $\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}$

à la condition de donner à p et p' le signe + s'ils sont réels ou correspondent à des points situés du côté de la surface réfléchissante du miroir, et le signe — s'ils sont virtuels ou correspondent à des points situés du côté opposé (634).

PI, tirer la normale CI du point d'incidence, et construire un angle de réflexion égal à l'angle d'incidence (fig. 444) : on obtiendrait le conjugué P' par l'intersection du rayon réfléchi et de l'axe secondaire CP.

On pourrait, en particulier, mener le rayon du sommet PM : l'intersection de CP et du rayon réfléchi donne P' (fig. 445).

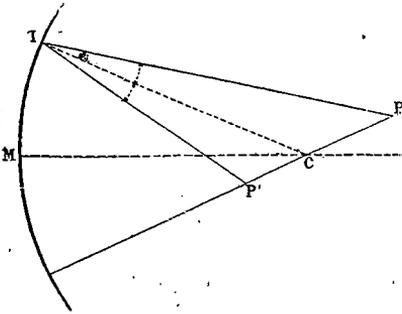


Fig. 444.

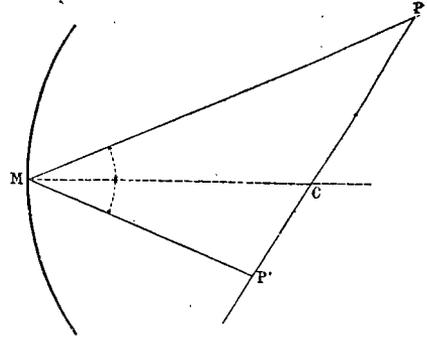


Fig. 445.

La connaissance des propriétés du foyer principal et du plan focal permet de trouver P' sans mesures d'angles ni de longueurs.

Conjugué d'un point lumineux situé sur l'axe principal. — Menons un rayon PI quelconque; pour avoir le rayon réfléchi (fig. 446), considérons PI comme appartenant à un faisceau de rayons parallèles entre eux; parmi ces rayons, celui qui passe par le centre C est à la fois rayon incident et rayon

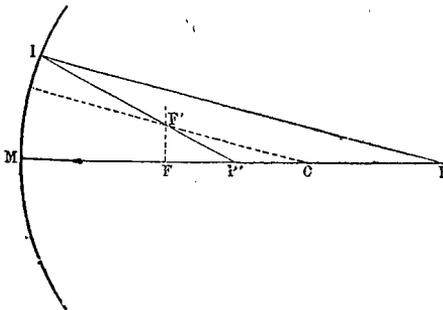


Fig. 446.

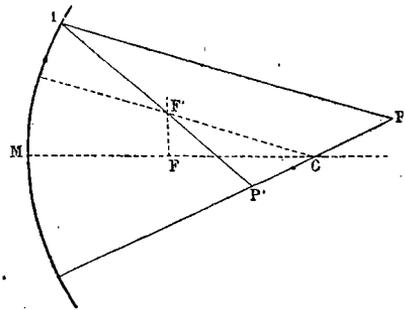


Fig. 447.

réfléchi, le point F' où il rencontre le plan focal est le foyer secondaire du faisceau parallèle à PI; tous les rayons réfléchis du faisceau passant par F' , IF' sera le rayon réfléchi provenant du rayon incident PI; le point de rencontre P' de IF' et de l'axe principal est le point conjugué de P.

Conjugué d'un point lumineux situé sur l'axe secondaire. — On peut construire par la méthode précédente le rayon réfléchi correspondant à un

rayon incident quelconque. Le conjugué de P se trouve à l'intersection du rayon réfléchi IF' et de l'axe secondaire CP (fig. 447).

Habituellement on n'utilise que le foyer principal.

Conjugué d'un point lumineux situé sur un axe secondaire. —

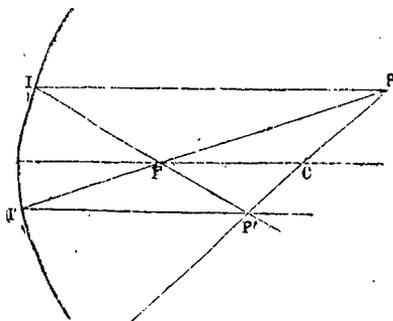


Fig. 448.

Menons un rayon PI parallèle à l'axe principal, le rayon réfléchi correspondant passe par le foyer F ; l'intersection du rayon réfléchi IF et de l'axe secondaire CP sera le conjugué P' (fig. 448). Une autre construction consiste à mener le rayon PF ; ce rayon se réfléchit en I' , parallèlement à l'axe principal, et son intersection avec l'axe secondaire donne P' .

630. Image d'un objet. — L'image d'un objet est l'ensemble des images de ses différents points.

Image d'une droite perpendiculaire à l'axe principal. — On entend par petite droite une droite qui est vue du centre de courbure sous un petit angle.

Quand l'objet est une petite droite perpendiculaire à l'axe, la construction est simplifiée, car l'image est aussi une droite perpendiculaire à l'axe.

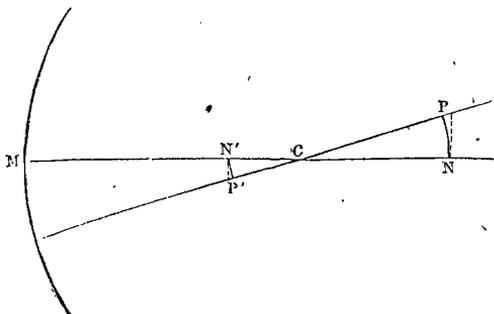


Fig. 449.

Prenons en effet pour objet un petit arc de cercle concentrique au miroir; chacun de ses points N a son image N' sur le rayon correspondant; comme tous les points N sont à la même distance du centre, leurs images N' seront aussi à une même distance du centre.

Un arc de cercle de centre C a donc pour image un autre arc de cercle concentrique (fig. 449). Si les axes des extrémités de ces arcs

font entre eux un petit angle, ces arcs peuvent être confondus avec leurs tangentes en N et N' , c'est-à-dire avec des perpendiculaires à l'axe principal, ce qui permet de dire qu'une droite perpendiculaire à l'axe a pour image une autre droite perpendiculaire à l'axe. Tout point lumineux de l'une a son foyer conjugué sur l'autre.

Pour construire l'image d'une droite PN perpendiculaire à l'axe, il suffira de chercher l'image d'un point de cette droite, et d'abaisser de cette image une perpendiculaire à l'axe : ce sera l'image de la droite. Les droites PN et $P'N'$ sont dites *droites conjuguées*⁽¹⁾.

631. Construction de l'image d'une droite. — Une droite PN étant donnée, nous construirons l'image P' d'un point P par l'intersection de deux rayons réfléchis dont la marche est connue : 1° l'axe secondaire PC ; 2° le rayon réfléchi correspondant à un rayon incident parallèle à l'axe principal ; nous abaisserons une perpendiculaire sur l'axe du point P' d'intersection de ces deux rayons réfléchis, $P'N'$ sera l'image de PN . Nous construirons encore l'image P' par l'intersection de l'axe secondaire PC et du rayon réfléchi IP' correspondant au rayon incident PF .

632. Variations de position et de grandeur de l'image. — 1° *Droite réelle, au delà du foyer principal.* — Nous allons

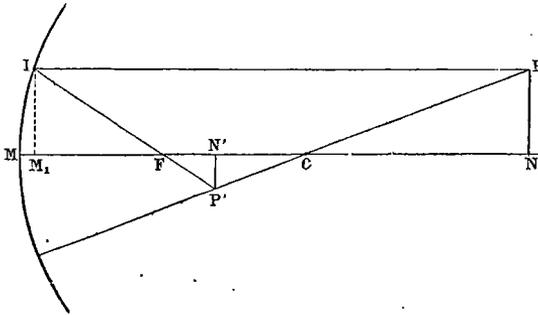


Fig. 450.

appliquer successivement les deux constructions de l'image et exprimer pour chacune le rapport de grandeur de $\frac{I}{O}$ de l'image à l'objet.

(1) *Image d'un plan perpendiculaire à l'axe.* — En faisant tourner le plan de la figure autour de l'axe principal, les droites PN , $P'N'$ engendrent deux plans perpendiculaires à l'axe principal : ces plans sont dits *plans conjugués*. Tout point de l'un de ces plans a son image sur le plan conjugué.

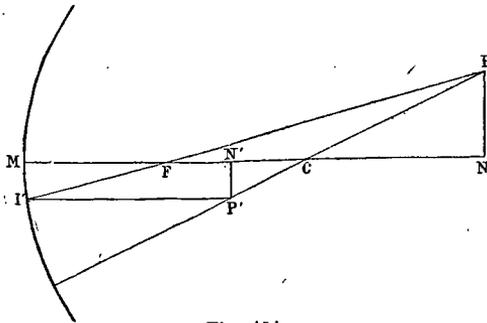
Pour construire l'image d'un plan perpendiculaire à l'axe principal, il suffira donc de chercher l'image P' d'un point P , et d'abaisser de P' un plan perpendiculaire à l'axe.

1^{re} construction : posons $FM = f$, $NM = p$, $N'M = p'$; remarquons que $PN = IM_1$. IM_1 est la perpendiculaire abaissée du point I sur l'axe. On peut confondre M et M_1 pour un miroir de très petite ouverture.

Considérons les triangles semblables IMF , $P'N'F$ (fig. 450),

$$\frac{P'N'}{IM} = \frac{FN'}{FM} = \frac{p' - f}{f}$$

2^o construction : (fig. 451) $P'N' = I'M$; $I'M$ étant la perpendiculaire abaissée du point I sur l'axe.



Dans les triangles semblables $I'MF$, $P'N'F$

$$\frac{I'M}{PN} = \frac{FM}{FN} = \frac{f}{p - f}$$

Égalons les 2 valeurs de $\frac{I}{O}$:

$$\frac{I}{O} = \frac{p' - f}{f} = \frac{f}{p - f}$$

d'où $pf + p'f = pp'$ et $\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}$.

D'après la construction, l'image est réelle et renversée.

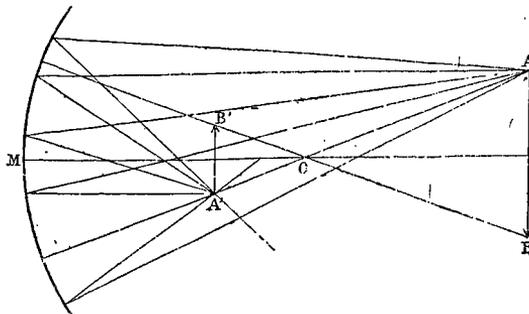


Fig. 452.

La figure 452 montre la marche du faisceau issu d'un point A de l'objet et venant converger en A' après réflexion.

2^o Droite réelle, entre le foyer et le miroir. — Posons $NM = p$,

$N'M = p'$; remarquons que les perpendiculaires IM et $I'M$ abaissées de I et I' sur l'axe sont égales à PN et $P'N'$.

Triangles semblables IMF , $P'N'F$ (fig. 453), $\frac{P'N'}{IM} = \frac{FN'}{FM} = \frac{p' + f}{f}$.

Triangles semblables $I'MF$, PNF (fig. 454), $\frac{I'M}{PN} = \frac{FM}{FN} = \frac{f}{f - p}$.

$$\frac{I}{O} = \frac{p' + f}{f} = \frac{f}{f - p}, \quad \text{d'où } p'f - pf = pp' \quad \text{et} \quad \frac{1}{p} - \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}.$$

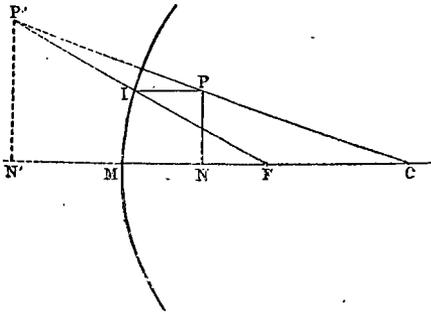


Fig. 453.

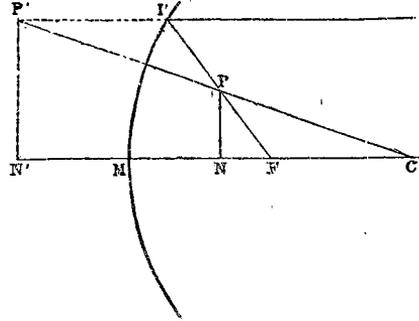


Fig. 454.

Le point de concours P' des rayons réfléchis ne peut être rendu visible en y plaçant un écran puisqu'il est situé derrière le miroir; on le dit *virtuel*, il n'est visible que pour un œil recevant les rayons réfléchis. D'après la construction, l'image est *droite, virtuelle et plus grande que l'objet*.

La figure 455 représente les rayons par lesquels l'image P' est vue par l'œil. Du point P' on mène le cône qui s'appuie sur le contour de la pupille, on joint au point P les points d'intersection de ce cône avec le miroir: les rayons obtenus sont ceux que l'œil reçoit après la réflexion.

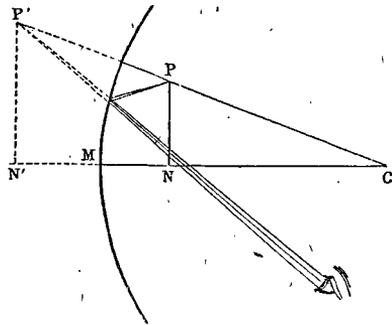


Fig. 455.

3° **Droite virtuelle en arrière du miroir.** — PN serait une image réelle formée par une lentille convergente ou un miroir, concave si l'interposition du miroir M n'empêchait la formation de cette image;

les rayons incidents ont la même direction que si l'image PN se formait; l'objet PN est dit *virtuel* par rapport au miroir M.

Posons $NM = p$, $N'M = p'$. Les constructions des figures 453 et

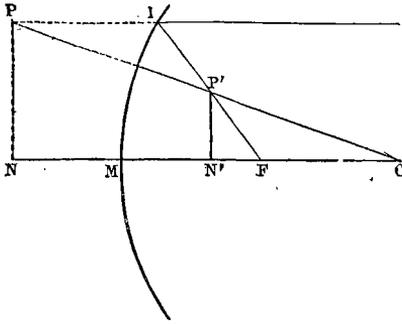


Fig. 456.

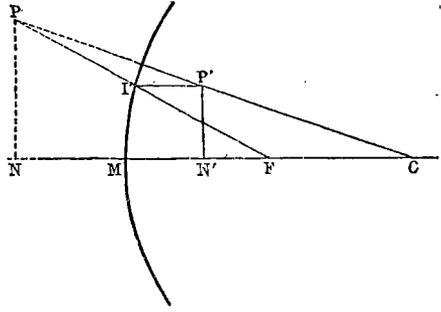


Fig. 457.

454 où PN occupe la place de P'N', et P'N' celle de PN, conviennent encore au cas actuel (fig. 456 et 457).

$$\frac{P'N'}{IM} = \frac{FN'}{FM} = \frac{f - p'}{f}$$

$$\frac{I'M}{PN} = \frac{FM}{FN} = \frac{f}{p + f}$$

$$\frac{I}{O} = \frac{f - p'}{f} = \frac{f}{p + f} \quad pf - p'f = pp' \quad \frac{1}{p'} - \frac{1}{p} = \frac{1}{f}$$

D'après la construction, l'image est droite, réelle et plus petite que l'objet.

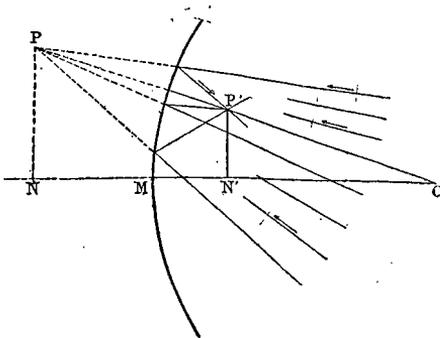


Fig. 458.

La figure 458 représente un faisceau dont les rayons se réuniraient au point P sans l'interposition du miroir : ils viennent après réflexion converger en P'.

L'objet et l'image sont, dans chaque cas, à la fois du même côté du foyer. L'objet et l'image correspondante sont en outre, vus sous un même angle du centre du miroir.

N et N' étant conjugués, la relation établie entre les distances FN et FN' se rapporte aux distances au foyer de deux *points conjugués*; elle fait connaître les variations de position de l'image d'un point lumineux situé sur l'axe principal quand ce point se déplace sur cet axe.

Comme rien ne distingue géométriquement un axe secondaire de l'axe principal, les relations établies conviendront aussi à deux points conjugués situés sur un axe secondaire.

633. Rapport de grandeur de l'image à l'objet. — Le rapport de grandeur d'une droite à son image est égal au rapport de leurs distances au miroir ⁽¹⁾.

Cela résulte de la comparaison des rapports égaux qui servent à établir la relation des foyers conjugués. On obtient un rapport égal en prenant pour numérateur la somme des numérateurs, et pour dénominateur la somme des dénominateurs; ou encore en prenant les différences.

$$1^{\text{er}} \text{ cas, } \frac{I}{O} = \frac{p' - f}{f} = \frac{f}{p - f}; \quad \text{par addition} \quad \frac{p'}{p} = \frac{I}{O}$$

$$2^{\text{e}} \text{ cas } \frac{I}{O} = \frac{p' + f}{f} = \frac{f}{f - p}; \quad \text{par soustraction} \quad \frac{p'}{p} = \frac{I}{O}$$

$$3^{\text{e}} \text{ cas } \frac{I}{O} = \frac{f - p'}{f} = \frac{f}{f + p}; \quad \text{par soustraction} \quad \frac{p'}{p} = \frac{I}{O}$$

Une démonstration directe se fait simplement en menant le rayon incident PM qui passe par le centre de figure du miroir et le rayon réfléchi correspondant P'M (fig. 459 : les angles PMC, P'MC avec la normale CM en M sont égaux; d'autre part, le foyer conjugué de P se trouve en P' à l'intersection du rayon réfléchi MP' et de l'axe secondaire PC. Les triangles rectangles PNM, P'N'M sont semblables parce qu'ils ont leurs angles égaux, donc :

$$\frac{I}{O} = \frac{P'N'}{PN} = \frac{MN'}{MN} = \frac{p'}{p}$$

Une démonstration directe analogue s'applique aux autres cas.

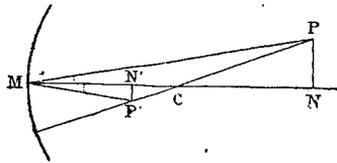


Fig. 459.

(1) Pour un objet quelconque, le rapport de deux dimensions homologues de l'image et de l'objet est égal au rapport de leurs distances au miroir.

$$\frac{I'}{O'} = \frac{f'}{f}$$

634. Formule générale. — Nous avons trouvé pour déterminer le conjugué d'un point lumineux placé sur un axe principal ou secondaire trois relations différentes, valables chacune entre certaines limites assignées au point lumineux.

$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}$ pour un point lumineux situé au delà du foyer principal;

$\frac{1}{p} - \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}$ pour un point lumineux compris entre le foyer et le miroir;

$-\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}$ pour un point lumineux situé derrière le miroir.

Ce sont trois relations numériques entre des longueurs essentiellement positives.

Il suffit d'avoir écrit la première pour en déduire les deux autres, car, si l'on compare les positions de P et de P' aux signes des termes p et p' , on remarque que les signes $+$ correspondent dans ces équations à des points de concours réels, et les signes $-$ à des points de concours virtuels.

Cette règle mnémorique peut suffire pour des applications numériques; il est toutefois possible de remplacer les trois équations par une seule comprenant tous les cas, en usant d'une convention habituelle en géométrie.

Les points de concours réels se trouvent sur l'axe d'un côté du point M , les points virtuels du côté opposé; en désignant par p la distance du point lumineux au miroir, par p' la distance de son image, on conviendra de compter positivement les distances des points réels au sommet M , c'est-à-dire positivement les distances des points *situés du côté de la lumière réfléchie*; on comptera négativement les distances au sommet M des points virtuels ou de ceux qui sont situés du côté du miroir opposé à la lumière réfléchie.

Avec cette convention, la formule unique $\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f} = \frac{2}{R}$ comprend tous les cas. Cette relation a l'avantage de donner par sa discussion la valeur de p' et de faire connaître la position du conjugué sans qu'on ait besoin de recourir à la construction géométrique, quand on fait parcourir au point lumineux tout un axe, d'une extrémité à l'autre, ce qui revient à faire varier p de $+\infty$ à $-\infty$.

Si l'on trouve une valeur négative pour p' , l'image est virtuelle et semble se former derrière le miroir; si l'on trouve une valeur positive, l'image est réelle et se forme devant le miroir. Une image renversée correspond à $\frac{p'}{p}$ positif, une image droite à $\frac{p'}{p}$ négatif.

635. Discussion de la formule générale.

P et P' réels Image réelle et renversée	}	$p = +\infty$ $p' = +f$ (foyer principal) Image nulle.
		p très grand $p' = f + \epsilon$ $I = \frac{0}{p} f^{(1)}$
		$p = +2f$ $p' = +2f$ (au centre du miroir) $I = 0$
		$2f > p > f$ $p' > 2f$ $I > 0$
		$p = +f$ ($f + \epsilon$) $p' = +\infty$ Image infinie.
P réel P' virtuel Image virtuelle et droite	}	$p = +f(f - \epsilon)$ $p' = -\infty$ Image infinie.
		$p < f$ $p' < 0$ $I > 0$
		$p = \frac{f}{2}$ $p' = -f$ $I = 20$
		$p = 0$ $p' = 0$ $I = 0$, sur le miroir.
P virtuel P' réel Image réelle et droite	}	$p < 0$ $p' > 0$ et $< f$ $I < 0$
		$p' = -f$ $p' = +\frac{f}{2}$ $I = \frac{0}{2}$
		$p = -\infty$ $p' = +f$ (foyer principal) $I = \frac{0}{p} f$

En résumé, si un point lumineux parcourt tout l'axe de $+\infty$ à $-\infty$, son conjugué part du foyer principal, arrive au centre, dépasse le centre, atteint $+\infty$, puis passe brusquement à $-\infty$, revient vers le miroir en restant derrière lui, atteint le sommet du miroir, passe devant le miroir et arrive en F. Le point lumineux et son image marchent constamment en sens inverse, ils se rencontrent deux fois, au centre du miroir et au sommet du miroir.

636. Formule de Newton. — Comptons les distances de l'objet et de son image à partir du foyer principal F ;

$$\text{posons } FM = f, \quad NF = \varpi, \quad N'F = \varpi'$$

(1) $\frac{0}{p} = tg\varphi$. Si l'objet est très éloigné, c'est le diamètre apparent de l'objet (fig. 460).

S'il s'agit d'un astre, l'image se forme au foyer principal, c'est-à-dire au milieu du rayon du miroir; l'angle sous lequel elle est vue du centre du miroir est égal au diamètre apparent de l'objet, et la grandeur absolue de l'image est proportionnelle au rayon de courbure.



Fig. 460.

Considérons les triangles semblables IMF, P'N'F (fig. 450)

$$\frac{P'N'}{IM} = \frac{FN'}{FM} = \frac{\varpi'}{f}$$

Dans les triangles semblables I'MF, PNF (fig. 451)

$$\text{on a } \frac{I'M}{PN} = \frac{FM}{FN} = \frac{f}{\varpi}$$

Égalons les deux valeurs de $\frac{I}{O}$,

$$\frac{I}{O} = \frac{\varpi'}{f} = \frac{f}{\varpi}$$

$$\text{d'où } \varpi\varpi' = f^2.$$

On reconnaît que cette formule convient à tous les cas et qu'elle se prête très aisément à la discussion.

On arrive à la même relation en partant de l'équation $\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}$ et en remplaçant ϖ par $p - f$ et ϖ' par $p' - f$.

637. Vérifications expérimentales. — Dans une chambre obscure on dispose une bougie allumée au-devant d'un miroir

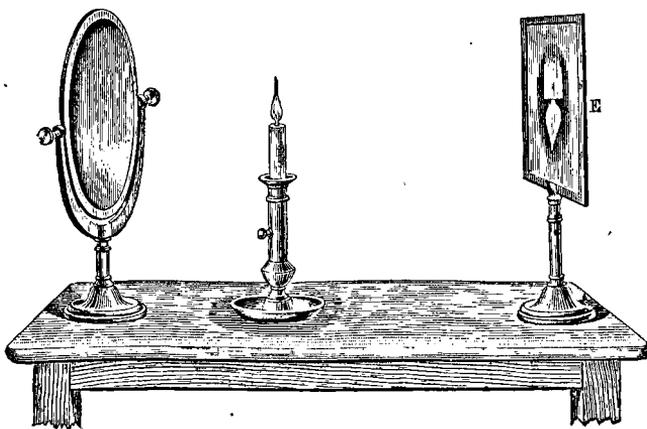


Fig. 461.

concave au delà du foyer, et on reçoit les rayons réfléchis sur un écran. Si l'écran est placé exactement dans le plan focal conjugué de l'objet, il s'y forme une image nette de la bougie. L'image se trouble

en dehors de ce plan ; les cônes dont les sommets sont dans le plan conjugué coupent alors l'écran suivant des cercles qui empiètent les uns sur les autres et sont d'autant plus grands qu'on s'éloigne davantage du plan conjugué. On peut vérifier que l'image présente avec l'objet les relations de position et de grandeur qui résultent de la construction et des équations.

Quand la bougie est très loin, on voit une petite image renversée de la flamme se dessiner sur l'écran : à mesure que la bougie se rapproche, l'image grandit mais s'éloigne du miroir. Au centre, les deux images sont égales et dans le même plan. Si la bougie dépasse le centre, l'image renversée se produit au delà du centre plus grande que l'objet (fig. 461). Lorsque la bougie atteint le foyer, l'image est

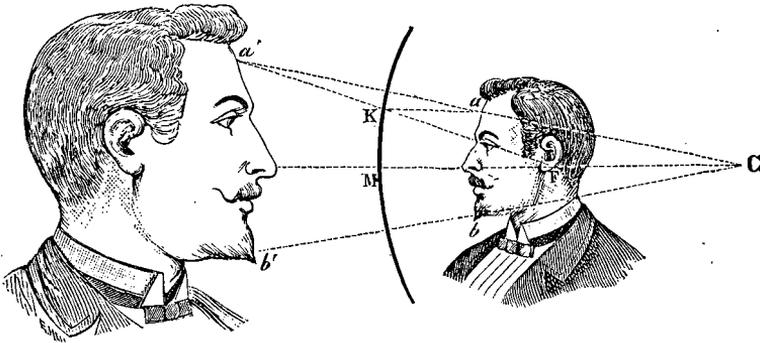


Fig. 462.

infiniment éloignée et infiniment grande. Si la bougie dépasse le foyer et se trouve comprise entre le foyer et le miroir, on ne peut plus recevoir d'image sur un écran, mais en se plaçant sur le trajet des rayons réfléchis, en avant du miroir, on voit l'image virtuelle de la bougie, droite et agrandie. C'est en se plaçant entre le foyer du miroir et la surface réfléchissante qu'un observateur voit son image (droite et agrandie) dans un miroir concave (fig. 462).

Les images réelles peuvent être vues directement à l'œil aussi bien que les images virtuelles. En effet, les rayons réfléchis convergents qui forment l'image réelle d'un point deviennent divergents s'ils continuent leur marche après leur point de concours. Un œil placé dans le cône des rayons divergents voit leur point de concours P' comme s'il s'agissait d'un point lumineux matériel ; la seule différence consiste en ce que le point P' n'envoie pas de lumière dans toutes les

directions. Un écran sur lequel se dessine une image réelle offre l'avantage de *diffuser la lumière dans tous les sens*, et l'image devient alors visible, quelle que soit la position de l'observateur.

Il convient de remarquer qu'une portion très petite d'un miroir donne une image de même grandeur et de même position qu'une portion plus grande; l'image est toutefois moins lumineuse, puisqu'elle est formée par un moindre nombre de rayons réfléchis.

638. Mesure de la distance focale d'un miroir sphérique concave. — On obtient une valeur approchée de la distance focale f en exposant le miroir aux rayons solaires et en déplaçant en face du miroir un petit écran sur lequel on cherche à obtenir une image nette du disque solaire et la plus petite possible. La distance de l'image au miroir est f .

Il est plus précis de promener en avant du miroir sur l'axe principal au delà du centre et perpendiculairement à cet axe une ouverture percée dans un écran opaque et vivement éclairé; on cherche avec un petit écran une image très nette des bords de l'ouverture, et on applique l'équation aux foyers conjugués $\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}$. En particulier, *au centre du miroir l'image est égale à l'objet* et dans le même plan perpendiculaire à l'axe.

MIROIRS CONVEXES

639. Foyer principal — Des rayons lumineux parallèles à l'axe principal d'un miroir sphérique convexe divergent après leur réflexion sur le miroir, et leur prolongement rencontre l'axe en un point F situé derrière le miroir, à *égale distance du centre de la sphère et du sommet du miroir*. Ce point est appelé *foyer principal*.

Soit un rayon LI parallèle à l'axe. Un plan passant par ce rayon et l'axe principal contient la normale CI : c'est donc le plan d'incidence, et il contient le rayon réfléchi. Le rayon réfléchi, prolongé derrière le miroir, rencontre l'axe en F (fig. 463).

Le triangle CIF est isocèle. En effet, par suite du parallélisme de CM et de IL , l'angle en C et l'angle d'incidence en I sont égaux; d'autre part, l'angle du triangle en I et l'angle de réflexion en I sont égaux comme opposés par le sommet. Les deux angles du triangle en C et en I

sont donc égaux, et $FI = FC$. Si l'ouverture du miroir est très petite, FI peut être considéré comme égal à FM . Le point F est donc sensiblement au milieu de la distance MC pour tous les rayons incidents

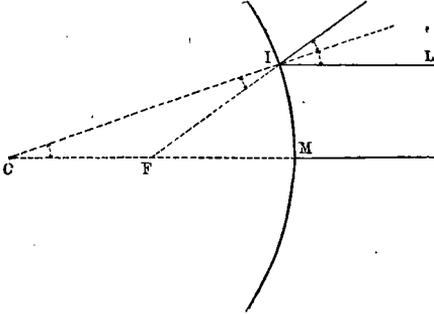


Fig. 463.

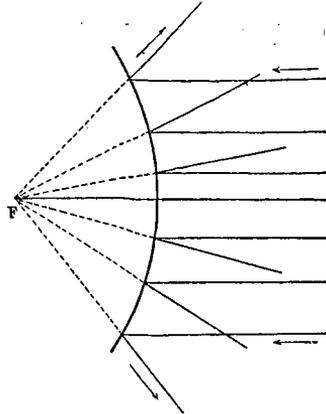


Fig. 464.

parallèles. Le faisceau des rayons parallèles à l'axe principal forme après réflexion sur le miroir, un cône divergent dont le sommet est en F (fig. 464). L'œil placé dans le faisceau réfléchi voit un point lumineux en F , mais ce point de concours ne peut pas être reçu sur un écran : il est dit *virtuel*.

D'après la réversibilité dans la réflexion, si l'on dirige sur le miroir convexe, avec une lentille ou un miroir concave, un faisceau convergent de sommet F , ce faisceau est transformé après la réflexion en un faisceau parallèle à l'axe.

640. Axes secondaires. Plan focal. — Tout diamètre de la sphère dont le miroir fait partie jouit des mêmes propriétés géométriques que l'axe principal et s'appelle un **axe secondaire**. Sur chaque axe secondaire il y a un foyer secondaire virtuel : c'est le point de concours des rayons réfléchis pour un faisceau incident parallèle à l'axe secondaire. Le lieu des foyers secondaires est un plan, dit *plan focal*, mené par le foyer principal perpendiculairement à l'axe principal (626).

641. Foyers conjugués. — D'après l'expérience, des rayons incidents concourant en un point P situé sur l'axe principal d'un

miroir convexe semblent après réflexion concourir en un point P' situé aussi sur l'axe principal. P et P' sont des *foyers conjugués*.

Un point lumineux situé sur un axe secondaire a un conjugué sur le même axe.

(*Conjugué d'un point lumineux situé sur l'axe principal.* — Soit un rayon PI issu du point P (fig. 465); considérons PI comme appartenant à un faisceau de rayons parallèles : celui de ces rayons qui passerait par le centre

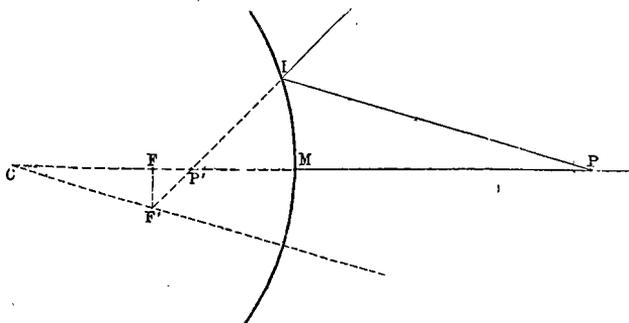


Fig. 465.

de la sphère serait réfléchi suivant sa propre direction. C'est l'axe secondaire du faisceau, le point F' où il rencontre le plan focal est le foyer secondaire du faisceau. Tous les rayons réfléchis du faisceau passant en F' , IF' sera la direction du rayon réfléchi pour le rayon incident PI , le prolongement du rayon réfléchi rencontre l'axe principal en P' , P' est le conjugué du point P .

(*Conjugué d'un point lumineux situé sur un axe secondaire.* — On cherche l'intersection de deux rayons réfléchis. L'axe secondaire est un des rayons réfléchis, car il est à la fois incident et réfléchi. On pourrait construire le rayon réfléchi d'un rayon incident quelconque.)

On construit habituellement l'image P' d'un point P par l'intersec-

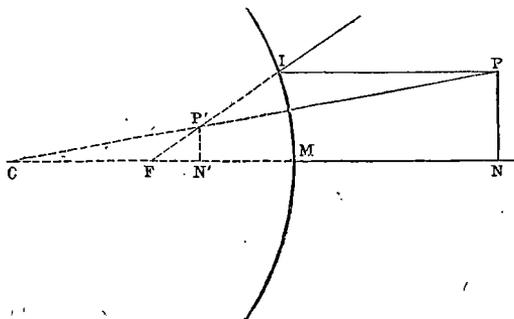


Fig. 466.

tion de deux rayons réfléchis dont la marche est connue : 1° l'axe secondaire PC ; 2° le rayon réfléchi correspondant à un rayon incident PI parallèle à l'axe principal. Le rayon réfléchi FI coupe l'axe secondaire au point cherché P' (fig. 466).

642. Image d'un objet. — L'image d'un objet est l'ensemble des images de ses différents points.

Droite perpendiculaire à l'axe principal. — Une petite droite PN perpendiculaire à l'axe principal a pour image une autre droite perpendiculaire à l'axe principal (630).

Variations de position et de grandeur de l'image. — Une droite PN perpendiculaire à l'axe étant donnée, on construit l'image P' d'un point P par l'intersection de l'axe secondaire PC et d'un rayon réfléchi provenant d'un rayon incident parallèle à l'axe ; on abaisse du point P' une perpendiculaire P'N' sur l'axe. On peut construire en second lieu l'image P' par l'intersection de l'axe secondaire et du rayon réfléchi IP' qui provient d'un rayon incident PF passant par le foyer ; P'N' est l'image de PN.

Nous allons appliquer successivement les deux constructions de l'image et exprimer pour chacune le rapport de grandeur de l'image à l'objet.

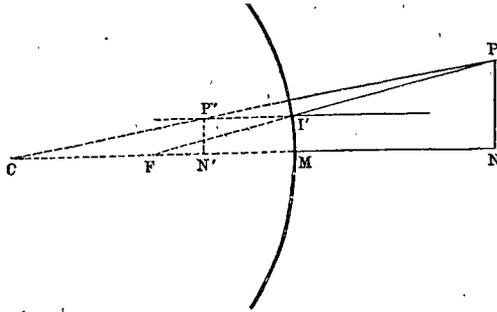


Fig. 467.

1° **Droite réelle placée du côté de la surface réfléchissante.** — Posons $FM = f$, $NM = p$, $N'M = p'$ remarquons que $IM = PN$ (fig. 466) et $I'M = P'N'$ (fig. 467).

Triangles semblables IMF, P'N'F (fig. 466) ;

$$\frac{P'N'}{IM} = \frac{FN'}{FM} = \frac{f - p'}{f}$$

Triangles semblables IMF, PNF (fig. 467);

$$\frac{IM}{PN} = \frac{FM}{FN} = \frac{f}{f+p}$$

$$\frac{I}{O} = \frac{f-p'}{f} = \frac{f}{f+p}$$

$$p'f - pf = -pp'$$

$$\frac{1}{p} - \frac{1}{p'} = -\frac{1}{f}$$

D'après la construction, l'objet est réel, l'image est virtuelle, droite et plus petite que l'objet (fig. 468).

$n n' = f^2$

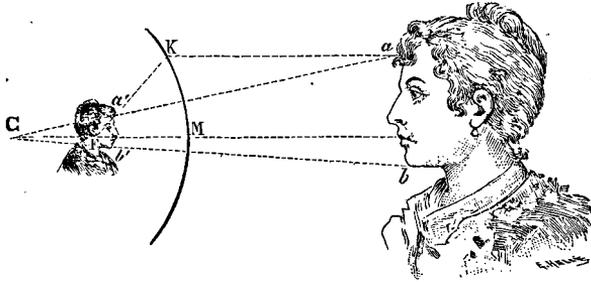


Fig. 468.

2° Droite virtuelle entre le miroir et le foyer principal. — PN

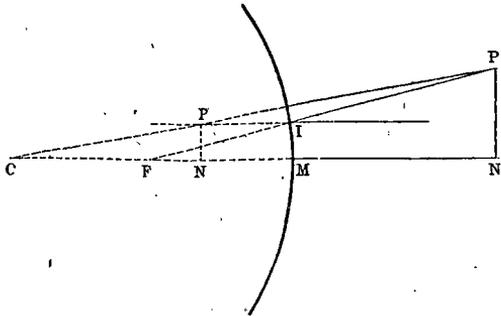


Fig. 469.

serait une image réelle formée par une lentille convergente ou un miroir concave si l'interposition du miroir convexe M n'empêchait sa

3° **Droite virtuelle au delà du foyer principal.** — Triangles semblables IMF, P'N'F (fig. 471).

$$\frac{P'N'}{IM} = \frac{FN'}{FM} = \frac{p' - f}{f}$$

Triangles semblables IMF, PNF (fig. 472) ;

$$\frac{IM}{PN} = \frac{FM}{FN} = \frac{f}{p - f}$$

$$\frac{I}{O} = \frac{p' - f}{f} = \frac{f}{p - f}$$

$$-pf - p'f = -pp'$$

$$-\frac{1}{p'} - \frac{1}{p} = -\frac{1}{f}$$

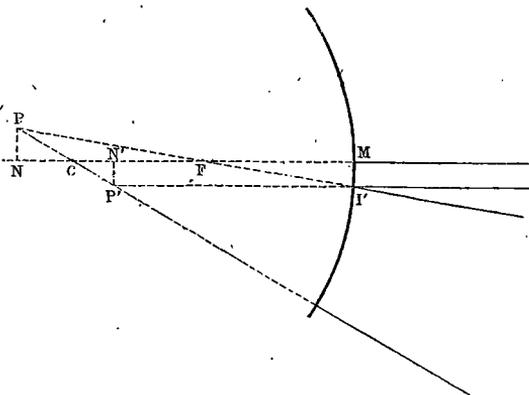


Fig. 472.

L'objet est virtuel ; l'image est *virtuelle et renversée*.

Dans les trois cas, l'image et l'objet sont toujours à la fois *du même côté du foyer principal*.

Dans les trois cas, en valeur absolue, $\frac{I}{O} = \frac{p'}{p}$. La démonstration se fait comme pour les miroirs concaves (633).

N et N' étant conjugués, les relations trouvées entre les distances MN et M'N' se rapportent aux distances au miroir de deux points conjugués. Elles conviennent aussi à deux points conjugués situés sur un axe secondaire.

643. Formule générale. — Les trois équations :

$$\frac{1}{p} - \frac{1}{p'} = -\frac{1}{f}, \quad \frac{1}{p'} - \frac{1}{p} = -\frac{1}{f}, \quad -\frac{1}{p'} - \frac{1}{p} = -\frac{1}{f}$$

se déduisent d'une seule $\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = -\frac{1}{f}$, en se rappelant qu'il faut donner le signe + ou - à p et p' suivant qu'ils se rapportent à un point de concours réel ou virtuel.

L'équation relative à chacun des cas particuliers s'écrira immédiatement dès que la construction géométrique aura fixé la position relative du point lumineux et de son foyer conjugué.

Si l'on convient de compter les distances p et p' positivement dans le sens de la lumière réfléchie et négativement dans le sens opposé, la résolution de l'équation $\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = -\frac{1}{f}$ par rapport à p' fera connaître toutes les positions relatives du point lumineux et de son image sans que la construction géométrique ait été faite. Le signe trouvé pour p' indique le sens dans lequel on doit porter cette longueur pour obtenir P' . Si l'on trouve une valeur négative pour p' , l'image est virtuelle et semble se former derrière le miroir; si l'on trouve une valeur positive, l'image est réelle et se forme devant le miroir.

Une image renversée correspond à $\frac{p'}{p}$ positif, une image droite à $\frac{p'}{p}$ négatif.

644. Discussion de la formule générale.

P réel	$\left\{ \begin{array}{l} p = \infty \\ p \text{ diminue} \\ p' = f \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} p' = -f \\ p' \text{ se rapproche du sommet} \\ p' = -\frac{f}{2} \end{array} \right.$	$I = \frac{0}{p} f$
P' virtuel			$I < 0$, mais augmente
Image virtuelle et droite			$I = \frac{f}{2}$
	$p = 0$	$p' = 0$	$I = 0$
P virtuel	$\left\{ \begin{array}{l} p < 0 \text{ s'éloigne du sommet} \\ p = -\frac{f}{2} \\ p = -f + \varepsilon \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} p' > 0, \text{ augmente} \\ p' = f \\ p' = +\infty \end{array} \right.$	$I > 0$, augmente
P' réel			$I = 2f$
Image réelle et droite			Image infiniment grande.

P virtuel P' virtuel Image virtuelle et renversée	}	$p = -(f+\epsilon)$ $p' = -\infty$ Image infiniment grande.
		p s'éloigne du foyer p' se rapproche du foyer $I > 0$
		$p = -2f$ $p' = -2f$ $I = 0$ (centre du miroir).
		p s'éloigne p' se rapproche du foyer $I < 0$
		$p = -\infty$ $p' = -f$ $I = \frac{0}{p} f.$

Un point lumineux parcourant tout l'axe de $+\infty$ à ∞ , son conjugué part du foyer principal, arrive au sommet, le dépasse, atteint $+\infty$, puis passe brusquement à $-\infty$, revient vers le miroir en restant derrière lui, arrive au centre, puis au foyer. Le point lumineux et son image marchent constamment en sens inverse; ils se rencontrent deux fois, au sommet du miroir et au centre.

En comptant les distances du point lumineux et de son image à partir du foyer principal, on trouve comme pour les miroirs concaves la relation $\varpi \varpi' = f^2$ (636).

645. Détermination de la distance focale principale d'un miroir convexe. — Le miroir ayant été recouvert d'une feuille de

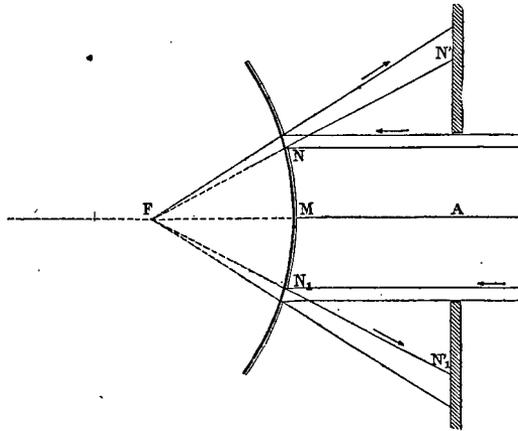


Fig. 473.

papier dans laquelle on a ménagé deux petites ouvertures situées en N et N₁ dans un plan passant par l'axe à égale distance de l'axe (fig. 473), on fait tomber sur la surface réfléchissante un faisceau solaire parallèle à l'axe. Les rayons réfléchis en N et N₁ rencontrent

en N' et N_1 , un écran percé d'une ouverture assez large pour laisser passer les rayons incidents. On place l'écran à une distance telle que

$$N'N_1 = 2NN_1$$

D'après les triangles semblables NN_1F , $N'N_1F$,

$$\frac{N'N_1}{NN_1} = \frac{FA}{FM} \quad \text{d'où } AF = 2FM \quad \text{et } FM = MA$$

La distance de l'écran au miroir est la distance focale principale.

Si l'on a affaire à un miroir convexe M de petites dimensions, on fait coïncider son axe principal avec celui d'un miroir concave M' de distance focale F' sur lequel on reçoit un faisceau solaire parallèle à l'axe (fig. 474). On fait en sorte qu'une image réelle P provenant de l'image virtuelle F' se forme entre M et M' (642, 2^o)

$$\text{On mesure } MP = p' \quad MM' = d$$

$$\text{On a } MF' = F' - d.$$

L'équation aux foyers conjugués du miroir convexe (où le point de concours F' est virtuel et P réel) sera ici :

$$\frac{1}{p'} - \frac{1}{F' - d} = -\frac{1}{f}$$

$f = MF$ est la distance focale cherchée.

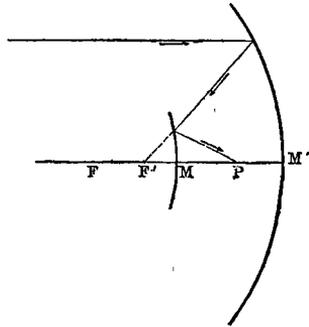


Fig. 474.

646. Aberration de sphéricité. — Si l'ouverture d'un miroir sphérique n'est pas très petite, les rayons partis d'un point P et réfléchis près des bords du miroir ou rayons marginaux *ne convergent pas au même point* que les rayons réfléchis près du sommet du miroir ou rayons centraux. Ce défaut de convergence a reçu le nom d'*aberration de sphéricité*. Le foyer principal F des rayons centraux est à la distance $\frac{R}{2}$ du centre. Le foyer F' des rayons marginaux est plus voisin du sommet du miroir que le foyer F .

(Soit un miroir concave ayant une demi-ouverture égale à ω , sur lequel on reçoit des rayons marginaux parallèles à l'axe principal (fig. 475).

Le triangle $CF'I$ est isocèle, la perpendiculaire $F'H$ rencontre IC en son milieu H .

$$CF' = \frac{CH}{\cos \omega} = \frac{\frac{R}{2}}{\cos \omega}.$$

CF' est donc plus grand que $\frac{R}{2}$ ou CF .

$FF' = \frac{R}{2} \left(\frac{1}{\cos \omega} - 1 \right)$ s'appelle *aberration longitudinale principale*. Elle est négligeable quand l'ouverture du miroir ne dépasse pas quelques degrés.)

La propriété de concentrer en un point unique un faisceau de rayons incidents parallèles n'est donc qu'approximative pour un miroir sphérique de

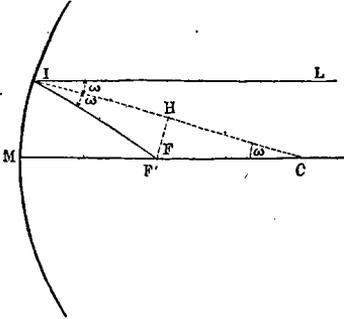


Fig. 475.

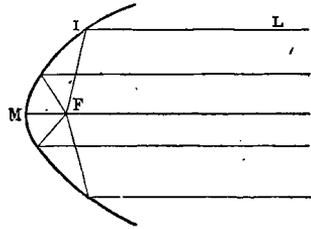


Fig. 476.

petite ouverture⁽¹⁾; elle est rigoureuse pour un **miroir parabolique** (fig. 476) recevant un faisceau de rayons parallèles à son axe. Inversement, un miroir parabolique réfléchit parallèlement à son axe des rayons lumineux émanant d'un point placé en son foyer⁽²⁾.

Applications. — 1° Quelle est la hauteur H d'une tour projetant une ombre de 42 mètres de longueur, alors qu'une tige verticale de 1 mètre de haut offre une ombre de 60 centimètres?

2° Dans une chambre noire dont l'ouverture a 1 centimètre de diamètre on place à 1 mètre de l'ouverture un écran qui reçoit normalement les rayons solaires. Quel sera le diamètre D de l'image circulaire obtenue? Le diamètre apparent du Soleil est de 32'.

3° Deux flammes, d'intensité 16 et 9, sont distantes de 140 centimètres; où faut-il placer un écran sur la ligne qui les joint pour qu'il soit également éclairé par les deux sources?

4° La flamme d'une bougie, haute de 2 centimètres, est placée perpendiculairement à l'axe principal en avant d'un miroir concave à une distance de 40 centimètres. La distance focale du miroir est 30 centimètres. Quelle est la position et la grandeur de l'image?

5° Démontrer que si un rayon lumineux se réfléchit successivement sur deux miroirs faisant entre eux un angle ω , la direction du rayon réfléchi fait un angle 2ω avec la direction du rayon incident.

6° Démontrer que si un miroir tourne d'un angle α autour d'un axe I passant dans son plan, l'image d'un point A tourne d'un angle 2α autour du même axe.

7° Quel est le diamètre de l'image du Soleil dans un miroir concave de 1 mètre de rayon? Le diamètre apparent du Soleil est de 32'.

8° Avec le miroir concave précédent recevant les rayons solaires et ayant un diamètre de base de 1 mètre, dans quel rapport l'éclaircissement est-il accru au foyer?

9° A quelle distance d'un miroir concave de 5 centimètres de foyer doit être placée

(1) Un *miroir* est dit *aplanétique* quand il jouit de la propriété géométrique de donner d'un point lumineux une image réduite à un point. Un miroir aplanétique est donc un miroir dépourvu d'aberration. Un miroir plan est aplanétique quelle que soit la position du point lumineux. Un miroir sphérique n'est aplanétique que pour un point lumineux placé en son centre.

(2) Un *miroir parabolique* est une surface engendrée par la rotation d'une parabole autour de son axe (droite qui joint le foyer de la parabole à son sommet). Dans une parabole, un rayon FI et la droite IL parallèle à l'axe font avec la normale des angles égaux; IL est donc le rayon réfléchi.

une petite droite perpendiculaire à l'axe principal pour que son image soit agrandie 5 fois ?

10° Un point lumineux se trouve à une distance de 24 centimètres d'un miroir concave de 5 centimètres de foyer ; où est son image ? Si le point lumineux s'éloigne de 3 centimètres du miroir, de combien se déplace l'image ?

11° A quelle distance un objet réel doit-il être placé d'un miroir convexe pour que son image soit égale à la moitié de l'objet ?

12° Un objet de 4 centimètres de hauteur est placé perpendiculairement à l'axe principal, à 10 centimètres d'un miroir convexe de 30 centimètres de distance focale. Trouver la position et la grandeur de l'image.

RÉFRACTION

647. Déviation brusque d'un rayon lumineux. — En passant d'un milieu transparent dans un autre, sous une incidence oblique, un rayon lumineux se brise à la surface de séparation des deux milieux. Les deux trajets, *séparément rectilignes* dans chacun des deux milieux, ne sont pas en prolongement. Le changement brusque de direction est appelé **réfraction**. Le second milieu est dit plus ou moins réfringent que le premier suivant que le rayon lumineux se rapproche ou s'écarte de la normale en y pénétrant.

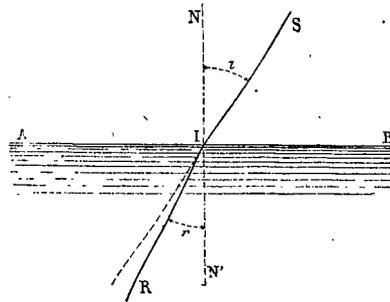


Fig. 477.

Le *plan d'incidence* est le plan mené par le rayon incident et la normale élevée au point d'incidence sur la surface de séparation ; le *plan de réfraction* est le plan mené par le rayon réfracté et la normale ; on nomme *angle d'incidence* l'angle SIN du rayon incident et de la normale, *angle de réfraction* l'angle RIN' du rayon réfracté et de la normale (fig. 477).

648. Lois de la réfraction. — La réfraction de la lumière a lieu conformément aux deux lois suivantes, appelées *lois de Descartes* :

1° *Le rayon réfracté reste dans le plan d'incidence ; par suite, le rayon incident, la normale au point d'incidence et le rayon réfracté sont dans un même plan normal à la surface de séparation des deux milieux.*

2° Quel que soit l'angle d'incidence, pour les deux mêmes milieux, le sinus de l'angle d'incidence et le sinus de l'angle de réfraction sont dans un rapport constant.

$\frac{\sin i}{\sin r} = m$; le rapport constant m se nomme **indice de réfraction** du second milieu (où l'angle est r) par rapport au premier.

$m > 1$ si le second milieu est plus réfringent, $m < 1$ si le second milieu est moins réfringent que le premier. L'indice de réfraction est une constante physique qui peut servir à caractériser un corps.

Lorsque l'angle d'incidence est très petit, il en est de même de l'angle de réfraction, d'après l'équation $\sin i = m \sin r$; les sinus peuvent être alors sans erreur sensible remplacés par les arcs et la deuxième loi de la réfraction prend la forme simple $i = mr$.

649. Vérification des lois de la réfraction. — Appareil. —

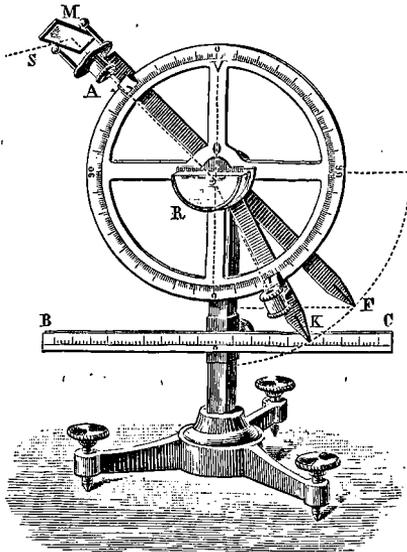


Fig. 478.

On peut employer un appareil analogue à celui qui a servi pour les lois de la réflexion (fig. 478).

Le miroir plan est remplacé par une cuve hémicylindrique en verre R dont le contour circulaire a pour centre le centre du cercle vertical divisé. Dans cette cuve on verse de l'eau jusqu'à la hauteur exacte du centre O du cercle. En inclinant convenablement le miroir M, on dirige un rayon solaire de manière qu'en suivant l'axe du tube A il vienne frapper le liquide en O. Ce rayon AO se réfracte, et au lieu de continuer sa route parallèlement à OF, il sort parallèlement à OK. Le rayon réfracté se présente normalement à la paroi de la cuve cylindrique et ne subit pas de nouvelle réfraction à la sortie.

Le rayon réfracté se présente normalement à la paroi de la cuve cylindrique et ne subit pas de nouvelle réfraction à la sortie.

Première loi. — On fait tourner la deuxième alidade jusqu'à ce que le rayon émergent suive l'axe du tube qu'elle porte. Les axes des deux tubes étant à la même distance du cercle divisé, le plan de ces

axes est *parallèle au plan du cercle, vertical comme lui* et perpendiculaire à la surface de l'eau qui est horizontale. Ce plan vertical passe par le point d'incidence, il contient le rayon incident et le rayon réfracté qui ont suivi les axes des deux tubes et la normale au point d'incidence. La première loi est donc vérifiée.

Deuxième loi. — Si l'on donne à l'angle d'incidence dans l'air des valeurs $i, i', i'' \dots$, l'angle de réfraction prendra dans l'eau des valeurs $r, r', r'' \dots$. La ligne 0 — 180 du cercle divisé est verticale, et les alidades munies de verniers mesurent directement les angles i et r . Connaissant les angles, on calcule les sinus.

La mesure des sinus se fait d'ailleurs directement au moyen d'une règle divisée horizontale BC pouvant glisser le long du diamètre vertical du cercle divisé : on amène cette règle à toucher successivement la pointe F de l'alidade parallèle au rayon incident et la pointe K de l'alidade parallèle au rayon réfracté. Ces deux points F et K sont à la même distance du centre O, et les perpendiculaires abaissées de F et K sur le diamètre vertical du cercle divisé, sont proportionnelles aux sinus des angles d'incidence et de réfraction ; leurs longueurs sont lues directement sur la règle divisée horizontale.

On vérifie que le quotient $\frac{\sin i}{\sin r}$ est constant. Ce quotient est l'*indice de réfraction de l'eau par rapport à l'air*. Avec un demi-cylindre de verre substitué à la cuve remplie d'eau, le quotient $\frac{\sin i}{\sin r'}$ représenterait l'indice du verre par rapport à l'air (angle r' dans le verre).

650. Réversibilité. — Supposons les deux alidades fixées en OA et en OK dans les positions relatives au passage de l'air dans l'eau pour une incidence déterminée (fig. 478) : un rayon lumineux arrivant par la partie inférieure parallèlement à la deuxième alidade suivra la même route, mais en sens contraire ; KO devenant la direction du rayon incident, OA sera la direction du rayon réfracté. C'est la loi de réversibilité ou de *retour inverse des rayons*. Au passage de l'eau dans l'air, le rayon réfracté s'éloigne de la normale.

Indices inverses. — i désignant l'angle d'incidence dans un milieu M et r l'angle de réfraction dans le milieu M', $\frac{\sin i}{\sin r} = m$ est l'indice de réfraction du milieu M' par rapport au milieu M.

Faisons suivre au rayon le chemin inverse : r étant l'angle d'inci-

dence dans le milieu M' , i sera l'angle de réfraction dans le milieu M , $\frac{\sin r}{\sin i} = \frac{1}{m}$ sera l'indice de réfraction du milieu M par rapport au milieu M' .

L'indice de l'eau par rapport à l'air est $\frac{4}{3}$ et l'indice de l'air par rapport à l'eau est $\frac{3}{4}$.

m_{12} étant l'indice du milieu 2 par rapport au milieu 1 et m_{21} l'indice du milieu 1 par rapport au milieu 2, $m_{12} m_{21} = 1$.

Les lois de la réfraction conduisent, dans l'étude des prismes et des lentilles, à des conséquences qui sont toujours d'accord avec l'observation. Cet accord est une nouvelle preuve de l'exactitude des lois de la réfraction.

651. Déplacement apparent des objets par réfraction.—

Au fond d'un vase vide à parois opaques on met une pièce de monnaie et on place l'œil en A de manière qu'un rayon visuel BA rasant le bord du vase atteigne l'extrémité m de la pièce de monnaie (fig. 479). En descendant un peu l'œil à partir de cette position vers O , la pièce

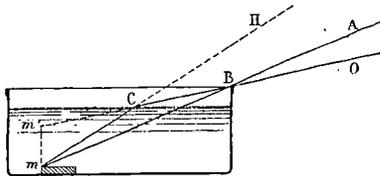


Fig. 479.

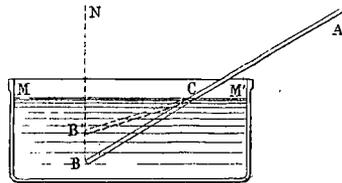


Fig. 480.

devient complètement invisible. Si un aide vient à verser de l'eau dans le vase, la pièce devient visible pour l'œil en O , et le bord m est vu suivant OC ; le rayon lumineux mC qui continuait sa route suivant CH lorsque le vase était vide se réfracte en C suivant CO quand le vase est plein d'eau. L'œil rapporte ce point m au point de concours m' des rayons qu'il reçoit et voit la pièce de monnaie relevée vers la surface de l'eau⁽¹⁾.

Un bâton plongé obliquement dans l'eau paraît brisé au point d'immersion (fig. 480), et la partie plongée paraît soulevée car chacun de ses points semble relevé vers la surface de l'eau comme dans l'expérience précédente.

(1) Le nouveau point de concours m' est à *peu près* sur la verticale du point m , le rayon vertical issu de m sortant sans déviation.

652. Réfraction atmosphérique. — La réfraction de la lumière nous fait voir les astres dans une direction plus voisine du zénith que celle qu'ils occupent réellement. L'atmosphère est constituée par des couches gazeuses concentriques qui augmentent de densité en s'approchant du sol. La réfraction croissant dans un gaz avec la densité, un rayon SA éprouve en traversant les couches successives de l'atmosphère une série de déviations qui le rapprochent de plus en plus de la normale (fig. 481).

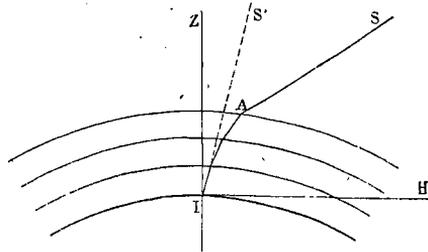


Fig. 481.

Comme la densité du gaz et par suite sa réfringence croît par degrés insensibles, la ligne suivie par le rayon est courbe et c'est dans le prolongement IS' de la tangente à la courbe ou suivant la direction du dernier rayon réfracté que l'astre sera vu. C'est ainsi qu'on voit le soleil au-dessus de l'horizon avant son lever réel et après son coucher.

653. Passage de la lumière dans un milieu plus réfringent.

— Soit un rayon lumineux passant de l'air dans un milieu plus réfringent tel que l'eau, l'angle d'incidence i est supérieur à l'angle de réfraction r , on a donc $\sin i > \sin r$, car les angles sont inférieurs à 90° . L'indice m de réfraction de l'eau par rapport à l'air, est supérieur à l'unité.

Lorsque $i = 0$, on a $r = 0$; un rayon incident normal à la surface de séparation la traverse sans déviation. A tout autre rayon incident correspond un rayon réfracté; l'angle d'incidence croissant de 0° à 90° , l'angle de réfraction croît en même temps, mais moins vite que l'angle d'incidence et n'atteint pas 90° . Sous une incidence rasante, $i = 90^\circ$, l'angle de réfraction a sa plus grande valeur L donnée par $\sin 90^\circ = m \sin L$
ou $1 = m \sin L$,

$$\text{d'où } \sin L = \frac{1}{m}.$$

Cet angle L s'appelle **angle limite**. Tous les rayons qui tombent en un point du milieu réfringent se réfractent à l'intérieur

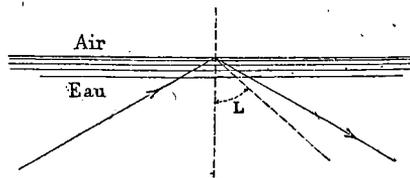


Fig. 482.

d'un cône d'angle L (fig. 482). Si la surface liquide était couverte en ce point d'un écran opaque percé d'un trou, il ne pénétrerait pas de lumière à l'extérieur du cône d'angle L . La valeur de L pour l'eau est environ $48^{\circ}30'$.

654. Passage de la lumière dans un milieu moins réfringent. — Examinons la propagation en sens inverse : pour ne rien changer aux notations antérieures, désignons encore par r l'angle avec la normale dans l'eau et par i l'angle dans l'air : r sera ici l'angle d'incidence dans l'eau, et i l'angle de réflexion dans l'air ; le rayon s'écartant de la normale en passant dans un milieu moins réfringent, l'angle i sera supérieur à l'angle r ; en outre, d'après la réversibilité des rayons (650), les valeurs correspondantes de i et de r sont les mêmes que dans le passage inverse, de l'air dans l'eau et on a encore $\sin i = m \sin r$, (ou $\sin r = \frac{1}{m} \sin i$).

Lorsque $r = 0$, on a $i = 0$; r et i augmentent ensuite en même temps, mais i croît plus vite que r . Lorsque $r = L$, on a $i = 90^{\circ}$ d'après l'équation $\sin i = m \sin L$ puisque $m \sin L = 1$ (653).

Un rayon qui tombe sous l'angle L sort donc dans l'air en rasant la surface de séparation.

On ne peut avoir $r > L$, car le produit $m \sin r$ ou $\sin i$ serait supérieur à l'unité. La réfraction n'est donc possible dans l'air que pour un rayon tombant sous un angle d'incidence inférieur à L .

655. Réflexion totale. — L'expérience prouve que si un rayon tombe sous un angle supérieur à l'angle limite L sur la surface de séparation de deux milieux, en venant du milieu le plus réfringent, il y a *réflexion totale*.

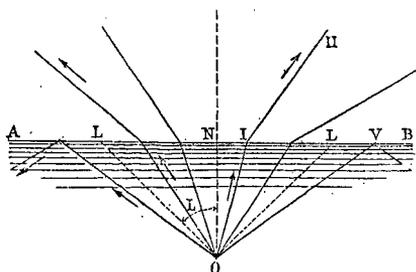


Fig. 483.

Soit un point lumineux O situé dans l'eau (fig. 483), construisons un cône circulaire droit ayant pour axe la normale ON à la surface de séparation des deux milieux et pour angle au sommet l'angle limite NOL , un rayon compris dans ce cône pourra sortir dans l'air, car il tombera

en I sous un angle inférieur à l'angle limite ; un rayon OL dirigé

suivant une génératrice du cône aura un angle d'incidence égal à L et sortira dans l'air en rasant la surface de séparation. Tout rayon OV extérieur au cône fera un angle d'incidence supérieur à l'angle limite et sera réfléchi totalement. La surface du cône sépare donc les rayons issus du point lumineux qui émergent dans l'air de ceux qui subissent la réflexion totale à la surface de séparation.

Il faut remarquer que, sous toute incidence inférieure à L , une partie du rayon incident est réfléchi à la surface de séparation, l'autre partie est réfractée. Pour une même intensité du rayon incident, la portion réfléchi et la portion réfractée, avec deux mêmes milieux, air et eau par exemple, varient avec l'incidence. L'intensité de la portion réfléchi devient notable pour des incidences voisines de l'angle limite, tandis que la portion réfractée dans l'air est très faible. Pour des incidences égales et supérieures à l'angle limite, la réflexion est totale.

Prisme à réflexion totale. — Prenons un prisme de verre dont la section est un triangle rectangle isocèle, et faisons tomber un rayon lumineux normalement sur l'une des faces AB (fig. 484). Ce rayon entré sans déviation. Il tombe sur la face hypoténuse sous une incidence de 45° . Cette incidence est supérieure à l'angle limite qui est environ 41° (pour un verre d'indice égal à $\frac{3}{2}$). Le rayon est donc réfléchi en I totalement sur cette face, comme sur le miroir plan métallique le mieux poli et sort ensuite normalement par la face AC .

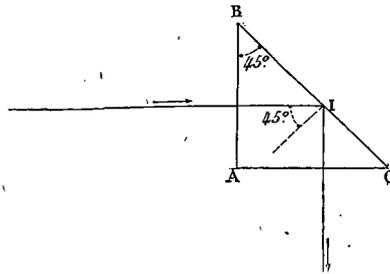


Fig. 484.

656. Réfraction à travers une lame à faces parallèles. — Supposons une lame transparente à faces parallèles, placée dans un milieu indéfini tel que l'air. Un rayon lumineux qui tombe normalement sur cette lame la traverse sans déviation et sans déplacement. Si l'incidence est oblique, il y a un déplacement sans déviation.

Soit i l'angle d'incidence sur la face A (fig. 485), r l'angle de réfraction. L'incidence sur la face B , parallèle à la face A , sera r , les deux angles en I et en I' de la droite II' et des normales étant égaux comme formés par la sécante II' et les parallèles IN , $I'N'$.

Si l'angle d'incidence est r en I' dans le verre, l'angle de réfraction dans l'air sera i , d'après la loi de la réversibilité. La direction de

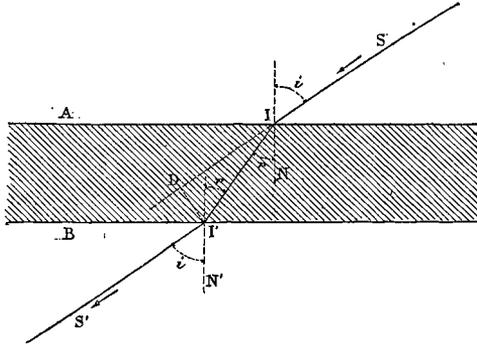


Fig. 485.

sortie $I'S'$ sera donc parallèle à la direction d'entrée IS . Calculons le déplacement $I'D$, pour une lame d'épaisseur e :

$$I'D = II' \sin (i - r)$$

$$\text{or } II' = \frac{e}{\cos r} \quad e = II' \cos r$$

$$I'D = \frac{e \sin (i - r)}{\cos r}.$$

Pour observer le déplacement, on dispose entre une fente éclairée horizontale F et l'œil une lame de verre épaisse MM' à faces planes et parallèles, mais moins large que la fente (fig. 486). Si la lame est

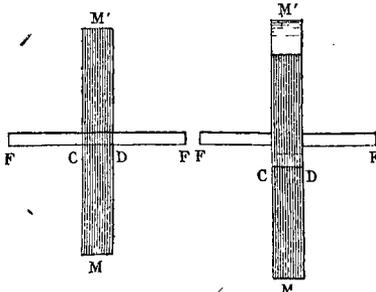


Fig. 486.

normale aux rayons, la bande lumineuse reste rectiligne, la lame MM' ne déplaçant pas les rayons qui la traversent. Si l'on incline la lame sur la direction des rayons, en la laissant parallèle à la fente, par exemple en laissant l'extrémité M fixe et en portant l'extrémité M' en avant du plan de la figure, la portion de la bande lumineuse

CD qui correspond à la lame de verre est transportée parallèlement à elle-même au-dessous de la partie qui reste vue directement.

657. Réfraction à travers plusieurs lames à faces parallèles. — Soit un système de plusieurs lames à faces planes et parallèles, plongé dans l'air et recevant obliquement un rayon lumineux. *L'expérience fait voir* que ce rayon sort parallèlement à sa direction d'entrée. Il y a encore déplacement sans déviation.

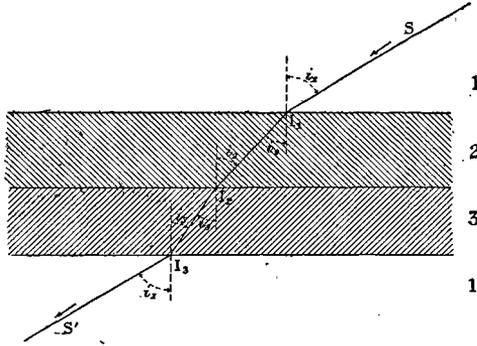


Fig. 487.

Considérons en particulier deux lames (fig. 487). Comme les normales sont parallèles en I_1 et I_2 , les deux angles du rayon avec les normales seront égaux dans le milieu 2; les deux angles seront de même égaux entre eux dans le milieu 3. Mais, si les deux lames sont en contact, rien de ce qui précède ne peut faire prévoir que le rayon émergent I_3S' doit être parallèle au rayon incident SI ; c'est un fait d'observation.

Conformément à la notation adoptée plus haut (650).

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = m_{12} \quad \frac{\sin i_2}{\sin i_3} = m_{23} \quad \frac{\sin i_3}{\sin i_4} = m_{31}$$

Multiplions membre à membre :

$$1 = m_{12} m_{23} m_{31}$$

$$\text{ou } m_{23} = \frac{1}{m_{12} \cdot m_{31}}$$

$$\text{et comme } \frac{1}{m_{31}} = m_{13} \quad m_{23} = \frac{m_{13}}{m_{12}}$$

L'indice de réfraction d'un milieu 3 par rapport à un milieu 2 peut donc s'obtenir *sans mesure directe* en faisant le quotient de deux

indices qui sont les indices des milieux 3 et 2 par rapport à un même milieu 1 quelconque.

658. Indices absolus. — On appelle *indices absolus* les indices de réfraction par rapport au vide. On opère généralement dans l'air et on obtient les indices de réfraction par rapport à l'air.

Pour passer aux indices absolus, représentons par m_{12} l'indice d'un milieu 2 par rapport à l'air (milieu 1), et par m_{02} et m_{01} les indices du milieu 2 et de l'air par rapport au vide (milieu 0).

$$m_{12} = \frac{m_{02}}{m_{01}}$$

$$m_{02} = m_{12} m_{01}$$

l'indice absolu d'une substance est égal au produit de son indice par rapport à l'air par l'indice absolu de l'air.

L'indice absolu de l'air étant très voisin de l'unité (à 0° sous la pression de 76 centimètres de mercure, il est égal à 1,000294), l'indice de réfraction d'une substance par rapport au vide diffère très peu de son indice par rapport à l'air.

659. Énoncé général de la loi des sinus. — Les angles de la réfraction dans la première lame du système précédent sont liés par la relation

$$\sin i_1 = m_{12} \sin i_2$$

les angles de la réfraction dans la dernière lame par

$$\sin i_1 = m_{13} \sin i_3$$

On a donc $\sin i_1$ ou $1 \cdot \sin i_1 = m_{12} \sin i_2 = m_{13} \sin i_3$.

Au passage d'un milieu d'indice m_{12} dans un autre milieu d'indice m_{13} , les angles des rayons avec la normale à la surface de séparation sont liés aux indices par rapport à un même milieu par l'équation

$$m_{12} \sin i_2 = m_{13} \sin i_3.$$

$$\text{D'autre part, } m_{12} = \frac{m_{02}}{m_{01}}, \quad m_{13} = \frac{m_{03}}{m_{01}}$$

$$\text{On a donc } m_{02} \sin i_2 = m_{03} \sin i_3.$$

C'est la loi générale de la réfraction; au passage d'un milieu 2 dans un milieu 3, le produit de l'indice d'un milieu (par rapport au

vide ou par rapport à un même milieu quelconque) par le sinus de l'angle d'incidence dans ce milieu à la surface de séparation *est constant*.

L'énoncé de la *constance de ce produit* facilite la solution de la plupart des problèmes relatifs à la réfraction.

PRISME

660. On appelle *prisme* en optique un milieu transparent limité par deux faces planes non parallèles. L'intersection AD des deux faces planes ou l'arête du dièdre qu'elles forment est appelée l'*arête réfringente* du prisme, l'angle du dièdre est l'**angle réfringent** du prisme. D'ordinaire, la troisième face est taillée parallèlement à l'arête réfringente AD; cette face s'appelle la *base* du prisme (fig. 488). On peut donc faire usage de l'un des trois angles réfringents. Les deux plans perpendiculaires aux arêtes qui limitent le prisme et qu'on appelle bases en géométrie ne jouent pas de rôle en optique. *Une section déterminée par un plan perpendiculaire aux arêtes latérales* s'appelle **section principale**. La section principale

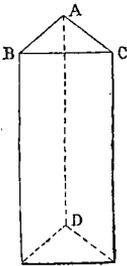


Fig. 488.

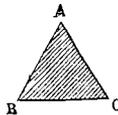


Fig. 489.

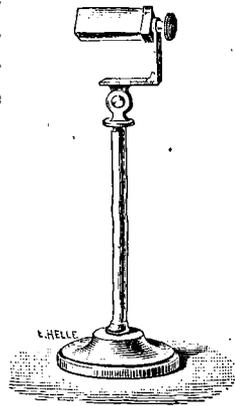


Fig. 490.

ABC du prisme est un triangle (fig. 489). On fait usage de prismes soutenus par des supports (fig. 490) qui permettent de les faire tourner et de rendre l'arête réfringente horizontale ou verticale. Nous étudierons l'effet produit par un prisme sur la marche d'un faisceau lumineux *dans une section principale*.

661. Marche des rayons dans un prisme. — Considérons un

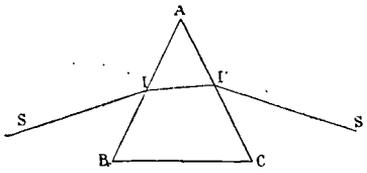


Fig. 491.

prisme formé d'une substance *plus réfringente* que le milieu dans lequel il est plongé. Un rayon de *couleur déterminée* SI qui tombe sur ce prisme est *dévié* et sort suivant une direction I'S' (fig. 491).

Construction du rayon dévié. — Soit SI un rayon incident de *couleur déterminée* contenu dans *une section principale* (fig. 492) : la normale IN à la face d'entrée se trouve dans cette section qui est, par conséquent, le plan d'incidence. Le rayon réfracté en I y reste donc

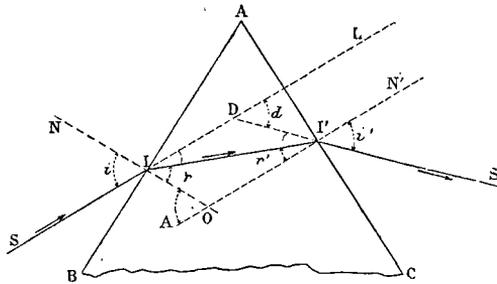


Fig. 492.

aussi. La normale I'N' en I' étant également dans le même plan, ce plan est encore le plan d'incidence pour le rayon II', et le rayon réfracté en I' y reste également. Il résulte donc de la première loi de la réfraction que, si le rayon incident se trouve dans une section principale, il s'y maintient à l'intérieur du prisme et à la sortie.

Chacune des deux réfractions a pour effet d'abaisser le rayon *vers la base* BC du prisme, car en I le rayon réfracté dans le milieu réfringent se rapproche de la normale IN, et en I' le rayon réfracté dans l'air s'éloigne de la normale I'N'.

Les prolongements du rayon incident et du rayon émergent se rencontrent en D ; l'angle des deux directions DL, DS' prises dans le sens où se propagent les rayons lumineux s'appelle la *déviations* : c'est l'angle LDS' dont tourne le rayon en traversant le prisme.

Si, au lieu de recevoir le rayon émergent sur un écran, on le reçoit dans l'œil on voit ce rayon *relevé vers l'arête réfringente*. En regardant à travers un prisme un point lumineux O qui envoie un faisceau

lumineux *très étroit* (fig. 493), on voit ce point en O' sur la direction prolongée des rayons émergents et relevé vers le sommet du prisme.

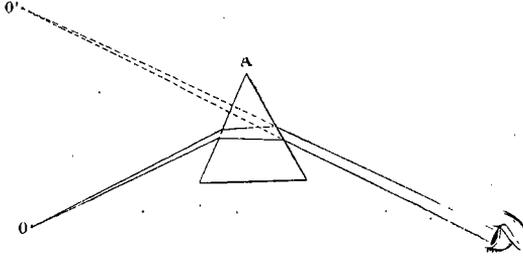


Fig. 493.

L'image est *virtuelle*, car elle est formée par les rayons réfractés prolongés en sens inverse de leur propagation.

Calcul de la déviation. — Désignons par i l'angle d'incidence en I dans l'air sur la première face, par r l'angle de réfraction en I dans le milieu réfringent, par r' l'angle d'incidence en I' dans le prisme, par i' l'angle d'émergence dans l'air en I' ; i et i' sont les angles extérieurs, r et r' les angles intérieurs (fig. 492).

L'angle de déviation d , extérieur au triangle IDI' , est égal à la somme $\widehat{DII'} + \widehat{DI'I}$, c'est-à-dire à $(i - r) + (i' - r')$.

$$d = i + i' - (r + r')$$

D'autre part, l'angle en O, extérieur au triangle $II'O$, est égal à $r + r'$; il est aussi égal à l'angle A du prisme (étant aigu et ayant ses côtés perpendiculaires à ceux de l'angle A).

$$\text{1. On a donc } A = r + r'$$

$$\text{2. par suite } d = i + i' - A.$$

A ces deux équations, joignons les relations

$$\text{3. } \sin i = m \sin r \quad \text{4. } \sin i' = m \sin r'.$$

Nous aurons quatre équations entre les sept variables

$$i, i', r, r', m, d, A.$$

Supposons i, m et A connus, l'équation $\sin i = m \sin r$ donnera r ; $r + r' = A$ donnera r' ; enfin, $\sin i' = m \sin r'$ fera connaître i' , et d sera déterminé.

La déviation dépend donc de i , m et A , et de ces trois variables seulement. Pour un prisme donné, m et A sont constants, d ne dépend que de i .

Lorsque l'incidence est petite et que l'angle du prisme A est petit, aux équations $d = i + i' - A$ et $A = r + r'$

on peut adjoindre $i = mr$ (parce que i est petit) au lieu de $\sin i = m \sin r$

$$i' = mr' \quad (r' \text{ est petit parce que } A \text{ et } r \text{ le sont}).$$

$$d = mr + mr' - A = mA - A$$

$d = (m - 1) A$ expression approchée, indépendante de l'incidence.

662. Étude expérimentale de la déviation. — La déviation

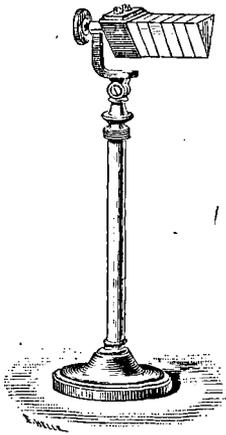


Fig. 494.

augmente avec la réfringence du prisme (pour une même incidence et des prismes de même angle). — On le démontre avec le *polyprisme*, formé de plusieurs prismes égaux, de substances différentes, accolés par leurs sections principales et ayant leurs arêtes en prolongement (fig. 494). On fait arriver sur une face un faisceau provenant d'une fente éclairée *parallèle à l'arête réfringente*, chaque prisme produit une déviation particulière, croissant avec l'indice du prisme; les images sont parallèles à l'arête, mais ne forment pas une même ligne droite.

La déviation augmente avec l'angle réfringent (pour une même incidence et des prismes de même substance). — On le démontre avec un *prisme liquide à angle variable* (fig. 495).

C'est une cuve prismatique à fond plan dont deux faces sont deux lames de verre m et n mobiles autour de deux charnières horizontales; ces deux lames glissent à frottement entre deux parois métalliques parallèles et fixes. Si les deux lames de verre sont verticales, un faisceau lumineux les traverse sans déviation. Laissant immobile la face d'entrée n pour maintenir l'angle d'incidence constant à l'entrée du prisme, on incline la face de sortie m en l'écartant par le haut, ce qui forme un prisme dont l'arête est horizontale et en bas.

Le faisceau émergent est relevé, et il l'est d'autant plus qu'on augmente davantage l'angle du prisme.

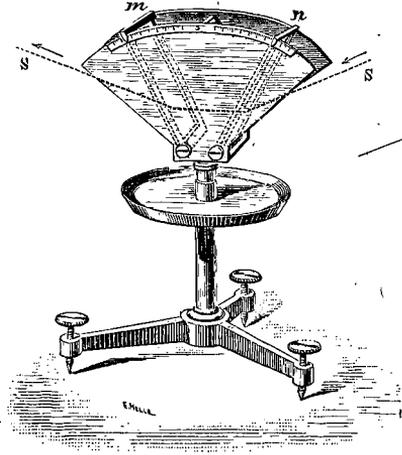


Fig. 495.

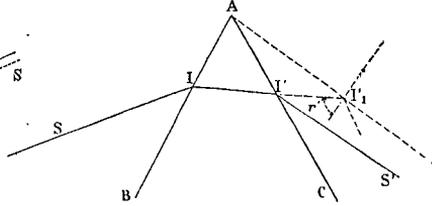


Fig. 496.

Pour une incidence déterminée, on ne peut pas accroître beaucoup la déviation en augmentant l'angle du prisme, car on fait croître en même temps l'angle r' sous lequel le rayon intérieur vient rencontrer la deuxième face AC (d'après l'é-

quation $A = r + r'$), et cet angle finit par atteindre et dépasser l'angle limite. L'émergence n'a plus alors lieu en I' ; il y a *réflexion totale* (fig. 496).

La déviation varie avec l'angle d'incidence (pour un prisme de nature et d'angle déterminés). — Supposons l'arête du prisme hori-

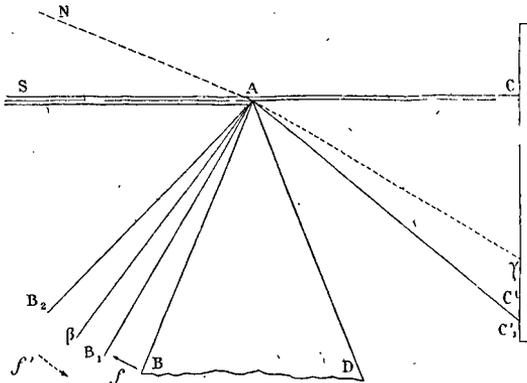


Fig. 497.

zontale et prenons pour plan de la figure un plan perpendiculaire aux arêtes, c'est-à-dire une section principale (fig. 497). Faisons tomber

deux angles extérieurs en I et I' étant égaux, les angles intérieurs r_1 sont aussi égaux, et par suite leurs compléments AII' et AI'I. Le rayon intérieur II' forme donc avec les côtés IA, I'A un triangle isocèle, il est *perpendiculaire à la bissectrice* de l'angle A (fig. 498).

La déviation minimum est l'angle extérieur en D du triangle DII'; cet angle est égal à la somme des deux angles intérieurs ou $2(i_1 - r_1)$. D'autre part, l'angle extérieur IOE du triangle II'O est égal à $2r_1$ et à l'angle A du prisme

$$A = 2r_1 \quad D = 2i_1 - A.$$

663. Mesure des indices de réfraction. — Lorsqu'un prisme est placé par rapport à un rayon incident dans la position du minimum de déviation, l'angle d'incidence i_1 est lié à la déviation minimum par l'équation $D = 2i_1 - A$, d'où $i_1 = \frac{A + D}{2}$, l'angle de réfraction est $r_1 = \frac{A}{2}$; i_1 et r_1 sont des angles d'incidence et de réfraction qui se correspondent; par suite,

$$\frac{\sin i_1}{\sin r_1} = m \quad \text{ou} \quad \frac{\sin \frac{A + D}{2}}{\sin \frac{A}{2}} = m. \quad (1)$$

Pour déterminer l'indice de réfraction d'une substance, on forme un prisme avec cette substance, on mesure l'angle réfringent A, puis la déviation minimum D d'un rayon réfracté à travers l'angle A : l'équation (1) donne l'indice de réfraction.

Applications. — 1° Un rayon de lumière homogène tombe sous l'incidence $i = 30^\circ$ sur une lame de verre à faces parallèles d'indice $\frac{3}{2}$ et de 20 centimètres d'épaisseur. Calculer le déplacement latéral du rayon incident.

2° Quel est l'indice de réfraction du verre par rapport à l'eau? Indice de réfraction de l'eau par rapport à l'air $\frac{4}{3}$; indice de réfraction du verre par rapport à l'air $\frac{3}{2}$.

3° Pour quelle incidence aura lieu la réflexion totale d'un rayon lumineux qui passe du verre dans l'eau?

4° Soit un prisme dont l'angle réfringent est de 60° . On fait tomber un faisceau de rayons jaunes dans la section principale sous un angle d'incidence de 45° l'indice de réfraction est $\sqrt{2}$. Quelle est la déviation?

5° L'indice de réfraction du flint-glass est 1,635 pour la lumière jaune de l'alcool salé; quelle sera la déviation produite par un prisme d'un angle de 2° pour un rayon jaune tombant sous une petite incidence?

6° Quel est l'angle d'un prisme d'eau qui produirait pour de petites incidences la même déviation qu'un prisme de verre de 2° ? Indice de réfraction de l'eau $\frac{4}{3}$, indice de réfraction du verre $\frac{3}{2}$.

7° Calculer l'indice de réfraction d'un prisme pour une radiation déterminée, sachant que l'angle réfringent est de 60° et l'angle de déviation minimum pour cette radiation égal à 30° .

8° Un rayon de lumière tombe perpendiculairement sur l'une des faces d'un prisme dont l'angle réfringent est de 30° : on mesure la déviation δ que ce rayon subit par la réfraction. Calculer l'indice de réfraction m de la substance du prisme en supposant que l'angle de déviation est de 30° ?

9° L'indice de réfraction du verre étant $\frac{3}{2}$, quelle est la valeur maximum de l'angle réfringent A d'un prisme de verre pour laquelle aucun des rayons incidents ne pourra sortir ?

10° Un rayon lumineux tombe sur la face AB d'un prisme BAC sous une incidence de 45° (fig. 492). Quel doit être l'angle A du prisme pour que le rayon émergent soit normal à la face AC ? Indice de réfraction $\frac{3}{2}$.

LENTILLES

664. Si la surface de séparation de deux milieux transparents est courbe, un rayon réfracté se construit en remplaçant la surface par le plan tangent au point d'incidence.

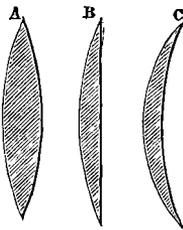


Fig. 499.

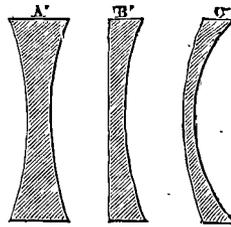


Fig. 500.

On appelle *lentilles sphériques* des milieux transparents terminés par deux portions de surfaces sphériques ou par une surface sphérique et un plan. On en distingue deux genres :

1° Les lentilles **convergentes**, à bords minces, plus épaisses au milieu que sur les bords. Une lentille convergente peut être *biconvexe* A, terminée par deux surfaces convexes ; *plan-convexe* B, limitée par un plan et une surface convexe ; *concave-convexe* C, comprise entre deux surfaces, l'une concave, l'autre convexe, la face concave ayant un rayon plus grand que la face convexe (fig. 499) ;

2° Les lentilles **divergentes**, à bords épais, plus minces au milieu

que sur les bords. Une lentille divergente peut être *biconcave* A', terminée par deux surfaces dont les convexités se regardent; *plan-concave* B', limitée par un plan et une surface concave; *convexe-concave* C', comprise entre deux surfaces, l'une convexe, l'autre concave, la face convexe ayant un rayon plus grand que la face concave (fig. 500).

665. Axe principal. — L'*axe principal* d'une lentille est la ligne qui joint les centres des sphères auxquelles appartiennent les deux faces; lorsqu'une face est plane, c'est la perpendiculaire abaissée du centre de la partie sphérique sur la face plane. Les *sommets* sont les points d'intersection de la lentille et de l'axe principal.

666. Marché des rayons parallèles à l'axe principal. — **Lentille convergente.** — Si, dans la chambre obscure, nous faisons arriver sur une lentille convergente un faisceau de rayons parallèles

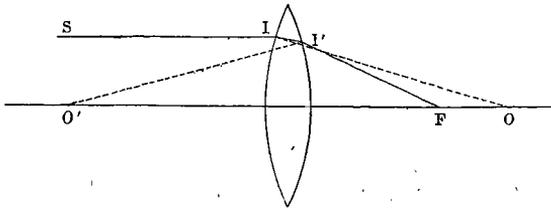


Fig. 501.

à l'axe principal, les rayons éprouvent à l'entrée et à la sortie, en I et en I', une réfraction qui les rejette vers l'axe principal (fig. 501).

Un rayon SI éprouve en effet, en pénétrant en I dans un milieu plus réfringent, une réfraction qui le rapproche de la normale OI et l'incline vers l'axe en I'. En tombant en I' sur la deuxième face, il éprouve une nouvelle réfraction qui l'écarte de la normale O'I' et l'incline encore vers l'axe⁽¹⁾.

Après ces deux réfractions, ils viennent converger, comme l'expérience le démontre, en un point de l'axe F qui est le même pour tous

(1) On se rend encore compte de l'action d'une lentille convergente sur un rayon lumineux en assimilant la réfraction de la lumière par les lentilles à la réfraction par un prisme. On peut en effet concevoir qu'aux points d'incidence et d'émergence d'un rayon intérieur II' les surfaces courbes sont remplacées par leurs plans tangents qui forment deux surfaces planes inclinées entre elles. En substituant aux surfaces courbes une infinité d'éléments plans infiniment petits, on peut assimiler une lentille convergente à un assemblage de prismes ayant tous leurs bases tournées vers l'axe principal et faisant converger les rayons réfractés vers cet axe.

les rayons incidents parallèles à l'axe (fig. 502). Ce point est appelé **foyer principal**. Le faisceau cylindrique s'est transformé en un faisceau conique ayant pour sommet le foyer ; le faisceau conique prolongé au delà du foyer forme un faisceau divergent.

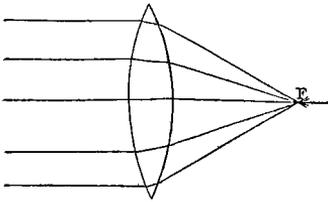


Fig. 502.

La distance du foyer principal à la lentille est la *distance focale principale*.

D'après la réversibilité des rayons dans la réfraction, un point lumineux placé en F donne un faisceau réfracté parallèle à l'axe principal.

Lentille divergente. — En tombant sur une lentille divergente à

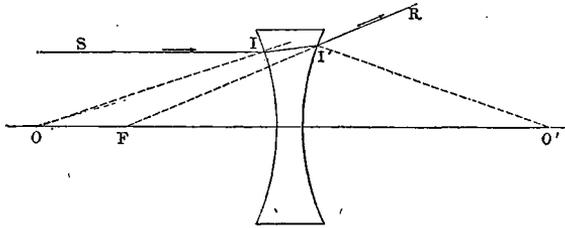


Fig. 503.

bords épais, des rayons parallèles à l'axe forment après leur sortie

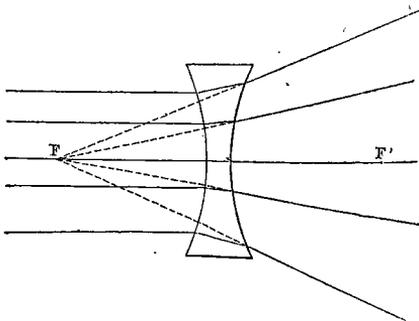


Fig. 504.

de la lentille un faisceau de rayons qui s'écartent de plus en plus et divergent. Un rayon SI éprouve en pénétrant en I une réfraction qui le rapproche de la normale OI et l'écarte de l'axe en II' (fig. 503). En tombant en I' sur la deuxième face, il éprouve une nouvelle réfraction qui l'écarte de la normale O'I' et éloigne encore les rayons

de l'axe⁽¹⁾. Après ces deux réfractions, les prolongements des rayons

(1) Une lentille divergente se comporte comme un ensemble de prismes dont les bases sont dirigées du côté opposé à l'axe principal. Ces prismes dévieront les rayons réfractés vers leurs bases et les écarteront de l'axe.

divergents se rencontrent en un point situé du côté où la lentille reçoit la lumière, ce point F s'appelle le *foyer principal virtuel* de la lentille (fig. 504).

L'œil placé dans le faisceau divergent voit ce point lumineux. La distance de ce point à la lentille est la *distance focale principale*.

En vertu de la réversibilité des rayons dans la réfraction, un faisceau incident convergent en F , forme après la réfraction un faisceau parallèle à l'axe principal.

Une lentille est dite à long ou court foyer suivant que la distance focale est grande ou petite.

LENTILLES CONVERGENTES

667. Foyers conjugués. — Sur l'axe principal d'une lentille convergente, au delà du foyer principal, plaçons un point lumineux ou une source lumineuse de petite dimension : les rayons issus de ce point et tombant sur la lentille vont après leur sortie converger en

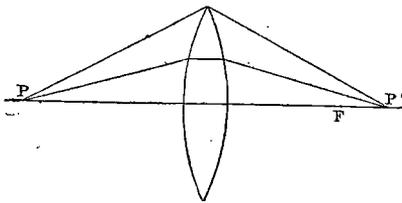


Fig. 505.

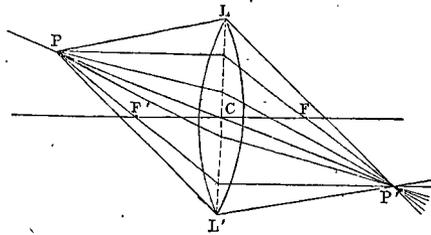


Fig. 506.

un même point de l'axe P' (fig. 505), situé au delà du foyer principal F . En effet, si l'on place en ce point un écran blanc, l'image de la source lumineuse s'y forme.

En vertu de la réversibilité de la marche des rayons dans la réfraction, si le point lumineux était en P' , le point de convergence des rayons réfractés par la lentille serait en P . Les points P et P' sont appelés *foyers conjugués*.

Un point lumineux P placé en dehors de l'axe principal, mais à peu de distance de cet axe, a encore un foyer conjugué P' (fig. 506). Nous verrons que, dans une lentille très mince, l'image P' se trouve sur une droite joignant le point lumineux P à un point fixe particulier C , situé sur l'axe principal et appelé *centre optique*.

668. Centre optique. — Représentons un faisceau issu d'un point P quelconque et venant converger en un point P' après sa réfraction à travers une lentille (fig. 507).

Des rayons tels que PH rencontrant la lentille au voisinage de L sont déviés au-dessous du rayon incident prolongé, d'autres tels que PG voisins de L' sont déviés au-dessus. En passant des uns aux autres, la déviation diminue graduellement de grandeur avant de changer de sens. Par suite, entre les rayons déviés dans un sens et

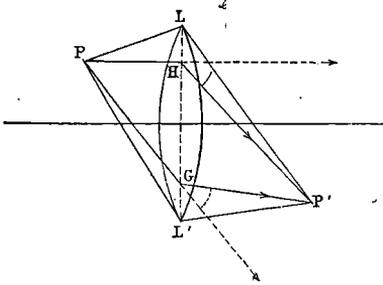


Fig. 507.

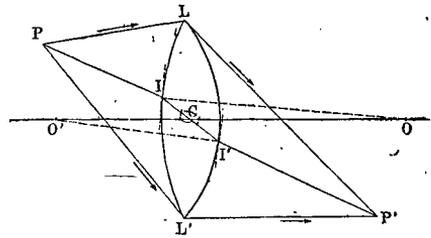


Fig. 508.

les rayons déviés en sens contraire, il y en a un qui n'éprouve pas de déviation.

Les rayons qui sortent de la lentille parallèlement à leur direction d'entrée suivent à l'intérieur de la lentille des routes qui passent toutes par un *point fixe* appelé centre optique.

Soit, en effet, un rayon lumineux qui traverse une lentille sans changer de direction, les normales OI et O'I' aux points d'incidence et d'émergence sont parallèles et par conséquent aussi les plans tangents en ces points.

Prenons pour plan de la figure le plan qui passe par l'axe principal et la normale OI : il contient l'autre normale O'I' qui a un point O' sur l'axe et est parallèle à OI ; la droite II' est aussi dans ce plan et rencontre l'axe principal. Le point de rencontre C est un point fixe (fig. 508).

En effet, les deux triangles ICO, I'CO' dont les angles sont égaux, sont semblables ; par suite

$$\frac{CO}{CO'} = \frac{OI}{O'I'} = \frac{R}{R'}$$

Comme il n'y a qu'un point C divisant la droite OO' en deux segments proportionnels à deux longueurs données R et R', ce point C

sera le même pour tous les trajets II' correspondant à des rayons incidents et émergents parallèles.

Axes secondaires. — Le déplacement latéral des deux rayons parallèles PI et $P'I'$ est négligeable quand la lentille est très mince, et on peut admettre que PI et $P'I'$ sont alors en prolongement. Le rayon sans déviation est la ligne PP' : on l'appelle axe secondaire.

Dans une lentille très mince, la droite PP' passe par le centre optique; l'axe secondaire d'un point P est la droite qui joint ce point au centre optique. Le centre optique d'une lentille sphérique joue le rôle du centre de la sphère dans un miroir sphérique.

Position du centre optique. — Graphiquement, la position du centre optique d'une lentille se détermine en joignant les points de contact I et I' de

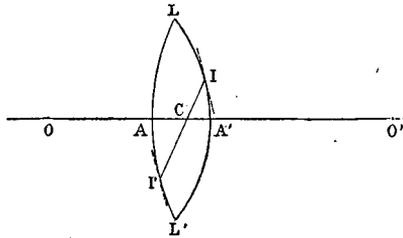


Fig. 509.

deux plans tangents parallèles (fig. 509). Sa position se déduit encore de l'équation

$$\frac{CO}{CO'} = \frac{R}{R'}$$

Posons $CA = x$ $AA' = e$

$$CO = R - e + x$$

$$CO' = R' - x$$

$$\frac{R - e + x}{R' - x} = \frac{R}{R'}$$

$$x = \frac{eR'}{R + R'}$$

1° Lentille biconvexe avec $R = R'$; $x = \frac{e}{2}$.

2° Lentille plan-convexe, R ou $R' \infty$; centre optique au sommet de la surface courbe.

Pour une lentille infiniment mince, x est nul, le centre optique se confond avec A et A' .

669. Lentille infiniment mince. — Dans les constructions qui suivront, nous supposons que nous avons affaire à une lentille de très petite épaisseur. Prenant pour plan de la figure un plan qui passe par l'axe principal, nous remplacerons les faces de la lentille par les plans tangents menés aux sommets et nous confondrons en un seul ces deux plans tangents très voisins. La lentille sera remplacée par

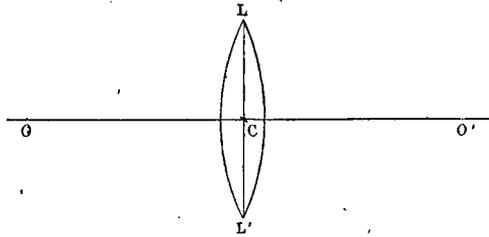


Fig. 510.

l'intersection LL' de ce plan perpendiculaire à l'axe et du plan de la figure. Le plan tangent commun peut être confondu avec le cercle d'intersection LL' des deux faces sphériques de la lentille. Le centre optique est le point C où la droite LL' coupe l'axe (fig. 510).

Pour une lentille très mince dont les deux faces sont baignées par un même milieu, les deux foyers principaux F et F' sont situés de part et d'autre à égale distance de la lentille, même lorsque les rayons des deux surfaces sphériques terminales sont inégaux.

670. Plans focaux. — L'expérience montre que si l'on fait tomber sur la lentille un faisceau de rayons parallèles, peu inclinés sur l'axe principal, tous les rayons réfractés vont converger en un foyer unique. Ce foyer doit se trouver sur l'axe secondaire du faisceau, c'est-à-dire sur le rayon qui passe sans déviation par le centre optique.

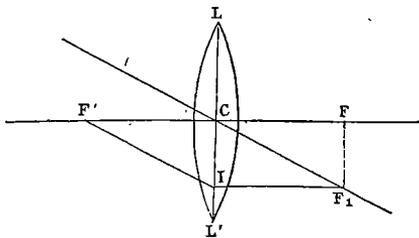


Fig. 511.

Prenons le plan de l'axe principal et de cet axe secondaire pour plan de la figure, et pour tracer un second rayon réfracté menons le rayon du faisceau qui passe par le foyer principal F' ; il est réfracté parallèlement à l'axe principal; le point F_1 où il coupe l'axe secondaire est le foyer cherché. Abaissons de F_1 une perpendiculaire sur l'axe principal : le pied F de cette perpendiculaire est le foyer principal. Nous voyons en effet que $FC = CF'$,

car $CF = IF_1$, et dans le parallélogramme $F'CF_1I$, on a $IF_1 = F'C$ (fig. 514).

Les foyers correspondants aux divers axes secondaires du plan de la figure sont donc sur la perpendiculaire à l'axe principal élevée en F . En faisant tourner le plan de la figure autour de l'axe principal, la perpendiculaire élevée en F décrit un plan sur lequel se trouvent les foyers de tous les axes secondaires qui passent en C . Ce plan s'appelle un *plan focal*.

Une lentille convergente a deux plans focaux réels situés de part et d'autre de la lentille et à égale distance.

La connaissance des propriétés des foyers et des plans focaux va nous permettre de construire le rayon réfracté correspondant à un rayon incident et de déterminer le foyer conjugué d'un point lumineux quelconque.

Foyer conjugué d'un point lumineux P situé sur l'axe principal. — Il

sera à l'intersection de l'axe principal et d'un rayon réfracté. Un rayon incident PI peut être considéré comme appartenant à un faisceau de rayons parallèles dont l'axe secondaire est CH , parallèle à PI (fig. 512). Le foyer des rayons réfractés de ce faisceau est en F_1 , intersection du plan focal et de l'axe secondaire

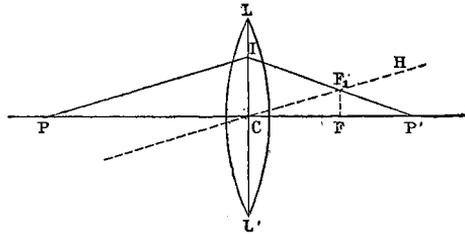


Fig. 512.

CH . Le rayon réfracté provenant de PI sera IF_1 ; ce rayon réfracté rencontre l'axe principal en P' qui est le foyer conjugué de P .

Foyer conjugué d'un point P situé sur un axe secondaire. — Il est à

l'intersection de cet axe secondaire PC et d'un rayon réfracté. Nous suivrons la marche qui vient d'être décrite pour tracer le rayon réfracté d'un rayon incident quelconque PI . Menons l'axe secondaire CH d'un faisceau de rayons parallèles à PI (fig. 513), et en F élevons une perpendiculaire à l'axe principal; joignons IF_1 ; c'est le rayon réfracté, son intersection P' avec PC est le conjugué du point P .

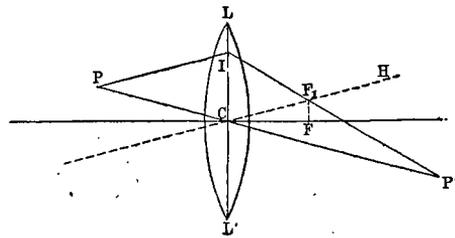


Fig. 513.

671. Construction de l'image d'un point au moyen du foyer principal. — Habituellement on construit un rayon réfracté par un tracé qui n'utilise que le foyer principal. On mène un rayon incident

PI parallèle à l'axe principal (fig. 514); le rayon réfracté passe par le

foyer F (premier foyer); l'intersection de IF et de l'axe secondaire PC est le foyer conjugué P'. On peut aussi mener par le point P un rayon qui passe par le foyer principal F' situé du même côté de la lentille (second foyer); il se réfracte parallèlement à l'axe principal et vient rencontrer PC en P'.

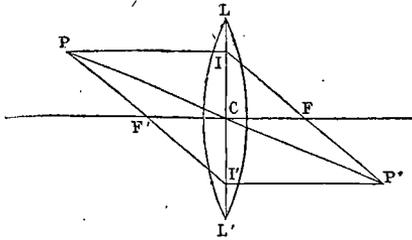


Fig. 514.

672. Image d'un objet. — Comme tout point d'un objet AB placé devant une lentille a un foyer conjugué, on obtiendra l'image A'B' de

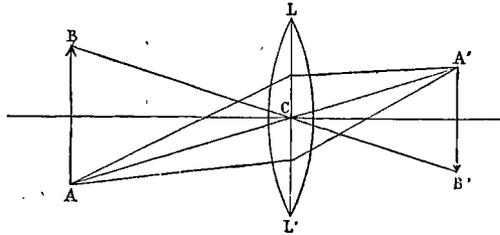


Fig. 515.

l'objet en construisant les foyers conjugués des différents points (fig. 515).

Image d'une droite perpendiculaire à l'axe principal. — Lorsque l'objet est une petite droite perpendiculaire à l'axe principal, il

suffit de déterminer le conjugué d'un seul point, car on démontre que l'image d'une droite est une droite également perpendiculaire à l'axe principal.

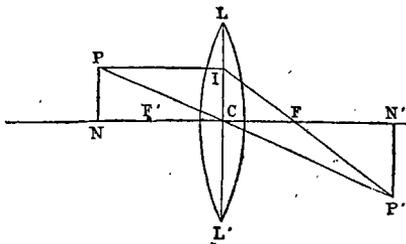


Fig. 516.

de la figure le plan de l'axe principal et d'un axe secondaire PC. Déter-

Démonstration. — Soit une droite PN perpendiculaire à l'axe. Prenons pour plan de

minons par la construction indiquée plus haut (671) le conjugué P' d'un point P , et abaissons de P' une perpendiculaire $P'N'$ sur l'axe principal (fig. 516).

$$\text{Posons } NC = p, \quad N'C = p', \quad FC = f.$$

Les triangles semblables PNC , $P'N'C$ nous donnent la proportion :

$$\frac{P'N'}{PN} = \frac{N'C}{NC} = \frac{p'}{p}$$

D'autre part, les triangles semblables ICF , $P'NF$ nous donnent, en remarquant que $IC = PN$:

$$\frac{P'N'}{PN} = \frac{N'F}{CF} = \frac{p' - f}{f}.$$

$$\text{de là } \frac{p'}{p} = \frac{p' - f}{f} \quad \text{ou } pf + p'f = pp'$$

et, en divisant les deux membres par $pp'f$,

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}.$$

D'après cette relation, si p est constant, p' l'est aussi. Or p est constant pour tout point d'une droite PN perpendiculaire à l'axe; l'image d'un point de cette droite doit donc se trouver sur la droite $P'N'$ dont la distance au centre optique est p' . Inversement, comme P et P' sont conjugués deux à deux, tout point de PN a son image sur $P'N'$. Les deux droites PN et $P'N'$ sont dites *droites conjuguées*.

Faisons tourner la figure autour de l'axe principal, les *droites conjuguées* PN et $P'N'$ décrivent des *plans conjugués*. Un plan perpendiculaire à l'axe principal qui s'éloigne indéfiniment de la lentille a pour plan conjugué limite un plan focal.

L'image d'un plan perpendiculaire à l'axe est donc un autre plan perpendiculaire à l'axe. Un objet plan perpendiculaire à l'axe étant donné, on obtiendra son image en déterminant le conjugué P' d'un point P du plan et en abaissant de P' un plan perpendiculaire à l'axe principal.

673. Image d'une droite perpendiculaire à l'axe. Position et grandeur des images. — Nous construirons le conjugué d'un point P de la droite PN par l'intersection de l'axe secondaire PC et

du rayon réfracté correspondant au rayon PI parallèle à l'axe principal (fig. 517). Le rayon réfracté IF rencontre PC en P'. De P' on abaisse une perpendiculaire P'N' sur l'axe principal.

$$\text{Posons } CN = p, \quad CN' = p', \quad CF = f$$

et faisons varier la position de PN.

1° **Droite réelle de l'infini jusqu'à F'** (fig. 517).

Triangles semblables PNC, P'N'C.

$$\frac{P'N'}{PN} = \frac{N'C}{NC} = \frac{p'}{p}$$

Triangles semblables ICF, P'N'F

$$\frac{P'N'}{PN} \quad \text{ou} \quad \frac{P'N'}{IC} = \frac{NF}{CF} = \frac{p' - f}{f}$$

Égalons les deux valeurs de $\frac{P'N'}{PN}$:

$$\frac{p'}{p} = \frac{p' - f}{f}$$

$$pf + p'f = pp' \quad \text{ou} \quad \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}$$

La construction géométrique fait voir que l'image est *réelle* et *renversée*.

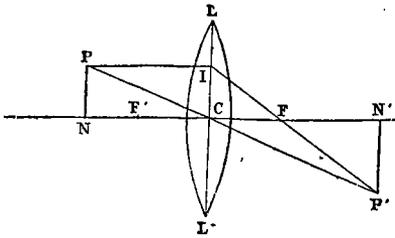


Fig. 517.

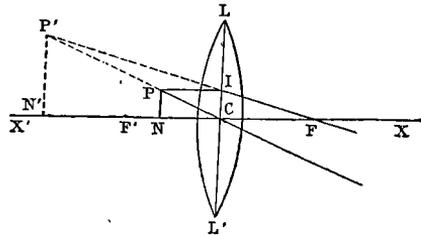


Fig. 518.

2° **Droite réelle située entre le foyer F' et la lentille** (fig. 518).

Triangles semblables PNC, P'N'C

$$\frac{P'N'}{PN} = \frac{p'}{p}$$

La construction montre que l'image est *réelle et droite, plus petite que l'objet*.

Le rapport de deux dimensions homologues de l'image et de l'objet est égal au rapport de leurs distances à la lentille :

$$\frac{I}{O} = \frac{CN'}{CN} = \frac{p'}{p}$$

Dans tous les cas, au centre optique, l'image et l'objet sont toujours vus sous un même angle.

On peut remarquer que, lorsque le pied de l'objet parcourt l'axe principal entier, le conjugué parcourt la même droite dans le même sens ; le point de départ est seul différent pour N et N'.

L'image est égale à l'objet en croissant, l'image et l'objet étant alors symétriquement placés à la distance $2f$; elle est encore égale à l'objet en décroissant dans le plan C. ⁽¹⁾

La forme de l'image focale est indépendante de la grandeur et de la forme de l'ouverture de la lentille ; toutefois l'intensité est proportionnelle à la surface de cette ouverture.

674. Formule générale. — Les trois relations en p, p' et f ⁽²⁾ se déduisent de la relation $\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}$, en remarquant qu'un terme en p ou p' est affecté du signe + lorsque la droite correspondante (objet ou image) est réelle, et du signe — lorsqu'elle est virtuelle. L'image est droite si p' et p ont des signes contraires dans la formule, renversée s'ils ont le même signe.

Pour une position donnée de l'objet, il suffira d'appliquer la construction générale : les positions de l'image et de l'objet permettront d'écrire immédiatement l'équation spéciale au cas considéré.

Les relations $\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}$ et $\frac{I}{O} = \frac{p'}{p}$ peuvent donner sans construction géométrique, la position, la nature et la grandeur de l'image.

On prend pour origine des distances le centre optique C de la len-

(1) $\frac{I}{O}$ se présente alors sous la forme $\frac{0}{0}$, mais I et O diffèrent d'autant moins que p est plus voisin de 0, 1 est la valeur limite du rapport.

(2) Les relations obtenues entre les distances à la lentille des points conjugués N et N' situés sur l'axe principal s'appliquent à des points conjugués P et P' situés sur un axe secondaire, car les triangles NPC, N'P'C, FF₁C de sommet C sont semblables, et les distances PC, P'C, F₁C sont proportionnelles aux distances NC, N'C, FC. Le point F₁ est le point de rencontre de l'axe PC et de la perpendiculaire à l'axe principal élevée en F.

tille; on désigne CN par p , et on *convient* de compter p positivement quand le point N est du côté de la lumière incidente; on désigne CN' par p' , et on *convient* de compter p' positivement quand N' est du côté de la lumière réfractée.

p étant donné, on résout l'équation par rapport à p' . Si cette résolution donne pour p' une valeur positive, cela indique que l'image est *réelle* et située du côté de la lumière réfractée. Si p' est négatif, l'image est *virtuelle* et située du côté de la lumière incidente.

p négatif correspond à un point de concours formé par des rayons convergents et situé du côté de la lumière réfractée.

Le rapport de grandeur de l'image à l'objet est donné par $\frac{p'}{p}$ en valeur absolue; l'image est renversée si $\frac{p'}{p}$ est positif, droite si $\frac{p'}{p}$ est négatif.

675. Discussion de la formule générale.

La relation $\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}$ conduit à $p' = \frac{fp}{p-f} = \frac{f}{1-\frac{p}{f}}$

P réel P' réel Image réelle et renversée	}	$p = +\infty$ $p' = f$	$\frac{I}{O} = \frac{f}{p}$ $I = \frac{O}{p} f^{(1)}$
		p diminue p' augmente	$I < 0$, augmente avec p'
		$p = 2f$ $p' = 2f$	$I = 0$
		$2f > p > f$ $p' > 2f$	$I > 0$
P réel P' virtuel Image virtuelle et droite	}	$p = f + \varepsilon$ $p' = +\infty$	Image infiniment grande
		$p = +f - \varepsilon$ $p' = -\infty$	
		$p < f$ $p' > 0$, diminue en valeur abs.	$I > 0$, diminue avec p'
		$p = 0$ $p' = 0$	$I = 0$
P virtuel P' réel Image réelle et droite	}	$p = 0$ $p' = 0$	$I = 0$
		$p < 0$ $p' > 0$, augmente	$I < 0$, augmente avec p'
		$p = -f$ $p' = +\frac{f}{2}$	$I = \frac{O}{2}$
		$p = -\infty$ $p' = f$	$I = \frac{O}{p} f$

(1) Pour le Soleil le diamètre apparent est 32'

$$\frac{O}{p} = 0,009$$

C'est l'angle sous lequel l'astre et son image sont vus du centre optique d'une lentille.

(Au lieu de faire une convention sur le signe de p et une autre sur le signe de p' , on peut par une convention unique compter p et p' positivement dans un même sens, par exemple *dans le sens de la lumière réfractée*; la relation entre les points conjugués s'écrit alors $-\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}$; elle est générale, et sa discussion est aussi simple que celle de l'équation adoptée plus haut.)

676. Distances comptées à partir des foyers. — Posons $F'N = \bar{\omega}$, $FN' = \bar{\omega}'$.

Triangles semblables ICF , $P'N'F$ $\frac{P'N'}{PN}$ ou $\frac{P'N'}{IC} = \frac{N'F}{CF} = \frac{\bar{\omega}'}{f}$. (fig. 520)

Triangles semblables $I'CF'$, PNF' $\frac{P'N'}{PN}$ ou $\frac{I'C}{NP} = \frac{CF'}{NF'} = \frac{f}{\bar{\omega}}$. (fig. 521)

$$\frac{I}{O} = \frac{\bar{\omega}'}{f} = \frac{f}{\bar{\omega}}$$

d'où $\bar{\omega}\bar{\omega}' = f^2$.

On reconnaîtra que cette relation s'applique à tous les cas : $\bar{\omega}$ se compte à partir du foyer F' situé du côté d'où vient la lumière, $\bar{\omega}'$ se compte à partir du foyer situé de l'autre côté de la lentille.

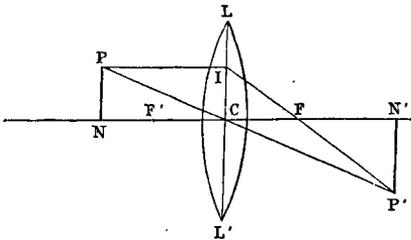


Fig. 520.

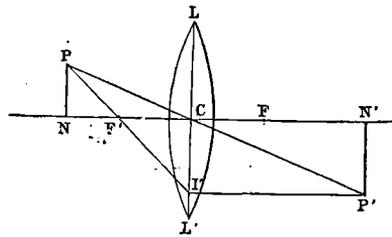


Fig. 521.

L'inspection des positions relatives de l'image et de l'objet fait voir que N et N' se trouvent en même temps sur les segments situés du côté opposé à la lentille ou en même temps sur les segments dirigés vers la lentille. Connaissant la position de l'objet, on trouve immédiatement d'après cela la position de l'image.

677. Vérifications expérimentales. — Pour suivre les variations de grandeur et de position de l'image d'un objet, on dispose perpendiculairement à l'axe principal une bougie et un écran, la bougie ayant le milieu de sa flamme sur l'axe principal de la lentille (fig. 522).

La bougie étant éloignée le plus possible, on aperçoit sur l'écran une image petite et renversée. On approche la bougie jusqu'au double de la distance focale : à la même distance de la lentille, on voit une

image renversée égale à l'objet. Si l'on conduit peu à peu la bougie jusqu'au foyer, il faut éloigner l'écran pour avoir une image nette qui est renversée et agrandie. En plaçant la bougie tout près mais un peu au delà du foyer principal, l'image est très éloignée et très amplifiée.

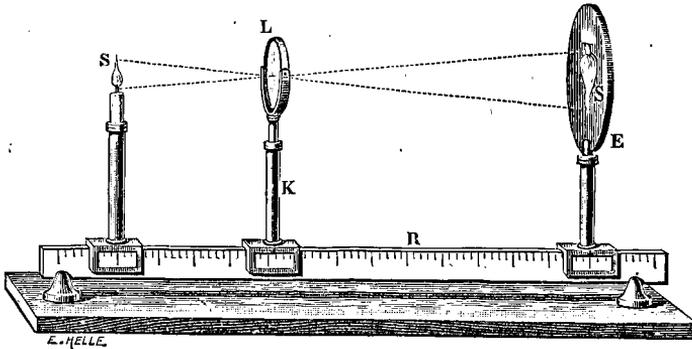


Fig. 522.

Poussons la bougie entre le foyer principal et la lentille : l'œil placé au delà de la lentille dans le cône des rayons divergents verra l'image agrandie de la bougie, mais cette image virtuelle ne peut être reçue sur un écran.

Remarquons qu'une image réelle peut aussi être vue par un œil placé dans le cône des rayons qui divergent après la formation de l'image ; toutefois, elle n'est plus vue par l'œil en dehors de ce cône. C'est afin de rendre une image réelle visible pour toute position de l'observateur qu'on la reçoit sur un écran où elle devient visible par diffusion dans toutes les directions.

Lorsque entre l'image réelle de la figure 522 et la lentille on place une seconde lentille convergente, les rayons tombent en convergeant sur cette seconde lentille : on réalise les conditions d'un objet virtuel. L'image définitive obtenue est réelle.

678. Détermination de la distance focale d'une lentille convergente. — Dans une chambre obscure on fait tomber sur une lentille convergente un faisceau de rayons solaires parallèles à l'axe principal, et on obtient sur un écran un cercle lumineux qui est l'image du Soleil.

La distance de cette image à la lentille est la distance focale cherchée.

On peut encore placer un objet lumineux perpendiculairement à l'axe principal à une distance p , assez grande pour qu'une image réelle

se forme de l'autre côté à une distance de la lentille égale à p' ; on mesure ces distances et on applique l'équation $\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}$.

On peut aussi s'appuyer sur ce fait qu'un objet placé à une distance $2f$ de la lentille donne de l'autre côté une image située à la même distance $2f$ égale à l'objet et renversée. Sur une règle divisée horizontale est disposé un support K portant la lentille L (fig. 523). D'un côté de

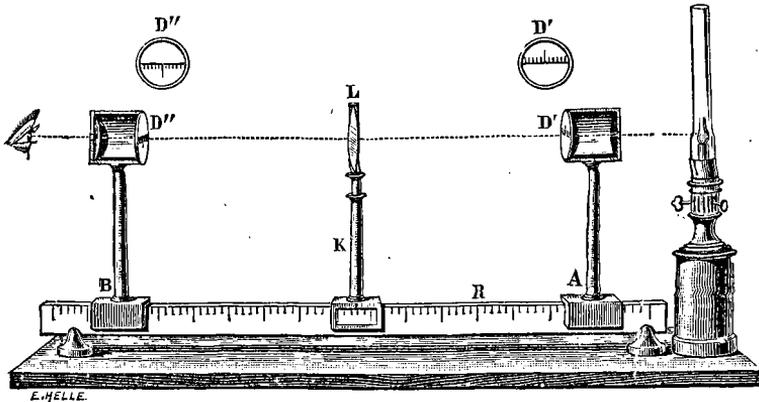


Fig. 523.

la lentille, à la hauteur de son axe principal, se déplace un demi-disque en verre dépoli D' , divisé en millimètres; ce disque, éclairé par une lampe, sert d'objet lumineux. De l'autre côté de la lentille, est un autre demi-disque D'' , identique, sur lequel la division est disposée en sens inverse. On déplace à la fois les supports A et B des deux demi-disques en les maintenant à égale distance de la lentille jusqu'à ce que l'image du demi-disque D' vienne se former au-dessous de D'' , les traits étant en prolongement sur D'' et sur l'image de D' ; la distance $D'D''$ est mesurée sur la règle horizontale R, elle est égale à $4f^{(1)}$.

(1) La distance focale principale s'exprime en fonction de l'indice de réfraction de la substance et des rayons de courbure des surfaces sphériques terminales.

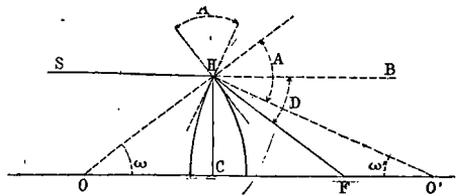


Fig. 524.

On trouve le point de concours des rayons parallèles à l'axe en traçant un rayon

LENTILLES DIVERGENTES

Nous savons déjà qu'une lentille divergente très mince dont les deux faces sont baignées par un même milieu possède deux *foyers principaux virtuels* situés de part et d'autre de la lentille, à égale distance.

679. Foyers conjugués. — Sur l'axe principal d'une lentille divergente plaçons un point lumineux P : les rayons issus de ce point sortent en divergeant, leurs prolongements se rencontrent en un point P', situé du même côté que le point lumineux (fig. 525) et appelé *foyer virtuel*.

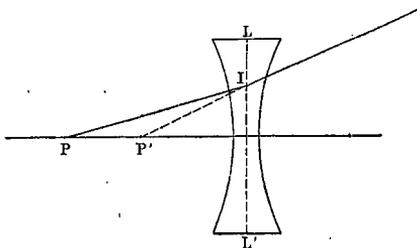


Fig. 525.

En vertu de la réversibilité des rayons dans la réfraction, P et P' sont des *foyers conjugués*.

Un point lumineux placé en dehors de l'axe principal, mais à une petite distance de cet axe, a encore un foyer conjugué.

680. Centre optique. — Le trajet intérieur II' d'un rayon lumineux qui traverse une lentille divergente sans changer de direction rencontre l'axe principal en un point C qui est fixe.

En effet, aux points I et I', les rayons OI et O'I' sont parallèles et les triangles OIC, O'I'C sont semblables (fig. 526).

$$\frac{CO}{CO'} = \frac{OI}{O'I'} = \frac{R}{R'}$$

réfracté et en cherchant son intersection avec l'axe principal. Prenons pour plan de la figure un plan qui passe par l'axe et considérons un rayon qui tombe au bord H (fig. 524).

Désignons par A l'angle du prisme formé par les deux plans tangents en H ; vu la petitesse de l'incidence et de l'angle A du prisme, la déviation BHF est exprimée par

$$D = (m - 1) A \quad (661).$$

Soit $HG = h$ et $CF = f$; en confondant l'angle et sa tangente $D = \frac{h}{f}$.

D'autre part A est l'angle extérieur en H du triangle OH''

$$A = \omega + \omega' = \frac{h}{R} + \frac{h}{R'}$$

$$\text{d'où } \frac{1}{f} = (m - 1) \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R'} \right).$$

Le point C étant le seul qui puisse diviser la droite OO' en deux segments proportionnels à deux longueurs données R et R', ce point

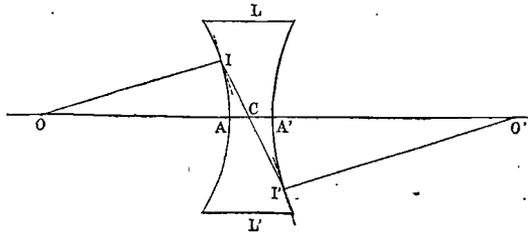


Fig. 526.

de rencontre avec l'axe sera le même pour tous les trajets II' correspondant à des rayons incidents et émergents parallèles.

Position du centre optique. — Posons $CA = x$, $AA' = e$; la relation $\frac{CO}{CO'} = \frac{R}{R'}$ (668) conduit à $x = \frac{eR}{R + R'}$. Pour une lentille biconcave où $R = R'$, $x = \frac{e}{2}$. Pour une lentille infiniment mince $x = 0$, le centre optique coïncide avec A et avec A'.

681. Axes secondaires. — Quand la lentille est très mince, le rayon sans déviation issu d'un point lumineux est la ligne qui joint le point lumineux et son conjugué : elle passe par le centre optique, on l'appelle *axe secondaire*. Dans ce qui va suivre, comme pour les lentilles convergentes, nous supposerons la lentille infiniment mince. Nous confondrons en un seul les plans tangents aux sommets qui sont très voisins ; le centre optique est le point C où ce plan perpendiculaire rencontre l'axe.

682. Plans focaux. — Des rayons parallèles peu inclinés sur l'axe principal donnent un faisceau réfracté divergent dont le sommet se trouve sur l'axe secondaire du faisceau.

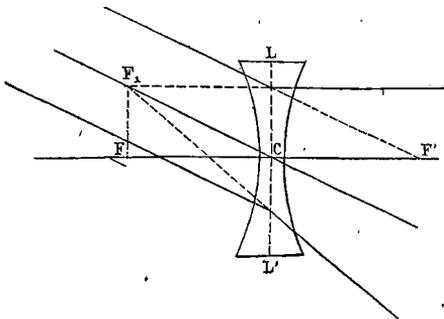


Fig. 527.

Le rayon du faisceau qui passe par le foyer principal F' sort réfracté parallèlement à l'axe principal (fig. 527); le point F₁ où le prolongement du rayon réfracté rencontre l'axe secondaire du faisceau est un foyer secondaire. Abaissons de F₁ une perpendiculaire sur l'axe principal : le pied de cette perpendiculaire est le foyer

principal. Le plan perpendiculaire à l'axe principal mené en F est un *plan focal*.

Une lentille divergente a deux plans focaux virtuels situés de part et d'autre de la lentille.

Foyer conjugué d'un point situé sur l'axe principal. — Il sera à l'intersection de l'axe principal et d'un rayon réfracté. Un rayon incident PI peut être considéré comme faisant partie d'un faisceau ayant pour axe secondaire CII (fig. 528). Le foyer des rayons réfractés de ce faisceau est en F_1 , intersection du plan focal et de l'axe secondaire CH. Le rayon réfracté provenant de PI sera IF_1 , ce rayon réfracté rencontre l'axe principal en P' qui est le foyer conjugué du point P.

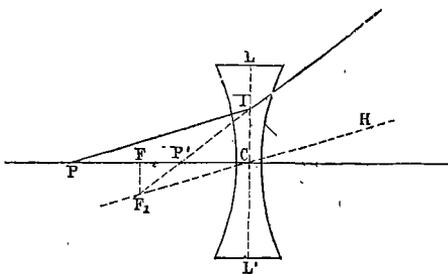


Fig. 528.

On pourrait opérer de la même façon pour trouver le foyer conjugué d'un point situé en dehors de l'axe principal.)

683. Foyer conjugué d'un point situé en dehors de l'axe principal. — Soit P ce point, menons l'axe secondaire PC. Si l'on trace un rayon incident PI parallèle à l'axe principal, le rayon réfracté passe par le foyer F, l'intersection de IF et de l'axe secondaire PC est le foyer conjugué P' (fig. 529).

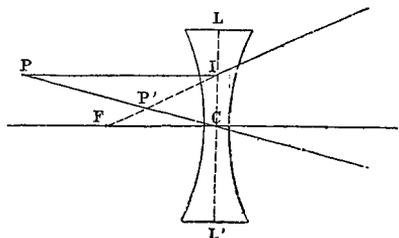


Fig. 529.

On démontre comme pour une lentille convergente que l'image d'une petite droite perpendiculaire à l'axe principal est une droite perpendiculaire à l'axe (672).

684. Droite perpendiculaire à l'axe principal. Position et grandeur des images. — Pour construire l'image d'une petite

droite lumineuse PN, perpendiculaire à l'axe principal, on déterminera le foyer conjugué P' d'un point P de la droite; et on abaissera du point P' une perpendiculaire sur l'axe. Le point P' s'obtiendra par l'intersection de deux rayons réfractés. L'un d'eux est l'axe secondaire du point P. On trace un deuxième rayon réfracté en menant par le point P un rayon parallèle à l'axe principal : IF est le rayon réfracté correspondant, son intersection avec l'axe secondaire PC donne le point P'(1).

Les notations seront les mêmes que dans les constructions relatives aux lentilles convergentes. Le foyer principal situé du côté de la lumière incidente sera représenté par la lettre F. Il joue en effet dans le tracé du rayon réfracté le même rôle que le foyer désigné par la même lettre dans la figure relative aux lentilles convergentes. Nous le nommerons aussi *premier foyer*.

1° **Droite réelle située en avant de la lentille.** — Posons $NC = p$, $N'C = p'$, $FC = f$ (fig. 530).

Triangles semblables PNC, P'N'C

$$\frac{P'N'}{PN} = \frac{p'}{p}$$

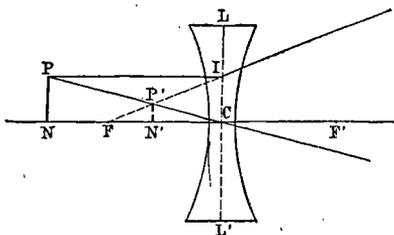


Fig. 530.

Triangles semblables ICF, P'N'F

$$\frac{P'N'}{IC} = \frac{N'F}{CF} = \frac{f - p'}{f}$$

Comme $IC = PN$

$$\frac{P'N'}{IC} = \frac{P'N'}{PN}$$

Égalons les deux valeurs de $\frac{P'N'}{PN}$

$$\frac{p'}{p} = \frac{f - p'}{f}$$

$$fp' - fp = -pp'$$

$$\text{ou } \frac{1}{p} - \frac{1}{p'} = -\frac{1}{f}$$

(1) Comme contrôle, nous pouvons mener le rayon qui passerait par F'; à la rencontre de la lentille en I', il se réfracte parallèlement à l'axe, son prolongement géométrique rencontre les deux autres rayons réfractés en P' (fig. 535).

La construction montre que l'image est virtuelle, droite et plus petite que l'objet.

L'image se forme entre le foyer et la lentille (fig. 531).

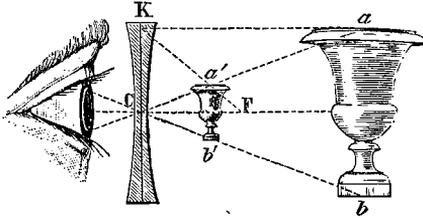


Fig. 531.

2° Droite virtuelle située au delà de la lentille, entre la lentille et le deuxième foyer principal.

Il s'agit ici de lumière convergente qui, si elle n'était arrêtée par la lentille divergente, irait former une image entre C et F'.

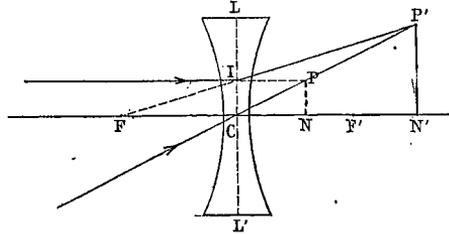


Fig. 532.

$NC = p$, $N'C = p'$ (fig. 532).

Parmi les rayons qui tombent sur la lentille, et viendraient se concentrer en P, nous considérons celui qui marche parallèlement à l'axe et celui qui suit l'axe secondaire.

Triangles semblables PNC, P'N'C,

$$\frac{P'N'}{PN} = \frac{p'}{p}.$$

Triangles semblables ICF, P'N'F,

$$\frac{P'N'}{IC} \text{ ou } \frac{P'N'}{PN} = \frac{N'F}{CF} = \frac{p' + f}{f}.$$

Égalons les deux valeurs de $\frac{P'N'}{PN}$:

$$\frac{p'}{p} = \frac{p' + f}{f}$$

$$fp' - fp = pp'$$

$$\frac{1}{p'} - \frac{1}{p} = -\frac{1}{f}. \quad p' = \frac{fp}{f - p}.$$

D'après la construction, l'image est *droite, réelle, plus grande que l'objet*.

3° *Droite virtuelle située au delà de la lentille et au delà du deuxième foyer.* — Il s'agit

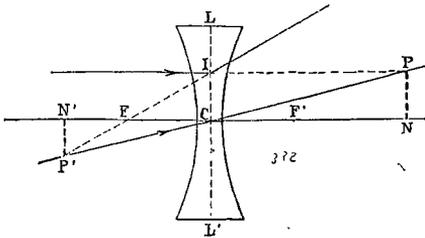


Fig. 533.

encore de lumière convergente, mais moins convergente que dans le cas précédent (fig. 533).

Triangles semblables PNC, P'N'C

$$\frac{P'N'}{PN} = \frac{p'}{p}$$

Triangles semblables ICF, P'N'F

$$\frac{P'N'}{IC} \text{ ou } \frac{P'N'}{PN} = \frac{N'F}{CF} = \frac{p' - f}{f}$$

$$\text{d'où } \frac{p'}{p} = \frac{p' - f}{f}$$

$$-pf - p'f = -pp'$$

$$-\frac{1}{p} - \frac{1}{p'} = -\frac{1}{f} \quad p' = \frac{fp}{p - f}$$

L'image est *renversée et virtuelle*; dans le trapèze PIFC, la base CF est plus petite que IF; les prolongements géométriques des deux rayons réfractés se rencontrent en avant de la lentille.

Du centre optique, l'image et l'objet sont toujours vus sous un même angle.

L'image est égale à l'objet en croissant, lorsqu'elle passe en même temps que lui par le centre optique C; elle est encore égale à l'objet en décroissant, l'image et l'objet se trouvant alors tous deux symétriquement placés à une distance $2f$ de la lentille.

L'image et l'objet parcourent en même temps la même droite dans le même sens, mais le point de départ est différent pour N et pour N'.

Le rapport de deux dimensions homologues de l'image et de l'objet est égal au rapport de leurs distances à la lentille.

685. Formule générale. — Les trois équations obtenues avec les lentilles divergentes $\frac{1}{p} - \frac{1}{p'} = -\frac{1}{f}$, $-\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = -\frac{1}{f}$ et

$-\frac{1}{p} - \frac{1}{p'} = -\frac{1}{f}$ peuvent se déduire de l'équation $\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = -\frac{1}{f}$ en affectant les termes en p et p' du signe + s'ils se rapportent à des images ou objets réels, et du signe - s'ils se rapportent à des images ou objets virtuels.

De même que l'équation $\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}$ convient aux lentilles convergentes, l'équation $\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = -\frac{1}{f}$ convient aux lentilles divergentes.

Avec les mêmes conventions que pour les lentilles convergentes, c'est-à-dire en comptant p positivement quand le point N est du côté de la lumière incidente, et p' positivement quand le point N' est du côté de la lumière réfractée, la discussion algébrique de l'équation $\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = -\frac{1}{f}$ donne le **position** de l'image, sa **nature** et sa **grandeur**.

686. Discussion de la formule générale.

	$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = -\frac{1}{f}$	$\frac{1}{p'} = -\frac{1}{f} - \frac{1}{p}$	$p' = -\frac{fp}{p+f}$	
P réel P' virtuel Image virtuelle et droite	{ $p = +\infty$ $p = +f$ $p = 0$	{ $p' = -f$ $p' = -\frac{f}{2}$ $p' = 0$	{ $I = \frac{0}{p}f$ $I = \frac{0}{2}$ $I = 0$	
P virtuel P' réel Image réelle et droite	{ $p < 0$ p varie de 0 à $-f$ $p = -f$	{ $p' > 0$ p' de 0 à $+\infty$ $p' = +\infty$	{ $I > 0$ I augmente I infiniment grande.	
P virtuel P' virtuel Image virtuelle et renversée	{ $p = -f$ p varie de $-f$ à $-2f$ $p = -2f$ p varie de $-2f$ à $-\infty$	{ $p' = -\infty$ $p' < 0$ varie de $-\infty$ à $-2f$ $p' = -2f$ p' varie de $-2f$ à $-f$	{ $I > 0$ $I = 0$ $I < 0$ tend vers 0,	

Pour faire une convention unique sur le signe de p et de p' , on peut les compter tous les deux positivement dans le sens de la lumière réfractée, la relation entre les points conjugués qui convient à tous les cas des lentilles divergentes s'écrit alors $-\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = -\frac{1}{f}$, elle est générale.

687. Distances comptées à partir des foyers.Posons $NF' = \omega$. $N'F = \omega'$ Triangles semblables $P'N'F$, ICF (fig. 534).

$$\frac{P'N'}{IC} = \frac{N'F}{CF} = \frac{\omega'}{f}$$

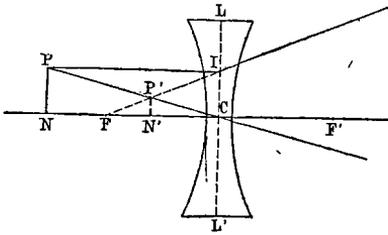


Fig. 534.

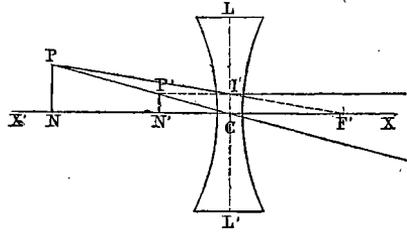


Fig. 535.

Triangles semblables PNF' , ICF' (fig. 535).

$$\frac{IC}{PN} = \frac{CF'}{NF'} = \frac{f}{\omega}$$

$$\frac{I}{O} = \frac{\omega'}{f} = \frac{f}{\omega}$$

d'où $\omega\omega' = f^2$.

La distance de l'objet est comptée à partir du foyer F' , la distance de l'image à partir du foyer F , les points N et N' se trouvent en même temps sur les segments $F'X$ et FX' opposés à la lentille, ou en même temps sur les segments FX et $F'X'$ dirigés vers la lentille.

688. Puissance d'une lentille. — On caractérise une lentille par l'inverse de sa distance focale $\frac{1}{f}$ qu'on appelle sa puissance. On appelle **dioptrie** l'unité de puissance : c'est la puissance d'une lentille dont la distance focale est de 1 mètre. La puissance d'une lentille convergente dont la distance focale est 25 centimètres sera $\frac{1}{0,25}$ ou 4 dioptries ; pour une lentille divergente de même distance focale la puissance sera -4 .

689. Lentilles juxtaposées. — La puissance d'un système de deux lentilles juxtaposées et dont les axes principaux coïncident est égale à la *somme algébrique* des puissances des lentilles qui le composent.

1° Supposons qu'on accole deux lentilles infiniment minces, toutes deux convergentes (fig. 536).

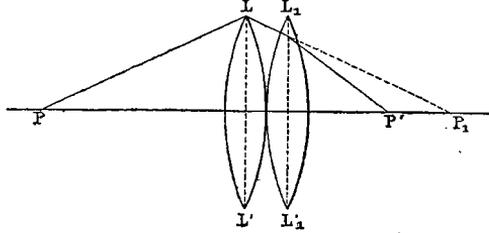


Fig. 536.

On a pour la première, dans le cas d'un objet lumineux placé au-delà de sa distance focale (673,1°) :

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p_1} = \frac{1}{f}$$

La seconde lentille reçoit de la lumière convergente (673,3°), d'où l'équation :

$$-\frac{1}{p_1} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f'}$$

En ajoutant, nous obtenons $\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f} + \frac{1}{f'}$.

Cette équation conviendrait à une lentille convergente de puissance $\frac{1}{F} = \frac{1}{f} + \frac{1}{f'}$.

2° Supposons qu'on accole une lentille convergente et une lentille divergente (fig. 537).

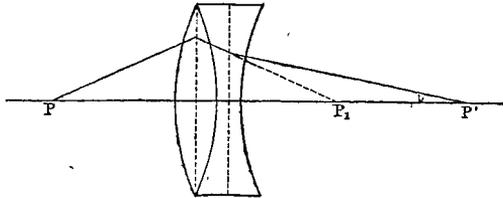


Fig. 537.

α) Pour un objet placé devant la lentille convergente et éloigné, l'équation de la lentille convergente est $\frac{1}{p} + \frac{1}{p_1} = \frac{1}{f}$,

Si le rayon réfracté par la lentille convergente rencontre l'axe principal entre la lentille divergente et son foyer, l'équation de la lentille

divergente sera $\frac{1}{p'} - \frac{1}{p_1} = -\frac{1}{f}$.

$$\text{Ajoutons } \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f} - \frac{1}{f'}$$

L'ensemble se comporte comme une lentille convergente unique

(719) de puissance $\frac{1}{f} - \frac{1}{f'}$ ⁽¹⁾.

690. Mesure de la distance focale d'une lentille divergente. — Dans le cas d'une lentille divergente d'assez grandes dimensions, on recouvre l'une des

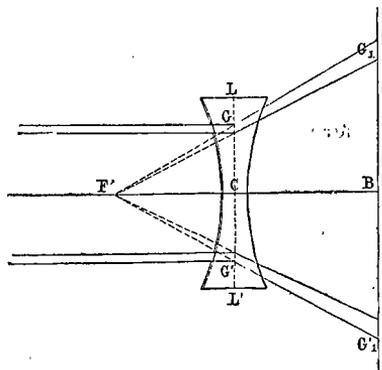


Fig. 538.

faces de la lentille de papier noir percé de deux petites ouvertures G et G' distantes de h, situées dans un même plan passant par l'axe principal et également éloignées de cet axe (fig. 538). On fait tomber sur l'écran un faisceau lumineux parallèle qui donne à la sortie deux rayons divergents; on les reçoit sur un écran que l'on déplace jusqu'à ce que l'intervalle des taches lumineuses G₁ et G'₁ soit

égal à 2h. Dans ce cas, la distance CB de la lentille à l'écran est égale à la distance focale CF'. En effet, les triangles semblables G'₁BF' et G'CF' donnent :

$$\frac{CF'}{BF'} = \frac{G'C}{G'_1B} = \frac{1}{2}$$

Puisque G'₁B = 2G'C, on a BF' = 2CF' et CB = CF'.

(1) Dans le cas où le point de rencontre P₁ se place au delà du foyer de la lentille divergente, le point P' est reporté en avant du système.

La première équation reste la même : $\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}$

La deuxième devient : $-\frac{1}{p_1} - \frac{1}{p'} = -\frac{1}{f}$

D'où, en ajoutant : $\frac{1}{p} - \frac{1}{p_1} = \frac{1}{f} - \frac{1}{f'}$

Il vaut mieux appliquer contre la lentille divergente de distance focale f' une lentille convergente de distance focale f choisie de façon à former un système convergent (689,2°), dont on mesure la distance focale F ; on aura $\frac{1}{F} = \frac{1}{f} - \frac{1}{f'}$.

Si l'on dispose d'un nombre suffisant de lentilles, on peut chercher à associer à la lentille divergente une lentille convergente de distance focale f telle que le système formé ait une puissance nulle, alors $\frac{1}{f} = \frac{1}{f'}$. L'ensemble des deux lentilles pourra être déplacé devant un objet sans que l'image de cet objet vue à travers le système se déplace.

691. Aberration de sphéricité. — Quand les angles d'incidence ne sont pas tous très petits, les rayons issus d'un point lumineux ne concourent plus en un point unique après la réfraction et les images n'ont pas de netteté.

Cela se présente quand l'ouverture de la lentille n'est pas très petite, les rayons *marginiaux* sont plus déviés par la réfraction que les rayons *centraux* et font leur image en un point F'_1 , plus rapproché de la lentille que le foyer F' des rayons centraux (fig. 539). Pour le vérifier, on recouvre une lentille convergente d'un écran noir percé de trous inégalement éloignés de l'axe; en découvrant alternativement les ouvertures voisines du centre et les ouvertures voisines du bord, on reconnaît que les rayons qui passent par des trous voisins de l'axe font leurs images plus loin de la lentille que ceux qui passent par des trous plus éloignés.

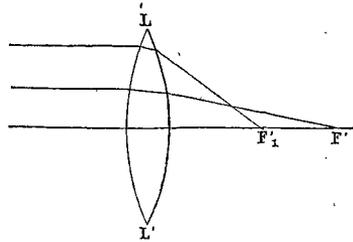


Fig. 539.

Cette imperfection des lentilles sphériques croît avec leur courbure, elle s'accroît par conséquent quand la distance focale diminue : on l'appelle *aberration de sphéricité*. On appelle *aberration longitudinale* la distance des deux foyers F' et F'_1 correspondant aux rayons centraux et marginaux d'un faisceau incident parallèle à l'axe.

On atténue les effets de l'aberration de sphéricité en couvrant la lentille d'un écran percé d'une ouverture qui ne laisse passer que les rayons centraux; le diamètre conservé ne doit pas dépasser la moitié de la distance focale.

Un autre moyen consiste à accoler une deuxième lentille à la première pour former un système *aplanétique*.

692. Lentille des phares. — Dans la lentille à échelons de Fresnel, employée pour l'éclairage des phares, les effets de l'aberration sont corrigés de manière à utiliser une grande surface réfringente malgré une courte distance focale.

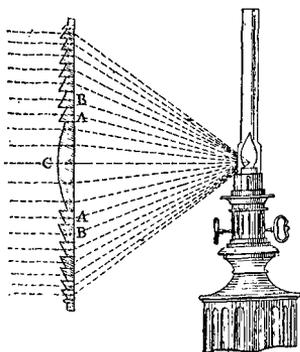


Fig. 540.

Une lentille convergente centrale C est entourée d'anneaux concentriques en verre A, B... dont la courbure est choisie pour que les rayons parallèles à l'axe viennent concourir au foyer principal de la lentille centrale C (fig. 540). Inversement, une source lumineuse placée au foyer envoie des rayons réfractés

parallèlement à l'axe principal de la lentille centrale.

Applications. — 1° Un objet d'une hauteur de 5 centimètres est placé perpendiculairement à l'axe principal, à 12 centimètres en avant d'une lentille convergente de 8 centimètres de distance focale; quelle est la position et la grandeur de l'image?

2° Une bougie est à une distance D d'un écran sur lequel on projette son image avec une lentille convergente. On reconnaît que les deux positions de la lentille pour lesquelles on obtient une image distincte de la bougie sont distantes de a . Quelle est la distance focale de la lentille?

3° Un objet est placé à 15 centimètres d'une lentille divergente de 10 centimètres de longueur focale; quelle est la position de l'image et quel est le rapport de grandeur de l'image à l'objet?

4° La distance focale d'une lentille divergente est 25 centimètres. Où doit être placé un petit objet perpendiculaire à son axe principal pour que son image soit réduite à $\frac{1}{6}$ de la grandeur de l'objet?

5° Une lentille convexe d'une distance focale de 16 centimètres est appliquée contre une lentille divergente. La distance focale du système est 48 centimètres. Quelle est la distance focale de la lentille divergente?

6° Une petite droite perpendiculaire à l'axe placée à trois centimètres d'une lentille convergente donne une image virtuelle grossie trois fois; quelle est la distance focale de la lentille?

7° Pour obtenir l'indice de réfraction d'une lentille biconvexe, on mesure sa distance focale $F = 44$ centimètres, et les rayons de courbure de ses faces : $r = 33$ centimètres, $r' = 66$ centimètres. Quel est l'indice?

8° Un objet est placé devant une lentille convergente de façon à donner une image réelle; à quelle distance de la lentille doit-il être placé pour que la distance de l'image à l'objet soit minimum?

9° Un objet est placé à 30 centimètres d'un écran sur lequel on veut projeter son image avec une lentille convergente; la distance focale de cette lentille est égale à 50 centimètres. À quelle distance de l'écran doit être placée la lentille, et quel est le rapport de la grandeur de l'image à celle de l'objet?

10° Un point lumineux P se trouve sur l'axe principal d'une lentille convergente de 50 centimètres de distance focale à 25 centimètres de la lentille. Après avoir traversé la lentille, les rayons se réfléchissent sur un miroir plan perpendiculaire à l'axe de la lentille et distant de la lentille de 25 centimètres. Après cette réflexion, les rayons traversent de nouveau la lentille convergente. Où se forme l'image définitive?

11° Un point lumineux réel P est placé sur l'axe principal d'une lentille convergente

dont le diamètre est $2r$ et la distance focale f . Un écran est placé au foyer principal du côté opposé à la lentille. Quel est le rayon du cercle éclairé par les rayons émanés du point P et qui ont traversé la lentille? On supposera P au delà, puis en deçà du foyer.

12° Démontrer que dans une lentille biconvexe à rayons égaux, d'indice $\frac{3}{2}$, les foyers coïncident avec les centres de courbure.

DISPERSION

DÉCOMPOSITION DE LA LUMIÈRE BLANCHE

L'étude du phénomène de la réfraction à travers un prisme (661) se rapportait à un faisceau de couleur simple (702); les phénomènes sont plus complexes avec la lumière blanche. Outre la déviation, la lumière éprouve alors une autre modification : la *dispersion*.

693. Dispersion de la lumière. — Si par un trou circulaire étroit O (4 à 5 millimètres de diamètre), pratiqué dans le volet d'une chambre noire, on fait passer un faisceau cylindrique de lumière solaire, ce faisceau donne sur un écran une image ronde et blanche

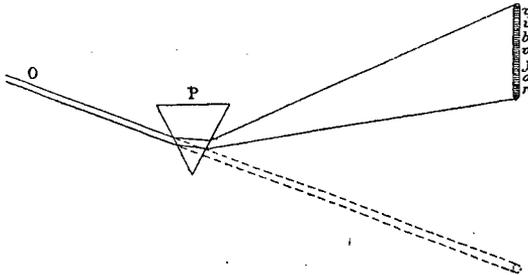


Fig. 541.

O'. Sur le trajet des rayons interposons un prisme de verre P, à arête horizontale, et recevant le faisceau dans sa section principale : nous voyons sur l'écran (fig. 541) une image *déviée vers la base du prisme, allongée verticalement* c'est-à-dire *perpendiculairement à l'arête réfringente*, et présentant des couleurs *r, o, j, v, b, i, v, r*, qui se fondent insensiblement les unes dans les autres. Dans cette image colorée

désignée sous le nom de **spectre solaire**, on distingue sept couleurs principales qui se succèdent dans l'ordre suivant, en commençant par la plus déviée : *violet, indigo, bleu, vert, jaune, orangé, rouge*.

Le faisceau émergent n'est donc plus formé de rayons parallèles entre eux comme le faisceau incident. Les rayons sont inégalement déviés : les rayons violets sont les plus déviés, les rayons rouges sont ceux qui le sont le moins. Cette dilatation d'un faisceau lumineux par un prisme se nomme *dispersion*.

Spectre virtuel. — Si, au lieu de recevoir sur un écran le faisceau réfracté, on regarde à travers un prisme une ouverture éclairée O, en

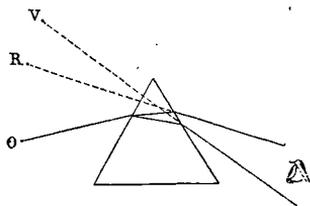


Fig. 542.

plaçant l'œil sur le trajet des rayons dispersés, on voit une image virtuelle de chacune des couleurs du spectre. Lorsque l'arête du prisme est horizontale, on voit un spectre *virtuel* RV allongé dans le sens vertical, dans lequel le violet est la couleur la plus déviée (fig. 542).

Pour expliquer ces apparences, Newton admit que la sensation de la lumière blanche est due à la *superposition de rayons diversement colorés et inégalement réfractés* par un même milieu transparent.

694. Nombre des couleurs du spectre. — Si la lumière solaire était composée de sept couleurs seulement, on obtiendrait sept taches lumineuses circulaires, ayant chacune pour diamètre le diamètre de l'ouverture par laquelle pénètre la lumière. Ces cercles se recouvriraient en partie et l'ensemble offrirait l'apparence d'une image allongée, sinueuse sur les bords latéraux. Notre œil ne perçoit que sept couleurs distinctes, mais chacune de ces régions colorées renferme elle-même une infinité de rayons inégalement réfrangibles se succédant sans discontinuité, et l'image du spectre est constituée par une infinité de cercles limités latéralement par les deux lignes droites parallèles que forment les tangentes communes à ces cercles. A ses deux extrémités l'image est terminée par deux demi-cercles qui sont les bords des images circulaires extrêmes.

695. Les couleurs du spectre sont simples et inégalement réfrangibles. — En faisant tomber un faisceau SI de rayons solaires parallèles sur un prisme P à arête horizontale, on obtient un

spectre qui s'étale verticalement sur un écran E ; une petite portion du spectre reçue sur une ouverture étroite percée en O va former sur un deuxième écran une image colorée.

En arrêtant les rayons qui passent en O par un deuxième prisme P' à arête horizontale, une nouvelle déviation a lieu. Si nous faisons tourner le prisme P autour de son arête, de manière à recevoir

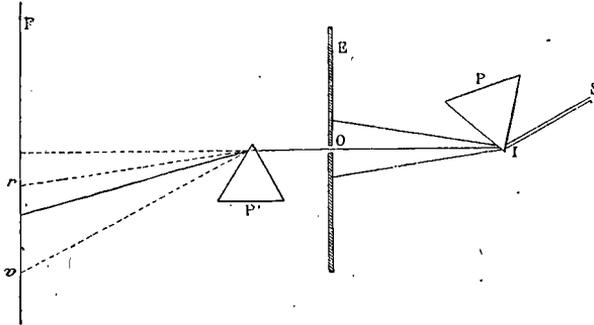


Fig. 543.

successivement sur l'ouverture O les diverses couleurs du spectre, ces couleurs arrivent sur le prisme P' sous la même incidence (fig. 543). L'image reçue par le deuxième écran en r ou en v après la traversée du prisme P' conserve la couleur de la partie du spectre qui tombe sur l'ouverture O. On dit d'après cela que chaque couleur du spectre est **simple**, c'est-à-dire n'est plus décomposable en couleurs différentes.

La déviation produite par le prisme P' vers sa base va en croissant (de r en v) lorsque la couleur qui tombe en O passe du rouge au violet, ce qui démontre l'*inégaie déviation par un même milieu transparent* des rayons de différentes couleurs. L'indice de réfraction croît comme la déviation, du rouge au violet.

696. Expérience des prismes croisés. — L'expérience des prismes croisés confirme l'inégale déviation des rayons de diverses couleurs.

Derrière un premier prisme P à arête verticale donnant un spectre horizontal, on dispose un second prisme P' de même substance et de même angle à arête horizontale ; ce deuxième prisme, traversé par le faisceau dispersé qui émerge du premier prisme, tend à dévier verticalement les couleurs du premier spectre. Le spectre est rejeté obliquement (fig. 544).

Il était aisé de le prévoir : en effet, soit O la trace du faisceau direct et rv le spectre réfracté par le prisme à arête verticale. Les angles des deux prismes étant égaux, la déviation verticale rr' du rouge par le deuxième prisme est égale à la déviation horizontale Or due au premier; de même la déviation verticale vv' du violet est égale à Ov ; le nouveau spectre doit donc être incliné à 45° (fig. 545).

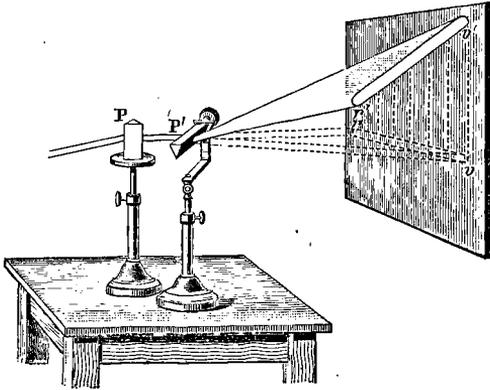


Fig. 544.

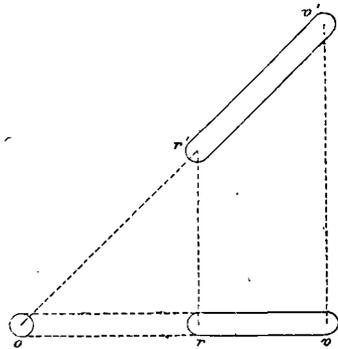


Fig. 545.

697. Décomposition de la lumière par une lentille convergente. — Une lentille convergente LL' de petite ouverture ne concentre après réfraction en un point unique les rayons lumineux issus d'un point, que lorsque ces rayons sont de même couleur.

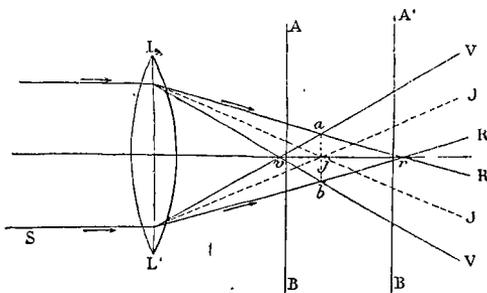


Fig. 546.

La lentille se comportant comme une série de prismes ayant leurs bases du côté de



Fig. 547.



Fig. 548.

l'axe (666), les rayons sont déviés vers l'axe, mais comme la déviation est plus forte pour le violet que pour le rouge, le foyer des rayons violets est plus rapproché de la lentille que le foyer des rayons

rouges ⁽¹⁾. La figure 546, où la lentille L reçoit un faisceau parallèle à l'axe, permet de suivre le *croisement des faisceaux réfractés de diverses couleurs*.

En coupant les faisceaux par un écran AB avant leur partie commune la plus étroite *ab*, on obtient un cercle violet au centre et rouge à l'extérieur (fig. 547); un écran A'B' placé au delà de la partie *ab* donne un cercle rouge au centre, mais violet à l'extérieur (fig. 548). Même dans la partie étroite *ab*, l'image est irisée; en effet, aucun des points de la section autre que le point *j* ne reçoit de lumière jaune, la surface sur laquelle il sera reçu de la lumière orangée est limitée à l'intersection par l'écran d'un cône ayant son sommet entre *j* et *r*; la *partie centrale* de la section *ab* sera donc seule blanche, et la section perdra une partie de ses couleurs en allant du centre au bord.

698. Influence de la nature et de l'angle du prisme sur la dispersion. — En répétant l'expérience de la décomposition de la lumière blanche avec des prismes de différentes substances transparentes : différents verres, sel gemme, quartz, ou avec des prismes de verre creux renfermant des liquides variés : eau, alcool, éther, sulfure de carbone.., les spectres obtenus sur l'écran sont toujours formés des mêmes couleurs se suivant dans le même ordre. Mais à l'aide d'un *polyprisme* à arête horizontale (fig. 549) sur lequel on reçoit un faisceau émergeant d'une fente linéaire horizontale, on reconnaît que pour diverses substances et un même angle réfringent, ces spectres n'offrent pas la même déviation et la même dilatation.

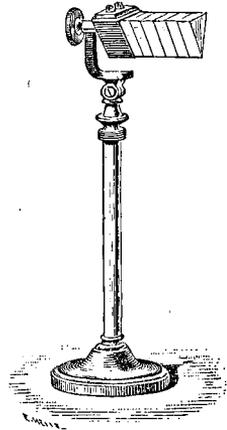


Fig. 549.

Pour des prismes de même substance, la longueur du spectre ou

(1) La distance focale d'une lentille est exprimée par la relation

$$\frac{1}{f} = (m - 1) \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R'} \right), \quad (678).$$

l'indice de réfraction variant avec la couleur, la position du foyer varie aussi avec la couleur, l'indice décroît du violet au rouge, $m_v > m_r$ on a donc :

$$\frac{1}{f_v} > \frac{1}{f_r} \quad \text{ou} \quad f_v < f_r.$$

la dispersion croît avec l'angle du prisme. On constate, en effet, en opérant avec un prisme à angle variable plein d'eau, que le spectre s'allonge quand on augmente l'angle du prisme. Il résulte de là qu'avec deux substances de dispersion différente, on pourra toujours, en diminuant l'angle pour la substance de dispersion plus forte, obtenir deux prismes donnant des spectres de même longueur. Si l'on forme ainsi deux spectres de même étendue totale avec des prismes de substances différentes, on voit que le plus souvent une même couleur n'y occupe pas des longueurs égales (724).

RECOMPOSITION DE LA LUMIÈRE BLANCHE

On reproduit de la lumière blanche soit en ramenant au parallélisme et en superposant les rayons dispersés qui forment le spectre solaire, soit en les faisant converger en un même point. De la superposition des impressions dues à toutes ces couleurs résulte, par une propriété physiologique de notre organe visuel, la sensation unique de la lumière blanche.

699. Recomposition par un prisme. — Un faisceau solaire dispersé par un premier prisme P est reçu sur un deuxième prisme P' , de même substance et de même angle réfringent, mais disposé en sens inverse (fig. 550). Le faisceau qui sort du deuxième

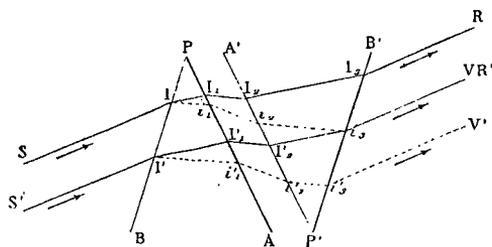


Fig. 550.

prisme est blanc et donne sur un écran une image blanche, sauf aux bords supérieur et inférieur qui sont irisés.

Soit un rayon incident SI et $II_1I_2I_3R$ le rayon rouge qui en provient. Les faces PA et $P'A'$ étant parallèles, les angles en I_1 et I_2 sont égaux et les trajets II_1 et I_2I_3 sont parallèles; à cause du parallélisme des

faces PB et P'B' et des trajets I_1I_1 et I_2I_3 , les rayons extérieurs SI et I_3R sont parallèles. Si nous considérons le rayon violet $i_1 i_2 i_3 V$ provenant de SI, le rayon émergent i_3V sera également parallèle à SI; les rayons émergents de diverses couleurs sont donc parallèles entre eux.

Menons vers le premier prisme, à partir de i_3 , une parallèle $i_3I'_2$ à I_3I_2 , puis en I'_2 une parallèle à I_2I_1 , en I'_1 une parallèle à I_1I : le trajet suivi par un rayon rouge provenant d'un rayon incident $S'I'$ sera $I'_1I'_2i_3$, et ce rayon rouge i_3R' sortira superposé au rayon violet i_3V . Nous trouverions de même superposés au rayon i_3V des rayons orangé, jaune, vert, bleu, provenant de rayons compris dans le faisceau incident entre SI et $S'I'$, ce qui donnera du blanc suivant I_3V . Les rayons extrêmes seuls restent isolés, le bord supérieur du faisceau réfracté est rouge orangé et le bord inférieur bleu violet.

Les apparences sont les mêmes si le faisceau traverse une lame à faces parallèles.

700. Recomposition par une lentille convergente ou par un miroir concave.

— Si l'on fait tomber sur une lentille convergente L (fig. 551) ou sur un miroir concave M (fig. 552) les rayons colorés dispersés par un prisme P, ces rayons sont rendus convergents, et un écran placé à une certaine distance de la lentille ou du miroir présente une surface blanche dans une région F où les diverses couleurs sont concentrées.

(Pour nous rendre un compte exact du phénomène, faisons tomber sur un prisme P un faisceau blanc de rayons parallèles de direction SI (fig. 553).

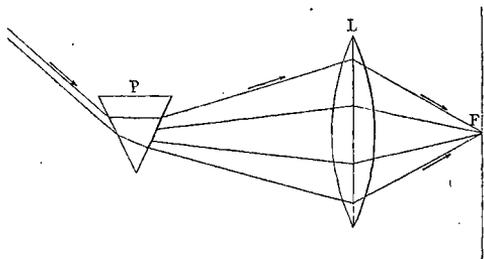


Fig. 551.

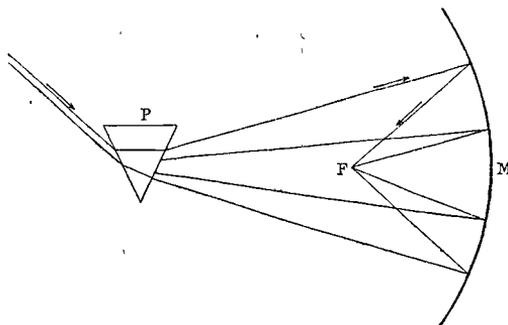


Fig. 552.

Recevons le faisceau coloré qui sort du prisme sur une lentille convergente L placée à une distance du prisme supérieure à sa distance focale principale; les rayons réfractés par le prisme et reçus par la lentille sont dans les mêmes conditions que s'ils émanaient d'un spectre virtuel $V'R'$, les rayons rouges qui tombent sur la lentille convergent dans le plan focal principal en un point f d'un axe secondaire Cf parallèle à la direction des rayons rouges, les rayons violets vont se réunir en un point f' du plan focal sur un axe secondaire Cf' parallèle à la direction des rayons violets.

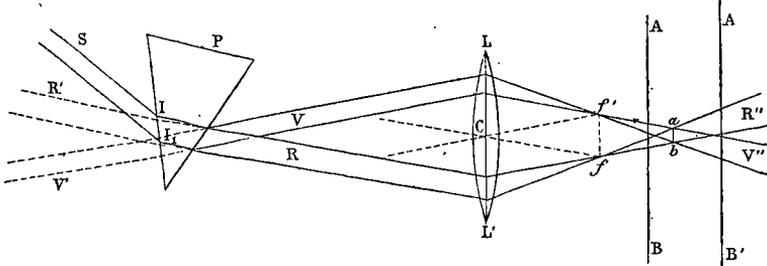


Fig. 553.

Le cône des rayons rouges se prolonge au delà du point f , le cône des rayons violets se prolonge au delà du point f' , les deux cônes ainsi prolongés se rencontrent en ab . Leur partie commune appartient aussi aux faisceaux des couleurs intermédiaires. La superposition des couleurs donne lieu à une tache blanche sur un écran placé en ab ; ab est le plan conjugué de la face d'entrée II_1 du prisme où toutes les couleurs se rencontrent. D'après la marche des rayons, sur un écran placé en AB en avant de ab , dans un plan conjugué d'un plan $R'V'$ situé au-delà de II_1 , on verra un spectre ayant le violet en haut et le rouge en bas; sur un écran placé en $A'B'$, au-delà de ab , dans un plan conjugué d'un plan VR compris entre le prisme et la lentille, on verra un spectre ayant le rouge en haut et le violet en bas.

La lentille convergente est souvent remplacée par un miroir concave qui peut offrir plus de surface et recevoir un large spectre. Un miroir concave présente de plus sur une lentille cet avantage que la distance focale ne dépend pas de la couleur, d'où il résulte qu'un plan conjugué est le même pour toutes les couleurs à la fois et que la superposition peut être plus parfaite (1).

701. Recomposition par la superposition des effets physiologiques. — Des secteurs de verres colorés avec sept couleurs aussi semblables que possible aux sept couleurs du spectre sont distribués sur un disque D dans l'ordre des couleurs du spectre, l'étendue relative des sept secteurs étant en outre à peu près celle

(1) Nous avons supposé que le faisceau dispersé par le prisme était reçu sur une lentille *achromatique* n'ayant qu'un plan focal pour toutes les couleurs.

des couleurs correspondantes (fig. 554). En donnant au disque ainsi préparé et traversé par un faisceau de lumière blanche un mouvement de rotation rapide autour d'un axe passant par son centre, le disque paraît blanc dans toute son étendue.

Cette apparence s'explique par la **persistance des impressions lumineuses** sur la rétine (735), phénomène que nous allons d'abord décrire.

Soit un écran circulaire noir sur lequel un secteur a été couvert de papier rouge (fig. 555) ; quand on fait tourner lentement l'écran, on voit le secteur rouge occuper successivement diverses positions. Si la rotation du disque devient assez rapide pour qu'un tour dure moins d' $\frac{1}{10}$ de seconde,

la sensation produite sur l'œil par une position du secteur subsiste encore lorsque le secteur y est revenu après un tour ; les sensations des positions successives persistent également, et nous voyons le secteur à la fois dans toutes ses positions, ce qui fait que toute la surface de l'écran paraît uniformément rouge.

Dans l'expérience du disque divisé en sept secteurs colorés, chacun des secteurs produit en même temps sur l'œil la sensation d'un disque entier de la couleur du secteur ; de la coexistence des impressions de toutes ces couleurs résulte la sensation de la lumière blanche.

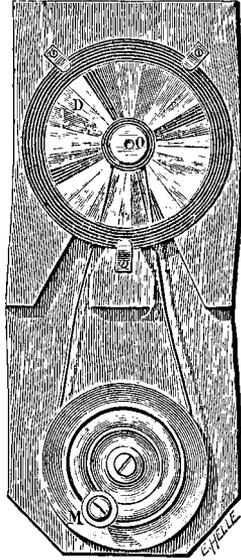


Fig. 554.

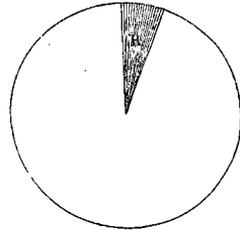


Fig. 555.

CLASSIFICATION DES COULEURS

702. Couleurs simples. — Les couleurs du spectre, c'est-à-dire les couleurs qui proviennent de la décomposition par le prisme de la lumière solaire ou d'une source lumineuse quelconque ont été appelées *couleurs simples* parce qu'un nouveau passage à travers un prisme ne produit plus de changement de couleur (695).

703. Couleurs composées. — Une couleur que le prisme décompose en plusieurs couleurs simples est dite *composée*. Notre œil ne distingue pas directement une couleur simple d'une couleur composée. La distinction se fait par le prisme.

Les corps de la nature ont rarement des couleurs simples, c'est-à-dire des couleurs que le prisme ne décompose pas.

704. Couleurs complémentaires. — La réunion de toutes les couleurs du spectre solaire dans les proportions où elles y entrent produit du blanc, mais on peut aussi obtenir du blanc en associant dans un rapport convenable deux couleurs seulement du spectre, bien choisies. Deux couleurs *simples* du spectre capables de donner ainsi du blanc par leur réunion sont dites *complémentaires*. Le rouge et le vert sont complémentaires, de même le violet et le jaune, le bleu et l'orangé.

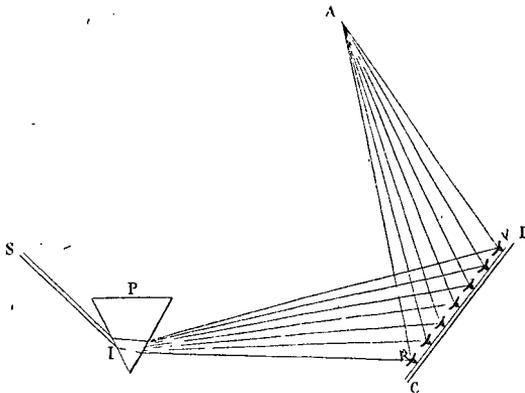


Fig. 556.

On appelle aussi complémentaires deux couleurs *composées* dont le mélange donne du blanc. Si, dans l'expérience de la recombinaison de la lumière par une lentille ou un miroir concave, on supprime avec une espèce de peigne plusieurs des couleurs

du spectre, les couleurs conservées donnent par la réunion une certaine teinte colorée qui est composée. Les couleurs supprimées donnent une autre teinte également composée. Ces deux teintes composées, mélangées, formeraient du blanc puisqu'elles contiennent toutes les couleurs du spectre.

La production des couleurs complémentaires peut encore être réalisée avec sept miroirs concaves montés sur une même règle-CD (fig. 556). On produit un spectre d'une longueur telle qu'il tombe sur chacun des miroirs une portion du spectre correspondant à chacune des sept couleurs; si l'on incline ces miroirs de façon à rassembler les sept faisceaux en un point unique A, on obtient de la lumière

blanche. En dirigeant sur un point les rayons d'une partie des miroirs, et sur un autre point les rayons des autres miroirs, on obtient en ces deux points des teintes complémentaires⁽¹⁾.

705. Couleurs des corps. — Coloration par transparence. —

La couleur d'un corps transparent résulte de l'absorption qu'il exerce sur la lumière qui le traverse. Il est *incolore* s'il laisse passer également toutes les couleurs. Il est *coloré* s'il laisse passer certains rayons et en absorbe d'autres. Il est noir et ne laisse rien passer si les rayons qui tombent sur lui appartiennent à des couleurs qu'il absorbe. Ainsi, un verre bleu ou vert paraît noir s'il est regardé à travers un verre rouge.

Coloration par diffusion. — Les corps ne sont visibles que par la lumière qu'ils diffusent.

Exposé à la lumière blanche du jour, un corps paraît *blanc* s'il diffuse également tous les rayons : il n'est plus visible, et on le dit *noir*, s'il absorbe tous les rayons également et complètement ; s'il renvoie par diffusion certains rayons simples et en absorbe d'autres, il paraît *coloré* de la nuance qui résulte du mélange des rayons diffusés.

Exposé à une lumière colorée, un corps ne paraît coloré que par les couleurs qu'il diffuse. Une étoffe rouge, recevant un spectre, paraît fort éclairée dans le rouge et tout à fait noire dans le vert et le bleu, car elle absorbe ces couleurs et ne les diffuse pas.

En somme, une lumière simple n'est pas modifiée dans sa couleur par le corps sur lequel elle tombe : son intensité seule varie.

SPECTRES DES SOURCES LUMINEUSES

706. Production d'un spectre pur. — Pour obtenir un beau spectre, on emploie un prisme bien taillé et bien homogène ; on le place très près de l'ouverture qui laisse pénétrer les rayons solaires dans la chambre noire et on éloigne l'écran à plusieurs mètres. L'effet est plus brillant si la petite ouverture circulaire par laquelle le faisceau lumineux est admis est remplacée par une fente rectangu-

(1) La sensation due à une couleur ne suffit pas pour en fixer la composition. Divers mélanges éveillent la même sensation.

laire étroite S parallèle à l'arête réfringente du prisme. Mais, dans tous les cas, le faisceau incident est *divergent*, il en est de même des divers faisceaux colorés réfractés et les taches lumineuses données sur l'écran par les divers rayons colorés que disperse le prisme empiètent les unes sur les autres ; pour cette raison, les couleurs ne sont ainsi que très imparfaitement séparées.

On obtient un spectre *pur*, c'est-à-dire où les couleurs sont le mieux séparées, par la disposition suivante (fig. 557) :

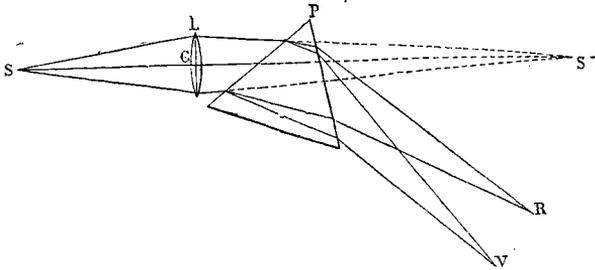


Fig. 557.

Les rayons, admis dans la chambre noire par une fente rectangulaire *très étroite* S , tombent sur une *lentille convergente* L placée à une distance de la fente supérieure à sa distance focale principale.

Sur un écran qui occupe le plan conjugué de la fente par rapport à la lentille, on obtient une image réelle S' . Un peu au delà de la lentille, on dispose un prisme P , ayant son arête réfringente parallèle à la fente et orienté *dans la position du minimum de déviation* pour les rayons jaunes. Au sortir du prisme, chacune des couleurs du spectre donne une image conjuguée de la fente. Ces images forment un spectre RV étalé perpendiculairement à la fente, et elles empiètent d'autant moins les unes sur les autres que la fente est plus fine. Si la lentille est distante de la fente de $2f$, la distance de la lentille à l'écran est également $2f$, et les diverses images colorées de la fente ont des dimensions égales à celles de la fente (675).

Au lieu de recevoir le spectre sur un écran, on peut examiner avec une loupe l'image réelle du spectre.

Le prisme peut aussi être placé en avant de la lentille. La figure 558 représente dans ce cas la marche des rayons.

Les rayons d'une couleur quelconque divergent d'un point du spectre virtuel vr de la fente. Ces rayons divergents sont rendus convergents par la

lentille qui donne de r une image réelle rouge en R, de v une image réelle

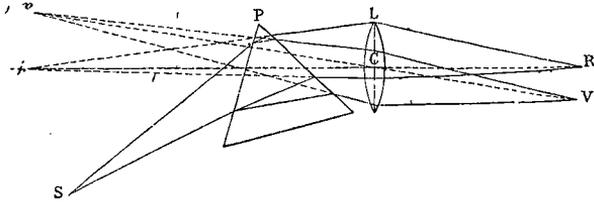


Fig. 558.

violette en V. Les images V et R s'obtiennent en joignant v et r au centre optique C de la lentille.

707. Raies du spectre solaire. — Quand on produit un spectre solaire très pur, on reconnaît que ce spectre *n'est pas absolument continu*. Il présente des intervalles obscurs très étroits et très nombreux, parallèles à l'arête réfringente du prisme et irrégulièrement distribués. Ces raies noires sont connues sous le nom de *raies de Fraunhofer* qui en a distingué 10 groupes principaux : A, B, C, D, E, F, G, H et a , b ; A et a , B et C dans le rouge, D entre l'orangé et le jaune, E entre le jaune et le vert, b et F dans le vert, G entre le bleu et l'indigo, H à l'extrême violet. On compte actuellement plusieurs milliers de raies noires très fines dans le spectre solaire.

Pour une même substance réfringente, chacune des raies occupe toujours la même position dans le spectre et correspond par conséquent toujours au même indice de réfraction.

708. Propriétés lumineuses, calorifiques et chimiques du spectre solaire. — L'intensité lumineuse des diverses parties du spectre est variable; c'est vers le milieu du jaune, dans la région comprise entre les raies D et E que se trouve le maximum d'éclat.

Les effets lumineux du spectre solaire sont accompagnés d'effets *calorifiques*. En promenant le long du spectre un petit thermomètre très sensible ou une pile thermo-électrique étroite, on observe une élévation de température dans tout le spectre visible, allant en croissant du violet au rouge. L'effet calorifique se prolonge en deçà du rouge, ce qui démontre l'existence de *rayons invisibles* moins réfrangibles que le rouge, ayant une action calorifique (476). Dans cette partie **infra rouge** du spectre on a constaté aussi l'existence de nombreuses raies.

Les rayons solaires exercent des actions *chimiques*. On connaît de

nombreuses substances sensibles à l'action de la lumière. On peut citer certains sels métalliques et spécialement le *chlorure d'argent* qui, sous l'influence des rayons solaires, change sa couleur blanche contre une couleur ardoisée due à la production d'argent très divisé résultant de la décomposition du chlorure. Si l'on expose aux rayons d'un spectre une feuille de papier couverte d'une mince couche de chlorure d'argent, on la voit noircir depuis le jaune jusqu'au violet ; les rayons rouges et infra rouges n'exercent pas d'action sensible. La décomposition se poursuit au delà du violet dans une *partie invisible* du spectre appelée **ultra violette**. Les raies noires du spectre visible et du spectre ultra violet sont inactives : elles se dessinent en blanc sur le fond noir altéré par les rayons actifs.

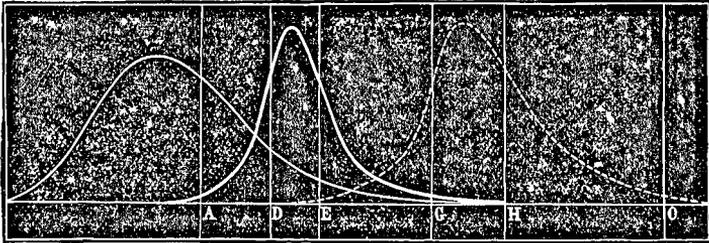


Fig. 559.

La figure 559 représente la répartition dans un spectre *prismatique* des effets calorifiques, lumineux et chimiques dus au rayonnement solaire (724). La courbe de droite correspond au *spectre chimique*, la courbe de gauche au *spectre calorifique*, la courbe intermédiaire comprise entre les raies A et H au *spectre lumineux*. Les ordonnées des courbes sont proportionnelles aux effets (les courbes varient avec la nature du prisme).

Bien que les radiations les moins réfrangibles soient plus aptes à produire des effets calorifiques, et les radiations les plus réfrangibles à exercer des actions chimiques, il n'y a pas lieu de considérer trois espèces de radiations : calorifiques, lumineuses, chimiques. En effet, les rayons de réfrangibilité moyenne (entre E et H) produisent **à la fois les trois effets** et ces trois effets sont inséparables ; toute diminution de l'un de ces effets pour une radiation déterminée est accompagnée d'une diminution proportionnelle des deux autres (486).

709. Spectroscope. — L'observation des spectres des différentes sources lumineuses se fait au moyen du spectroscop.

cope comprend un *collimateur*, un *prisme*, une *lunette astronomique* et un *micromètre* (fig. 560).

Le *collimateur* L consiste en un tube portant à une extrémité une fente verticale qu'on éclaire avec la source dont on veut étudier le spectre. Cette fente est placée au *foyer principal* d'une lentille convergente montée à l'autre extrémité du tube. Les rayons de la source G qui ont traversé le collimateur sortent de la lentille parallèlement à son axe principal ⁽¹⁾ et tombent sur un *prisme* dont les arêtes sont parallèles aux bords de la fente du collimateur. Le prisme est disposé au centre d'un *cercle horizontal* et orienté au minimum de déviation pour la partie moyenne du spectre.

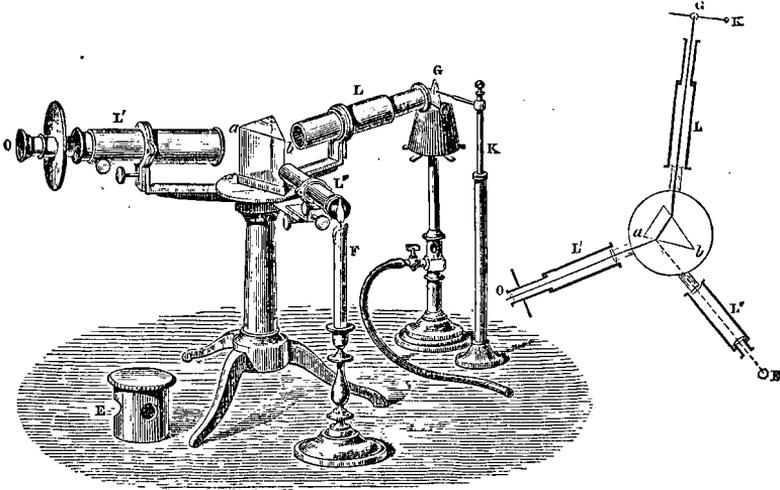


Fig. 560.

Fig. 561.

Les rayons réfractés par le prisme tombent sur l'objectif d'une *lunette astronomique* L' dont l'axe, comme celui du collimateur, est dirigé suivant un des rayons du cercle horizontal.

Un spectre réel de la fente éclairée par la source se forme dans le plan focal principal de l'objectif de la lunette astronomique ; on l'observe avec l'oculaire o de la lunette, qui en fournit une image virtuelle (673).

(1) Ce n'est que lorsque l'angle des rayons extrêmes qui tombent sur un prisme est très petit que les rayons réfractés divergent *approximativement* d'un point r (fig. 558). L'image réelle, obtenue en R, est donc d'autant plus parfaite que les rayons incidents sont plus voisins d'être parallèles. On remplit cette condition en éloignant la fente du prisme ou mieux en faisant usage d'un *collimateur*.

Les différentes régions du spectre sont repérées par rapport aux divisions d'un micromètre. Ce *micromètre* est une lame de verre sur laquelle sont tracés des traits fins parallèles à la fente; cette lame, placée à l'extrémité d'un tube L" au foyer principal d'une lentille, est éclairée par une bougie F.

Le faisceau de rayons parallèles qui sort de ce deuxième collimateur se réfléchit sur la face *ab* du prisme qui regarde la lunette et tombe sur l'objectif de cette lunette dans la même direction que les rayons réfractés par le prisme (fig. 561).

L'observateur voit à la fois dans le plan focal de la lunette, *l'un au dessus de l'autre*, le micromètre divisé et le spectre du faisceau dispersé.

Dans certains cas, pour établir des comparaisons très précises, il

est commode d'observer simultanément les spectres de deux lumières. Les rayons de l'une des lumières G pénètrent directement par la moitié inférieure de la fente du collimateur, l'autre lumière H éclaire latéralement un petit prisme à réflexion totale *i*, appliqué sur la moitié supérieure de la fente (fig. 562). Les deux spectres sont vus l'un au-dessus de l'autre dans le plan focal de la

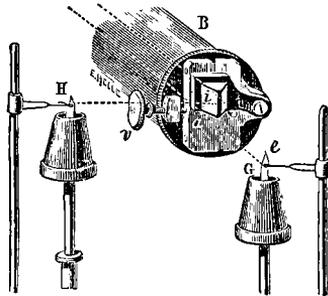


Fig. 562.

lunette, les régions de même réfrangibilité étant superposées.

710. Différents types de spectres. — On distingue trois types de spectres :

1° **Spectres continus sans raies.** — Ce sont les spectres des solides et des liquides incandescents. Au rouge naissant, vers 500° , leur spectre ne contient que des radiations rouges et infra rouges, de grande longueur d'onde; des rayons plus réfrangibles s'ajoutent à mesure que la température s'élève; le violet apparaît à la température blanche⁽¹⁾. Les flammes des becs de gaz, de l'huile, d'une bougie

(1) L'énergie totale rayonnée par une source lumineuse comprend une énergie à la fois lumineuse et calorifique et une énergie calorifique obscure. Celle-ci ne sert qu'à échauffer l'air ambiant. Mais aux températures élevées, l'énergie lumineuse n'est qu'une petite fraction de l'énergie totale, car les radiations obscures infra rouges augmentent d'intensité à mesure que le spectre s'étend vers le violet. Le *rendement lumineux*, c'est-à-dire le rapport entre l'énergie lumineuse et l'énergie totale augmente quand la température s'élève, mais il reste faible. Il n'est que 0,04 pour une lampe à gaz, 0,1 pour une lampe électrique à incandescence, 0,2 pour une lampe électrique à arc. D'après cela, il est évident que les procédés d'éclairage sont susceptibles de grands perfectionnements au point de vue économique.

donnent des spectres continus : c'est le spectre du *charbon incandescent* en suspension dans la flamme. Les charbons de l'arc voltaïque, les lampes électriques à incandescence sont aussi des sources à spectres continus. La lumière rayonnée par ces sources comprend donc une infinité de radiations simples qui se succèdent sans interruption. Dans ces spectres, la partie infra rouge et la partie ultra violette sont continues comme la partie lumineuse, si grande que soit la dilatation du spectre. La flamme d'un bec de gaz dans lequel on fait arriver un excès d'air ne donne plus de spectre lumineux, lorsque la combustion du charbon en suspension dans la flamme est complète (*bec Bunsen*).

2° **Spectres continus sillonnés de raies noires.** — Le spectre solaire est caractérisé par des raies noires très fines et très nombreuses. La lumière de la Lune et des planètes n'est que de la lumière solaire réfléchie : elle donne le même spectre avec les mêmes raies. Les étoiles proprement dites présentent des spectres continus, sillonnés de raies obscures, *différentes* des raies du spectre solaire.

3° **Spectres discontinus.** — Les flammes qui ne contiennent pas de particules solides, donnent un spectre discontinu, formé de raies lumineuses isolées, séparées par de larges intervalles obscurs⁽¹⁾. Tels sont les spectres de *gaz raréfiés* portés à l'incandescence par le passage d'étincelles électriques. Pour observer ces spectres, on enferme un gaz sous une pression de quelques millimètres dans un tube capillaire terminé par deux renflements où passent des fils de platine soudés (fig. 563). La partie capillaire s'observe au spectroscopie : elle s'illumine vivement quand on fait jaillir dans le tube par les fils *a* et *b* les décharges d'une bobine d'induction ; avec l'hydrogène, on a 4 raies seulement.

Comme les gaz, les *vapeurs métalliques* incandescentes donnent des spectres discontinus.

711. Raies métalliques. — En éclairant la fente d'un spectroscopie avec la flamme très chaude et à peine visible d'un bec Bunsen, on n'obtient pas de spectre. Si l'on introduit

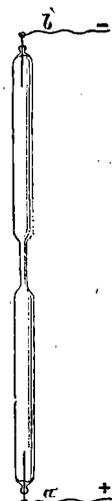


Fig. 563.

(1) Les parties infra rouge et ultra violette de ces spectres sont discontinues comme la partie lumineuse.

à la base de la flamme un fil de platine trempé dans la dissolution d'un sel métallique volatil (fig. 561), le sel se décompose en partie et donne des vapeurs ⁽¹⁾. Le spectre de ces vapeurs est discontinu et formé de bandes brillantes et colorées qui restent identiques pour les divers sels d'un même métal et *caractérisent l'élément métallique*. On détermine la position de ces raies par rapport aux divisions du micromètre.

Dans la partie lumineuse du spectre les sels de *soude* ne présentent qu'une double raie dans le jaune-orangé, les sels de *thallium* une raie verte, les sels de *lithium* une raie rouge et une raie jaune distincte de la double raie du sodium, les sels de *strontium* plusieurs raies, etc.

712. Analyse spectrale. — Un mélange de sels de plusieurs métaux différents fournit un spectre qui contient toutes les raies de ces métaux observés séparément. La présence dans la flamme d'une très petite quantité d'un sel métallique particulier suffit pour faire apparaître dans le spectre les raies dont la position caractérise cet élément métallique. De là une méthode d'analyse extrêmement sensible, appelée *analyse spectrale*. L'apparition de raies jusque-là inconnues a fait découvrir un certain nombre de métaux nouveaux : *rubidium, cæsium, thallium, indium, gallium, hélium*, etc.

SPECTRES D'ABSORPTION

713. Absorption dans le spectre lumineux. — *Mode d'observation.* — On observe l'action d'un corps transparent sur les diverses radiations en interposant une certaine épaisseur de la substance à étudier entre un spectroscopie et une source à spectre continu telle que la flamme d'un bec de gaz ou le charbon positif de l'arc voltaïque : l'examen du spectre transmis fait connaître avec précision les couleurs absorbées d'après la position et l'étendue des bandes noires.

Spectre d'absorption d'une substance incolore. — Les substances transparentes *incolores* laissent passer en égale proportion toutes les couleurs du spectre.

(1) On choisit parmi les sels d'un même métal les plus facilement décomposables : par exemple les chlorures.

Spectre d'absorption d'une substance colorée. — Une substance transparente *colorée* transmet le plus souvent des radiations appartenant à diverses parties du spectre ; la coloration est celle du mélange des couleurs qui passent. Comme l'absorption n'a augmenté pas d'ordinaire, à mesure que l'épaisseur du milieu augmente, dans la même proportion dans les diverses régions où elle s'exerce, il en résulte que la teinte de la lumière composée transmise *peut varier notablement avec l'épaisseur*. Cela se présente même avec les substances incolores, c'est ainsi que l'eau, incolore sous de petites épaisseurs, se montre bleue ou verte sous des épaisseurs suffisantes.

Quelquefois le spectre d'absorption est *silloné de bandes noires très nombreuses* : tels sont les spectres de l'acide hypoazotique, de la vapeur d'iode, de la vapeur d'eau ; les bandes augmentent en nombre et en largeur avec l'épaisseur de la substance traversée.

Certaines bandes d'absorption ont une apparence caractéristique qui les fait utiliser pour l'analyse : citons les deux bandes noires qu'une solution étendue de *sang* présente dans le jaune (entre les raies D et E du spectre solaire).

Corps monochromatiques. — Un corps transparent est dit *monochromatique* s'il ne laisse passer qu'une région peu étendue du spectre. Les corps transparents monochromatiques sont rares : un *verre rouge* coloré par l'*oxyde de cuivre* ne présente au spectroscope qu'une bande rouge, une solution de *bichromate de potasse* ne laisse passer que de l'orangé, des solutions de sels de *nickel* ne laissent passer que du vert.

714. Absorption dans les spectres infra rouge et ultra violet. — On explore le spectre calorifique avec une pile thermo-électrique, et le spectre ultra violet en le recevant sur un papier photographique. Certaines substances incolores exercent une forte absorption sur les rayons invisibles : le *verre*, l'*eau*, l'*alun* arrêtent en grande partie les radiations infra rouges (481) et laissent passer beaucoup plus facilement les radiations ultra violettes. Le *sel gemme* laisse passer à peu près toutes les radiations : infra rouges, lumineuses et ultra violettes ; son emploi est précieux pour l'étude du rayonnement calorifique. Le *quartz* se laisse facilement traverser par les rayons ultra violets.

715. Absorption par les vapeurs métalliques. — Placée sur le trajet d'une source lumineuse, une vapeur métallique absorbe spé-

cialement les rayons qu'elle a la propriété d'émettre (485). Cette relation entre l'absorption et l'émission se démontre par l'expérience suivante.

Si l'on reçoit directement sur la fente d'un spectroscopie la flamme d'un bec Bunsen contenant un sel de soude, le spectre lumineux ne présente que la double raie jaune caractéristique du sodium.

Éclairons par un prisme latéral à réflexion totale la fente du spectroscopie avec la lumière Drummond (chaux rendue incandescente par la combustion du gaz d'éclairage dans l'oxygène), nous observons au-dessous du spectre du sodium un spectre continu. Entre la chaux incandescente et le prisme à réflexion totale interposons une flamme d'alcool contenant un sel de soude : nous voyons apparaître dans le

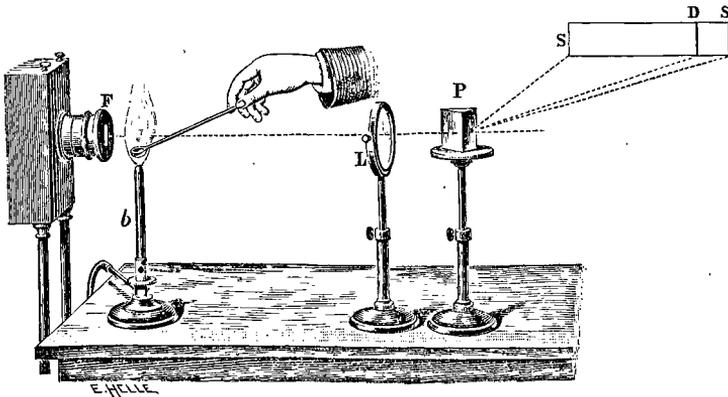


Fig. 564.

spectre une double raie noire *exactement en prolongement* des deux raies brillantes du sodium. Parmi toutes les radiations émises par la chaux incandescente, la vapeur de sodium a donc arrêté précisément les radiations qu'elle émet elle-même.

On réalise dans un cours cette expérience du *renversement* de la raie du sodium en formant sur un écran, comme le montre la figure 564, le spectre d'une fente F éclairée par la lumière Drummond. Dans la flamme d'un bec Bunsen *b* on brûle un fragment de sodium : la raie D apparaît en noir dans le spectre S primitivement continu.

716. Origine des raies du spectre solaire. — Le globe solaire serait une masse incandescente présentant un spectre continu, entourée d'une atmosphère dont la température est *moins élevée* que celle du noyau. Cette atmosphère renferme des vapeurs qui absorbent

les radiations qu'elles ont la propriété d'émettre. Si l'on reçoit à la fois (709) dans un spectroscopie (à l'aide du prisme latéral à réflexion totale) le spectre d'une flamme chargée de sodium et le spectre solaire, on reconnaît que la double raie sombre D du spectre solaire est le *prolongement rigoureux* de la double raie brillante du sodium. On se trouve ainsi conduit à admettre la présence de la vapeur du sodium dans l'atmosphère solaire. La présence de l'*hydrogène*, de l'*hélium*, du *sodium*, du *baryum*, du *fer*, du *magnésium*, du *zinc*, du *nickel*, etc., à l'état gazeux dans l'atmosphère solaire résulte de la concordance entre les raies brillantes de ces métaux en vapeur et certaines raies noires du spectre solaire. L'absence de concordance fait penser que le *lithium*, le *strontium*, l'*aluminium*, l'*argent*, etc., n'entrent pas dans la composition de l'atmosphère solaire.

La lune et les planètes réfléchissent la lumière solaire et donnent le même spectre que le Soleil. Les étoiles donnent des spectres différents. Le spectre des nébuleuses non résolubles est formé de raies brillantes; ces nébuleuses doivent donc être formées de gaz incandescents.

717. Raies telluriques. — Après avoir éprouvé des absorptions en traversant les vapeurs de son atmosphère, la lumière solaire en éprouve encore par son passage à travers l'atmosphère terrestre. On voit en effet certaines raies du spectre solaire augmenter de largeur et d'intensité quand le Soleil est voisin de l'horizon et que ses rayons traversent une couche d'air plus épaisse. Les raies noires du spectre solaire qui résultent d'absorptions par l'atmosphère terrestre sont dites *raies telluriques*; il y en a qui sont dues à l'absorption par l'oxygène de l'air; un grand nombre sont dues à l'absorption par la vapeur d'eau de notre atmosphère, on les reconnaît à leur coïncidence avec les raies d'absorption que produit une couche épaisse de vapeur d'eau dans le spectre continu d'une source artificielle.

718. Phosphorescence. — Certains corps, après avoir été éclairés, ont la propriété de continuer à émettre des radiations *lorsque la lumière a cessé d'agir sur eux*. Ces corps sont dits *phosphorescents*. Les rayons *les plus réfrangibles*, violets et ultra violets, sont habituellement ceux qui produisent la phosphorescence. La plupart des substances, sauf les métaux, se montrent phosphorescentes. La durée de l'émission lumineuse après l'éclairement dépend de la nature du corps; elle n'est quelquefois qu'une très petite fraction de seconde, elle

atteint plusieurs heures pour certains *sulfures de baryum, calcium, strontium*.

Fluorescence. — La fluorescence diffère de la phosphorescence en ce que les substances fluorescentes n'émettent de lumière que pendant leur éclaircissement. Les rayons actifs sont spécialement les rayons *très réfringibles* et la lumière émise est moins réfringible que la lumière active. Parmi les corps fluorescents on peut citer le *spath fluor* qui a donné son nom au phénomène, le verre coloré en jaune par l'*uranium*, la solution de *sulfate de quinine*, etc.

La phosphorescence et la fluorescence résultent d'une absorption de radiations suivie d'une émission par les molécules du corps de radiations moins réfringibles que les radiations qui ont agi.

LENTILLES ACHROMATIQUES

719. Nous avons vu qu'une lentille convergente concentre, après réfraction, en des foyers conjugués *distincts* (697), les rayons de diverses couleurs issus d'un même point lumineux, le foyer violet étant plus rapproché de la lentille que le foyer rouge.

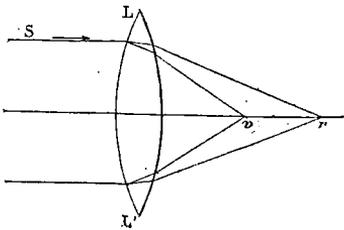


Fig. 565.

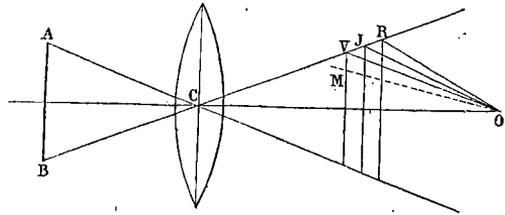


Fig. 566.

L'effet est le même avec une lentille divergente : le foyer virtuel violet correspondant à un point lumineux de lumière blanche est plus voisin de la lentille que le foyer rouge.

Une lentille, quelle qu'elle soit, disperse donc les foyers conjugués de diverses couleurs d'un point sur une petite longueur *vr*, dont les foyers rouge et violet sont les points extrêmes (fig. 565).

La séparation des images de différentes couleurs conduit à des *images aux contours irisés*. Considérons en effet un objet AB, les images de différentes couleurs d'un point B se font sur le même axe

secondaire BC, car la position du centre optique est indépendante de la couleur, mais ces images sont espacées de V en R; il se fait autant d'images différentes de l'objet qu'il y a de couleurs, et ces images se trouvent dans des plans conjugués différents, le plan conjugué violet étant plus rapproché de la lentille que le plan conjugué rouge. D'un point O on voit donc les images V, J, R dans des directions différentes (fig. 566), l'image paraît blanche au centre et irisée sur les bords; la netteté est en outre diminuée par ce fait que les images observées dans une même direction OM ne sont pas les images colorées d'un même point puisqu'elles ne correspondent pas à un même axe secondaire.

On corrige à peu près complètement cette dispersion des images produite par la réfraction ou cette **aberration de réfrangibilité** en assemblant deux lentilles de substances différentes, de courbures convenablement choisies. On appelle *achromatique* un système réfringent donnant des images sans irisations.

Une lentille achromatique convergente est formée de deux lentilles: l'une C, convergente en *crown glass* (silicate de potasse et de chaux analogue au verre ordinaire), l'autre F, divergente, plus faible, en

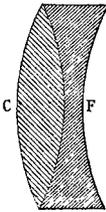


Fig. 567.

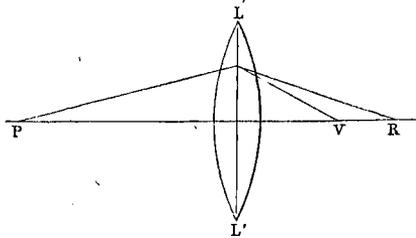


Fig. 568.

flint glass (plus dispersif, une partie de la chaux est remplacée par de l'oxyde de plomb), cette seconde lentille recouvrant exactement une des faces de la première (fig. 567).

(On peut concevoir comment ce système est susceptible d'être achromatique.

Considérons en premier lieu une lentille convergente recevant les rayons d'un point P situé sur son axe principal (fig. 568): les rayons réfractés rouges et violets convergent en R et en V.

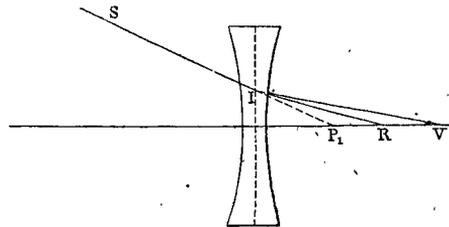


Fig. 569.

Considérons, en second lieu, une lentille divergente recevant un rayon convergent (689,2°) suivant SP_1 , (P_1 entre le deuxième foyer principal et la lentille) (fig. 569) : les foyers conjugués du point P_1 s'étaleront entre R et V , et le rayon rouge sera cette fois le moins écarté de la lentille parce qu'il est le moins dévié.

Assemblons une lentille convergente et une lentille divergente (fig. 570). V et R seraient les deux points où les rayons violet et rouge issus de P viendraient rencontrer l'axe après avoir traversé la première lentille seule; la deuxième lentille portera R en P' ; mais on conçoit que le foyer V qui doit être, dans cette seconde réfraction, plus écarté que le foyer R , pourra aussi être reporté en P' .

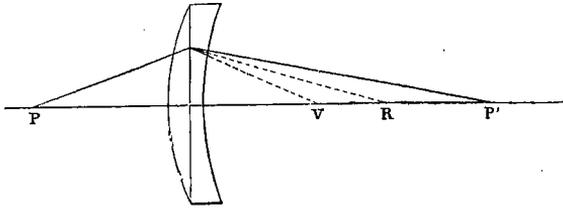


Fig. 570.

Avec deux lentilles de *même* substance, les deux foyers conjugués V et R ne pourraient être reportés en un même point P' sans que les foyers des autres couleurs fussent en même temps amenés exactement en coïncidence en P' , mais comme un système homogène ne peut produire de déviation sans dispersion, la *déviation serait annulée* et le système cesserait d'être convergent.

Il faut donc pour que le système reste convergent que les deux lentilles soient *de substances différentes*; on démontre alors qu'il est possible de choisir ces substances de manière à amener exactement en coïncidence les foyers définitifs de deux couleurs quelconques, mais de deux couleurs seulement; une dispersion subsiste donc, mais elle est très petite et d'ordinaire négligeable, quand l'achromatisme a été réalisé pour le *bleu* et l'*orangé*.

La distance focale F du système des deux lentilles (689,2°) est donnée par la relation

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{f} - \frac{1}{f'}$$

f étant la distance focale de la lentille convergente de crown et f' la distance focale de la lentille divergente de flint.

Lorsqu'un système déterminé aura les mêmes foyers principaux pour l'orangé et le bleu, les foyers conjugués orangé et bleu correspondant à un foyer lumineux quelconque seront aussi en coïncidence.

Si, en effet, on a $\frac{1}{F_o} = \frac{1}{F_b}$, les équations

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'_o} = \frac{1}{F_o} \quad \text{et} \quad \frac{1}{p} + \frac{1}{p'_b} = \frac{1}{F_b}$$

donneront pour un même point de distance p des valeurs égales p'_o et p'_b .

C'est l'emploi des lentilles achromatiques qui rend possible la construction des puissantes lunettes astronomiques et des microscopes de fort grossissement.

MOUVEMENT VIBRATOIRE LUMINEUX

720. Nous avons reconnu que les corps sonores sont animés d'un mouvement vibratoire (528) et que ce mouvement se transmet à l'oreille par l'intermédiaire de milieux élastiques (529). L'analogie des phénomènes d'*Interférences* en Optique et en Acoustique a conduit à admettre que les corps lumineux sont également le siège de mouvements vibratoires pendulaires qui se transmettent jusqu'à la rétine par l'intermédiaire d'un milieu élastique. Comme la lumière traverse le vide et les espaces célestes, la masse du milieu élastique par lequel s'effectue la transmission est plus faible que celle des gaz les plus raréfiés. Ce milieu hypothétique est appelé **Éther**. Il pénètre tous les corps.

L'**intensité lumineuse**, comme l'intensité sonore, augmente avec l'*amplitude* des vibrations de la source vibrante; la **couleur**, analogue à la hauteur en Acoustique, est caractérisée par le *nombre des vibrations*.

Longueur d'onde. — Les vibrations successives d'un corps lumineux se communiquent de proche en proche aux diverses portions de l'éther qui l'entoure. L'ensemble des mouvements de la source lumineuse pendant une seconde agite un espace égal à la vitesse de propagation, de telle façon que si la source exécute n vibrations par seconde, le premier mouvement a parcouru 300 mille kilomètres (603) quand la $(n + 1)^{\text{e}}$ vibration commence à la source.

Les mouvements de chacune de ces n vibrations sont répartis sur un espace d'une longueur égale à $\frac{V}{n}$ appelé **longueur d'onde** de la couleur considérée.

V désigne la vitesse de propagation du mouvement vibratoire lumineux dans le milieu où la transmission a lieu, n est le nombre de vibrations par seconde.

On représente la longueur $\frac{V}{n}$ par la lettre λ et on pose :

$$V = n\lambda.$$

Si T est la durée d'une vibration, il est clair qu'on a $nT = 1$; d'où, en remplaçant n par sa valeur $\frac{V}{\lambda}$ on obtient :

$$\lambda = VT.$$

la longueur d'onde est donc l'espace parcouru par le mouvement vibratoire pendant la durée d'une vibration.

Les valeurs de V , n , T et λ sont d'un ordre de grandeur très différent dans le cas des vibrations sonores et dans le cas des vibrations lumineuses.

Tandis que les nombres de vibrations pour les sons perceptibles sont à peu près compris entre 20 et 20 000 par seconde, *les vibrations lumineuses sont beaucoup plus fréquentes* et comprises à peu près entre 400 et 700 trillions par seconde, en allant du rouge au violet, le rouge étant la couleur qu'on pourrait appeler la plus grave et le violet la plus aiguë.

Pour les rayons calorifiques infra rouges, le mouvement vibratoire est moins rapide que pour le rouge, et pour les rayons chimiques ultra violets, le mouvement vibratoire est plus rapide que pour le violet.

L'Éther transmet tous ces rayons *dans le vide* avec une même vitesse qui est de $3 \cdot 10^{10}$ centimètres par seconde (300 mille kilomètres).

Pour la vibration de la lumière jaune émise par une lampe à alcool salé (raie D) :

$$\lambda = 0^{\text{mm}}000589 = 0\mu 589$$

$$n = \frac{V}{\lambda} = \frac{3 \cdot 10^{10}}{0,589 \cdot 10^{-4}} = 5,1 \cdot 10^{14}.$$

La longueur d'onde diminue du rouge au violet. Les rayons ultra violets les plus réfringibles qu'on ait observés ont une longueur d'onde égale à $0^{\mu}1$. La longueur d'onde des rayons infra rouges les moins réfringibles atteint 60^{μ} ($0^{\text{mm}},06$). Les rayons visibles sont à peu près compris entre $0^{\mu}4$ et $0^{\mu}7$.

On sait depuis les expériences de Hertz que l'éther est susceptible d'exécuter des vibrations beaucoup moins rapides que les vibrations infra rouges les moins réfringibles : telles sont les vibrations qui constituent le *Rayonnement électrique* (1034). Comme d'autre part il est probable que l'éther est capable d'exécuter des vibrations plus rapides que les vibrations ultra violettes, on voit que si l'on donne le nom de *radiations* à toutes les vibrations de l'éther quel que soit leur mode de production, ces vibrations peuvent offrir une *fréquence* (nombre de vibrations par seconde) qui varie dans des limites extrêmement étendues. On ne connaît pas encore le moyen d'exciter toutes ces fréquences dans l'éther, et en particulier celles qui sont comprises entre les radiations électriques et les radiations infra rouges.

721. Vitesse de propagation dans les différents corps. — Bien que l'éther imprègne tous les corps et que la propagation du mouvement vibratoire lumineux se fasse par cet éther, il y a entre la substance d'un corps et l'éther qui le pénètre des liaisons telles que la vitesse de la lumière varie avec la nature du corps dans lequel elle se propage. Dans les milieux plus réfringents que l'air, la lumière se propage moins vite que dans l'air et la vitesse de propagation change en outre avec la couleur.

722. Valeur théorique de l'indice de réfraction. — On démontre que l'indice de réfraction d'une substance 2 par rapport à une substance 1 est égal au quotient de la vitesse V_1 de propagation de la lumière dans le milieu 1 par la vitesse V_2 de propagation dans le milieu 2.

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = m_{12} = \frac{V_1}{V_2}$$

Conséquences. — 1° m_{21} sera de même égal à $\frac{V_2}{V_1}$;

$$\text{d'où } m_{12} = \frac{1}{m_{21}}.$$

2° Étant donné deux lames parallèles, en contact ou séparées, plongées dans un même milieu (fig. 487),

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{V_1}{V_2}, \quad \frac{\sin i_2}{\sin i_3} = \frac{V_2}{V_3}, \quad \frac{\sin i_3}{\sin i'_1} = \frac{V_3}{V_1}$$

Multiplions, nous obtenons : $\frac{\sin i_1}{\sin i'_1} = 1$.

$$\text{d'où } i'_1 = i_1 :$$

c'est le résultat expérimental de la sortie parallèle à l'entrée.

$$3^\circ \quad m_{23} = \frac{m_{13}}{m_{12}}$$

$$\text{En effet } m_{23} = \frac{V_2}{V_3}, \quad m_{13} = \frac{V_1}{V_3}, \quad m_{12} = \frac{V_1}{V_2}$$

En faisant le quotient de m_{13} par m_{12} on trouve bien m_{23} .

4° Considérons la relation $m_{12} \sin i_2 = m_{13} \sin i_3$; remplaçons m_{12} par $\frac{V_1}{V_2}$, m_{13} par $\frac{V_1}{V_3}$; nous obtenons $\frac{\sin i_2}{V_2} = \frac{\sin i_3}{V_3}$, forme sous laquelle on peut mettre la loi générale de la réfraction.

5° La couleur d'une radiation reste invariable dans ses diverses transmissions et est caractérisée par la période T ; d'après cela, la longueur d'onde λ_1 dans le milieu 1, et la longueur d'onde λ_2 dans le milieu 2 sont exprimées par les relations

$$\lambda_1 = V_1 T$$

$$\lambda_2 = V_2 T$$

la longueur d'onde d'une radiation varie donc dans les différents milieux, et elle est proportionnelle à la vitesse de propagation ;

$$\text{et on a } \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{V_1}{V_2} = m_{12}$$

L'indice de réfraction dépend donc de la longueur d'ondulation de la lumière employée.

723. Construction d'Huygens. — Huygens a fait connaître une construction géométrique pour trouver la marche d'un rayon réfracté ; cette construction se présente sous une forme très symétrique quand on remplace l'indice de réfraction par un rapport de vitesses.

Soit MN la surface de séparation de deux milieux 1 et 2 (2 plus réfringent que 1) dans lesquels les vitesses de propagation sont V_1 et V_2 ; SI étant un rayon incident venant du premier milieu ; du point d'incidence on trace deux circonférences de rayons V_1 et V_2 ; on prolonge SI jusqu'à la circonférence

V_1 , et au point d'intersection A on mène une tangente jusqu'à sa rencontre K

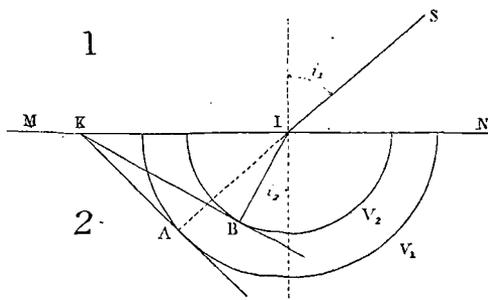


Fig. 571.

avec la surface MN; du point K on mène une tangente à la circonférence V_2 , soit B le point de contact, le rayon réfracté est IB (fig. 571).

$$\text{En effet } IA = V_1 = IK \sin i_1$$

$$IB = V_2 = IK \sin i_2$$

$$\text{d'où } \frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{V_1}{V_2}$$

Le rapport $\frac{\sin i_1}{\sin i_2}$ est constant, quel que soit le rayon incident et égal à l'indice de réfraction, i_2 est donc bien l'angle de réfraction.

724. Spectre normal. — On dit qu'un spectre est *normal* quand la *déviation d'une radiation quelconque est proportionnelle à la longueur d'onde de cette radiation*; dans un tel spectre la répartition des divers effets n'est pas la même que dans un spectre prismatique, et le maximum d'effet calorifique se trouve dans le jaune comme le maximum d'effet lumineux. Dans les spectres prismatiques ou produits par un prisme (708), la chaleur paraît concentrée dans la région infra rouge : cela tient à ce que dans ces spectres les rayons peu réfrangibles sont resserrés dans un petit espace angulaire tandis que les rayons très réfrangibles sont incomparablement plus dispersés. Le mode de dispersion diffère d'ailleurs avec la substance du prisme, d'où il résulte que la répartition de la chaleur semble varier avec la substance du prisme, même quand l'absorption est négligeable.

Les spectres des réseaux⁽¹⁾ sont des spectres normaux.

(1) On obtient un *réseau* en traçant avec un diamant sur une plaque de verre une série de traits très rapprochés équidistants et parallèles (100 par exemple par millimètre). Les traces du diamant forment des traits opaques séparés par des intervalles transparents.

Si l'on regarde à travers un réseau une fente parallèle aux traits éclairée par la lumière solaire, on voit plusieurs spectres étalés perpendiculairement à la fente et dans lesquels les raies noires sont parallèles aux traits.

725. Dispersion anormale. — Dans la dispersion à travers un prisme de verre les radiations se succèdent dans l'ordre de leurs longueurs d'onde, la déviation croissant quand la longueur d'onde diminue (du rouge au violet). Cet ordre de succession avait été le seul observé pendant longtemps (698), pourtant il n'est pas général. Leroux avait remarqué en 1862 que la vapeur d'iode réfracte le rouge plus fortement que le bleu. On a reconnu ensuite que les substances dites à *couleurs superficielles* (ou présentant par réflexion d'autres couleurs que par transmission) offrent comme la vapeur d'iode un spectre anormal. Ainsi une solution alcoolique de fuchsine, renfermée à cause de son opacité dans un prisme à angle très aigu, donne un spectre où le bleu et le violet sont moins déviés; ce spectre finit par le rouge et le jaune.)

VISION

726. Description de l'œil (fig. 572). — L'œil, organe de la vision, a la forme d'un globe sphéroïdal, d'environ 23 millimètres de diamètre, mobile sous l'influence de muscles dans une cavité du crâne appelée *orbite*. Les milieux de l'œil sont enveloppés par une membrane blanche, très résistante S, la *sclérotique*, opaque, sauf sur la partie antérieure où elle devient la *cornée transparente* C.

La cornée transparente présente une courbure notablement plus prononcée que celle du reste du globe oculaire.

La sclérotique est doublée intérieurement, sauf en avant, d'une membrane vasculaire très

mince Ch, la *choroïde*. Le pigment noir qui tapisse la face interne de la choroïde convertit le fond de l'œil en une chambre noire.

Une membrane verticale, colorée à sa face antérieure et opaque, I,

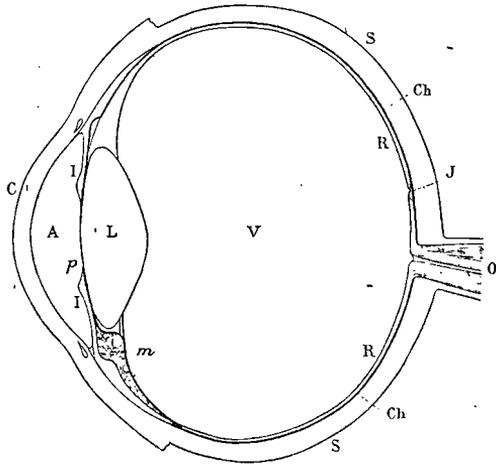


Fig. 572.

L'*iris*, adhérant par son périmètre extérieur aux prolongements antérieurs de la choroïde, partage l'œil en deux compartiments inégaux. Ce diaphragme, de nature musculaire, est percé d'une ouverture centrale et circulaire p de 3 à 4 millimètres, appelée *pupille*. C'est par la pupille que la lumière pénètre dans la chambre noire de l'œil.

Un liquide incolore, l'*humeur aqueuse* A, ayant à peu près, comme la cornée transparente, le même indice de réfraction que l'eau, occupe l'espace compris entre la cornée et l'iris (*chambre antérieure*).

Immédiatement derrière l'iris, est placé le *crystallin*, lentille biconvexe L, transparente, élastique, plus réfringente que l'humeur aqueuse, et ayant sa face antérieure moins bombée que la postérieure.

En arrière du cristallin, l'*humeur vitrée* V remplit le fond de l'œil (*chambre postérieure*). C'est une masse transparente, gélatineuse, dont l'indice de réfraction est très peu supérieur à celui de l'humeur aqueuse.

Le fond de l'œil, opposé à la cornée transparente, est tapissé intérieurement par la *rétine* R, membrane mince, translucide sur le vivant, épanouissement des fibres du nerf optique. Le nerf optique O perfore la sclérotique et se rend dans la masse cérébrale par une ouverture percée au fond de l'orbite. Tout rayon qui tombe sur la partie sensible de la rétine donne lieu à une impression de lumière transmise au cerveau par le nerf optique.

La partie la plus sensible de la rétine est appelée *tache jaune* (2 millimètres de diamètre environ); elle présente en son centre une petite dépression J appelée *fosse centrale*; à côté de la tache jaune se trouve un disque (*papille*) qui est la terminaison du nerf optique O⁽¹⁾ et dont la couleur blanche contraste avec le fond rouge de la choroïde.

727. Rôle optique de l'œil. — Dans son ensemble, l'œil peut être assimilé à une chambre noire dont l'ouverture est la pupille et dont l'écran est la rétine. La sensation d'où résulte la vision d'un objet accompagne la production de son image sur la rétine par le système convergent de l'œil.

Les milieux de l'œil, cornée et humeur aqueuse, cristallin, corps vitré et rétine sont terminés par des surfaces sensiblement *sphériques centrées sur un même axe*, l'axe du cristallin. L'ouverture de la pupille

(1) La coupe de l'œil de la figure 572 passe par le milieu de la tache jaune et le centre de la papille.

ne laisse passer que des rayons centraux ou voisins de l'axe.

Des rayons parallèles à l'axe du cristallin, tombant sur la cornée, sont rendus convergents par l'humeur aqueuse, plus convergents encore par le cristallin et vont frapper la rétine: On constate expérimentalement que ce système convergent donne d'un objet placé en avant de l'œil une image *réelle et renversée* sur la rétine (fig. 573).

L'expérience se fait avec un œil de bœuf dont la cornée transparente est tournée vers l'objet AB et dont la sclérotique a été assez

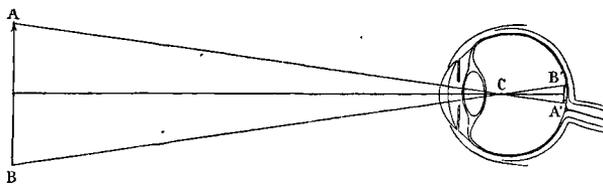


Fig. 573.

amincie extérieurement avec un rasoir pour devenir translucide. On voit se dessiner sur le fond une image $A'B'$ réelle, renversée, plus petite que l'objet. Les lignes qui joignent les images à leurs points lumineux passent toutes *par un même point C* voisin de la face postérieure du cristallin et se comportant comme le centre optique d'une lentille.

Le système optique de l'œil est un *système convergent ayant un centre optique situé sur l'axe principal du cristallin⁽¹⁾ et dont le foyer principal postérieur tombe sur la rétine dans les conditions moyennes.*

L'iris en se contractant diminue l'ouverture de la pupille. Les variations d'ouverture de la pupille, automatiques, proportionnent à la sensibilité de la rétine la quantité de lumière qui passe. Il est aisé de constater que la pupille se dilate dans l'obscurité et se contracte sous l'influence d'une vive lumière.

Œil réduit. — En appliquant les principes de la théorie des lentilles épaisses, on reconnaît qu'avec les indices de réfraction, les épaisseurs et les

(1) La théorie des lentilles infiniment minces ne peut pas rendre compte des conditions de la réfraction à travers les milieux de l'œil: il s'agit ici de *lentilles épaisses* recevant des rayons voisins de leur axe principal commun.

Le système convergent de l'œil sépare deux milieux inégalement réfringents, l'un ayant l'indice de l'air et situé en avant de la cornée, l'autre ayant sensiblement l'indice de l'eau et formé par l'humeur vitrée. Ce système présente un foyer principal antérieur et un foyer principal postérieur. Ce dernier est le point de concours des rayons parallèles à l'axe venant de l'extérieur.

courbures de ses diverses parties, le système convergent de l'œil peut être remplacé avec une exactitude suffisante par une *surface sphérique* unique ayant son centre au centre optique de l'œil et séparant deux milieux inégalement réfringents (fig. 574), l'un ayant l'indice de l'air et situé du côté de la con-

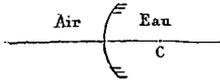


Fig. 574.

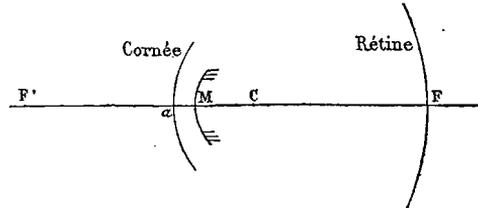


Fig. 575.

convexité, l'autre ayant l'indice de l'eau et situé du côté de la concavité de la surface. Le rayon R de cette surface sphérique fictive est un peu supérieur à 5 millimètres. L'œil ainsi simplifié s'appelle *œil réduit*. La surface M de l'œil réduit est à 2^{mm} de la surface de la cornée transparente, $aM = 2^{\text{mm}}$, $aC = 7^{\text{mm}}$ (fig. 575).

L'expérience démontre différents faits que nous admettons :

- 1° La production d'une image rétinienne est indispensable à la vision.
- 2° La vision nette d'un objet et de ses contours exige que la rétine soit le plan conjugué de l'objet par rapport au système convergent de l'œil. Le cône convergent qui aboutit à l'image doit avoir son sommet sur la rétine.
- 3° Les détails d'un objet sont d'autant plus visibles que le diamètre apparent de l'objet vu du centre optique est plus grand ou que l'image rétinienne est plus grande.

4° Quoique l'image d'un objet se dessine sur chacune des deux rétines, nous ne percevons qu'une image, les impressions se superposant pour donner une sensation unique.

728. Image rétinienne. — Dans l'œil normal, la rétine occupe la place du plan focal postérieur du système convergent et l'image d'un objet très éloigné se dessine sur la rétine.

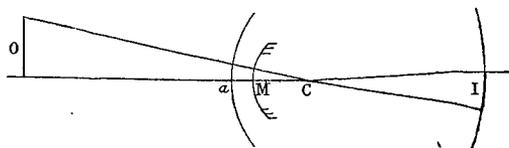


Fig. 576.

Pour obtenir l'image d'un objet, il suffit pratiquement de joindre au centre optique les différents points de l'objet et de prolonger les axes secondaires jusqu'à la rétine.

La distance du centre optique C à la rétine est 15^{mm} ; on démontre

que le rapport de grandeur de l'image rétinienne à l'objet $\frac{I}{O} = \frac{15}{D}$,
 D distance de l'objet au centre optique, $D = d + 7$, d distance de
 l'objet à la cornée transparente; la distance de la surface antérieure
 de l'œil au centre optique (fig. 576) est égale à 7^{mm}.

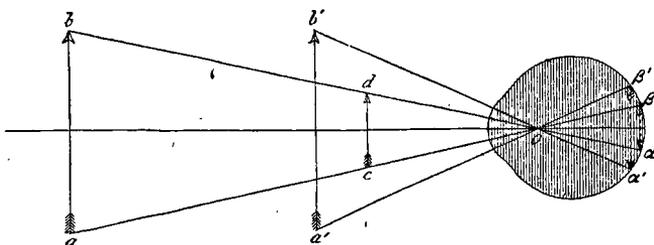


Fig. 577.

La grandeur de l'image rétinienne est proportionnelle au diamètre apparent de l'objet vu du centre optique : elle est d'autant plus petite que l'objet ab est plus éloigné (fig. 577).

729. Distance de la vision distincte. — C'est la distance à laquelle un objet doit être placé pour être vu distinctement. Si le pouvoir réfringent du système optique de l'œil était invariable, il n'y aurait pour des yeux identiques qu'une distance de la vision distincte, mais elle est comprise entre des limites de distances assez larges, en vertu d'une adaptation spéciale ou *mise au point* de l'œil qu'on appelle **accommodation**. Toutefois, on ne peut voir nettement *simultanément* à des distances inégales; l'œil adapté pour voir à une certaine distance ne l'est pas pour voir à une distance différente. Ainsi, un seul œil étant ouvert, si l'on pose deux épingles l'une devant l'autre, à une certaine distance l'une de l'autre, on voit nettement la première quand on la fixe et la deuxième est confuse, mais si l'on fixe la deuxième, c'est la première qui devient confuse.

730. Mécanisme de l'accommodation. — En plaçant une bougie allumée devant l'œil d'un sujet, dans une chambre noire, on voit trois images : une première image a , *droite*, virtuelle, due à la réflexion sur la surface convexe de la cornée, une deuxième image b , *droite*, virtuelle, plus grande et plus pâle que la précédente, due à la réflexion sur la surface antérieure du cristallin, qui est moins convexe que la cornée, enfin une troisième image c , beaucoup plus petite que les deux autres, *renversée* et réelle, produite par la réflexion sur la concavité de la face postérieure du cristallin (fig. 578).

Si la vue du sujet est portée brusquement d'un objet éloigné, fig. (A) à un

objet distant de 20 centimètres, fig. (B), la première image de la bougie (image cornéenne) ne varie pas, la deuxième se rapproche de l'image cornéenne, diminue et augmente légèrement en intensité, accusant ainsi une *augmentation de courbure* de la face antérieure du cristallin; la troisième image varie très peu (recule un peu et devient un peu plus petite).

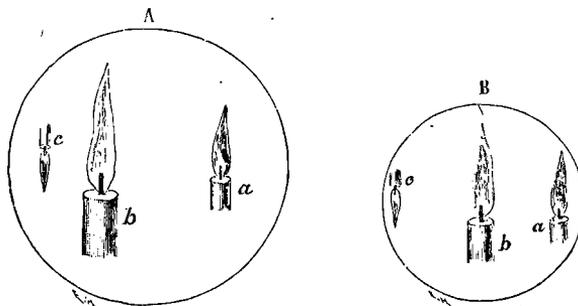


Fig. 578.

L'augmentation de convexité de la face antérieure du cristallin, due à la contraction des fibres circulaires du muscle ciliaire embrassant son pourtour, augmente la convergence du système optique de l'œil, et diminue sa distance focale principale. A mesure que l'objet se rapproche de l'œil, son image se trouve ainsi ramenée sur la rétine, ce qui permet de voir successivement avec netteté des objets placés à des distances différentes.

731. Distance minimum de la vision distincte. — Le degré de convergence qui résulte de l'accommodation ne peut pas dépasser une certaine limite, et il y a une distance minimum de la vision distincte. Un objet est vu sous le plus grand diamètre et peut être le mieux étudié dans ses détails quand on le place à cette distance minimum de la vision distincte. Toutefois la vision à la distance minimum de la vision distincte est fatigante, car elle exige le maximum de contraction du muscle ciliaire.

Emmétropie. — Amétropie. — Les conditions de la vision dépendent de la position de la rétine par rapport au plan focal principal postérieur du système convergent de l'œil, dans l'état de relâchement complet de l'accommodation.

L'œil est dit normal ou *emmétrope* si la rétine coïncide avec ce plan focal, sinon il est *amétrope*. L'œil est *brachymétrope* ou *myope* quand le plan focal est situé en avant de la rétine; il est *hypermétrope* quand le plan focal est en arrière de la rétine.

Œil emmétrope. — L'image d'un point lumineux placé à une très

grande distance⁽¹⁾ se fait sur la rétine lorsque les muscles de l'accommodation sont au repos (fig. 579). Si le point lumineux se rapproche, son image se fait au delà du plan focal, le cône convergent de l'image est coupé par la rétine suivant un *cercle de diffusion* dont le rayon grandit à mesure que l'image s'éloigne et l'image devient de moins en moins nette. C'est alors que par l'accommodation l'image



Fig. 579.

est ramenée sur la rétine. Mais, par le déploiement de toute la force accommodative, le degré de convergence ne dépasse pas une certaine limite. Quand cette limite est atteinte, un objet situé dans le plan conjugué de la rétine se trouve à la distance minimum de la vision distincte, ou au *punctum proximum* : cette distance est d'environ 20 centimètres pour un œil normal. Les yeux exactement emmétropes sont rares, toutefois une conformation sensiblement emmétrope est fréquente.

Presbytie. — La puissance d'accommodation diminue par l'effet de l'âge : le *punctum proximum* s'éloigne, il y a presbytie quand il devient distant de l'œil de 50 à 60 centimètres. Les vieillards sont habituellement obligés de tenir un livre très éloigné pour pouvoir lire nettement.

Œil myope. — L'œil est dit myope si par suite d'une trop forte courbure de la cornée ou plus souvent par suite d'un allongement de l'œil, l'image d'un point très éloigné se fait en avant de la rétine en *f*, le muscle de l'accommodation étant au repos (fig. 580). Le point le plus éloigné qu'on puisse voir est celui dont l'image se fait alors sur la rétine : on l'appelle *punctum remotum*, il est dans le plan conjugué de la rétine. Pour ces objets plus rapprochés, l'accommodation intervient, le *punctum proximum* est ordinairement plus rapproché de l'œil que pour l'œil normal. Pour cette raison, l'angle sous

(1) Un point lumineux situé à 5 ou 6 mètres envoie sur l'œil des rayons sensiblement parallèles et, au delà de 5 mètres, un objet est vu sans accommodation par un œil emmétrope.

lequel un œil myope peut voir les petits objets est plus grand et il distingue mieux les détails qu'un œil emmétrlope.

Le *parcours d'accommodation* ou la distance du *punctum remotum* au *punctum proximum* est peu étendu dans le cas de forte myopie. Cet intervalle se resserre avec l'âge par suite d'un affaiblissement de la puissance d'accommodation, et le *punctum proximum* se rapproche du *punctum remotum*.

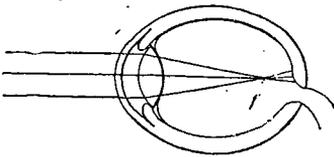


Fig. 580.

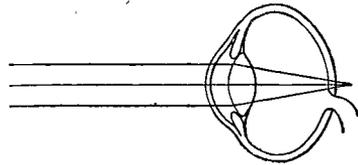


Fig. 581.

Œil hypermétrope. — L'œil hypermétrope est trop court, il n'est pas assez convergent dans ces conditions, aucune vision n'est possible, sans accommodation, ni à grande distance, ni à plus forte raison de près, car l'image se fait en arrière de la rétine et le cône convergent réfracté est coupé par la rétine suivant un cercle de diffusion (fig. 581). La vision ne pourrait être nette que si le faisceau incident était convergent, le sommet virtuel du faisceau convergent ayant son conjugué sur la rétine. Par suite de l'accommodation, une légère hypermétropie passe inaperçue, la convergence étant alors augmentée de façon à produire sur la rétine l'image d'un objet éloigné. Le *punctum proximum* est ordinairement plus éloigné de l'œil que dans le cas de l'œil emmétrlope. Pour un œil hypermétrope la presbytie apparaît plus tôt que pour un œil normal.

Astigmatisme. — Les trois modes de réfringence : emmétrlope, myopie, hypermétropie peuvent se réunir sur un même œil et donner lieu à l'*astigmatisme*.

Dans l'astigmatisme, la réfringence peut varier d'un méridien à l'autre d'une façon progressive, tel méridien étant emmétrlope, myope ou hypermétrope. Cela tient souvent à ce que la cornée transparente présente des *courbures différentes* dans les différents plans que l'on mène par l'axe optique. Si, par exemple, la courbure est plus petite dans un méridien horizontal, l'œil sera myope dans ce méridien.

Pour nous rendre compte des apparences produites par ces inégalités de courbure, imaginons une figure formée de rayons partant d'un centre O.

Un œil emmétrlope verra tous ces rayons avec la même netteté, mais si l'on intercepte la lumière sur l'un des deux yeux avec un écran et qu'on place devant l'autre œil une *lentille cylindrique* à axe vertical (exerçant par

conséquent sa réfringence dans le plan horizontal) les différents points de la ligne verticale formeront sur la rétine des images sous forme de traînées horizontales; pour la ligne horizontale les images des points étant allongées transversalement se réunissent et forment une ligne horizontale bien accusée. Les rayons sont vus d'autant moins nettement qu'ils se rapprochent davantage de la verticale, les apparences sont les mêmes que si l'œil était myope dans le méridien horizontal. C'est un astigmatisme artificiel.

732. Correction des amétropies. Besicles. — Les besicles remédient aux défauts d'accommodation de l'œil. Si l'œil n'est pas emmétrope, on fait usage de besicles pour le ramener aux conditions de l'emmétropie ou l'adapter aux rayons parallèles, de telle façon qu'après leur réfraction ces rayons concourent sur la rétine.

Correction de la myopie. — L'œil myope étant trop convergent, les rayons parallèles à l'axe sont concentrés en avant de la rétine. Appelons D la distance du *punctum remotum* ou du point conjugué du centre de la rétine par rapport au système convergent de l'œil (sans accommodation).

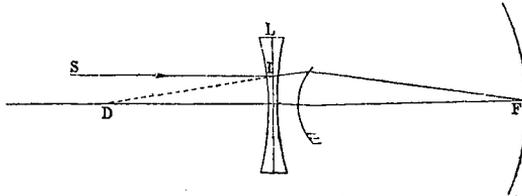


Fig. 582.

Pour corriger la myopie on applique contre l'œil une lentille divergente dont la distance focale est D (fig. 582), le point de concours virtuel des rayons parallèles à l'axe réfractés par la lentille divergente sera en avant de la face antérieure de l'œil à la distance D , les rayons qui partent de ce point seront concentrés par l'œil sur la rétine.

Le foyer des rayons parallèles à l'axe qui, sans la lentille divergente, serait au point indiqué par le croisement des lignes pointillées, est porté sur la rétine (fig. 583).

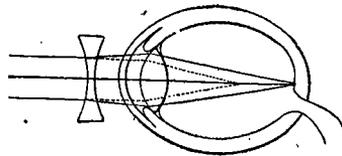


Fig. 583.

On voit que la distance focale de la lentille divergente de correction⁽¹⁾ est égale à la distance maximum de la vision distincte de l'œil myope.

(1) Le numéro d'une lentille de correction est sa puissance en *dioptries* ou l'inverse de sa distance focale évaluée en mètres.

Si la lentille de correction n'est pas exactement appliquée contre la surface extérieure de l'œil, mais se trouve à une distance d , sa distance focale devra être $D - d$ pour que le point de concours des rayons réfractés par la lentille reste à la distance D de la surface antérieure de l'œil.

Correction de l'hypermétropie. — L'œil hypermétrope n'étant pas assez convergent, les rayons parallèles à l'axe sont concentrés en arrière de la rétine. Un point lumineux devrait donc être virtuel et situé en arrière de l'œil à une distance D' de la face antérieure de l'œil pour faire son image sur la rétine (sans accommodation). On adapte un œil hypermétrope aux rayons parallèles ou on donne à ses rayons une convergence qui leur permet d'être concentrés par l'œil sur la rétine en appliquant contre la face antérieure de l'œil une *lentille convergente* de distance focale D' ; en traversant cette lentille, des rayons incidents parallèles à l'axe convergent à la distance D' , ce qui permet à l'œil de les concentrer sur la rétine.

La distance focale de la lentille convergente de correction doit être égale à la distance du *punctum remotum*, c'est-à-dire à la distance du point conjugué de la rétine par rapport au système réfringent de l'œil.

Correction de l'astigmatisme. — L'astigmatisme produit sur un œil emmétrope par une lentille cylindrique pourrait être corrigé par une lentille cylindrique s'adaptant exactement sur la première de manière à l'annuler et à former un système sans réfringence. Un astigmatisme se corrigera donc avec une lentille cylindrique de réfringence déterminée et convenablement orientée. Cela reviendra à augmenter ou à diminuer la convergence dans le méridien perpendiculaire à l'axe de la lentille.

Correction de la presbytie. — La puissance d'accommodation n'étant plus suffisante pour amener sur la rétine l'image d'un objet

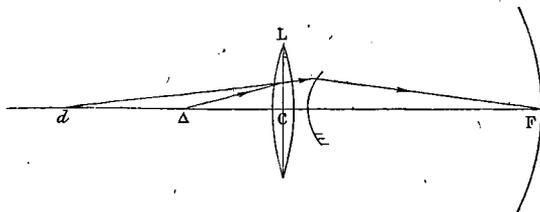


Fig. 584.

rapproché, on supplée au défaut de convergence du cristallin pour la vision des objets peu éloignés par l'emploi d'une lentille convergente.

Soit d la distance du *punctum proximum* d'un œil presbyte ou la distance minimum à laquelle un point doit se trouver de la face antérieure de l'œil pour donner son image sur la rétine. La correction a pour objet de faire voir nettement à la distance du *punctum proximum* d'un œil normal. Plaçons devant l'œil une lentille convergente de distance focale φ fonctionnant comme loupe (740). Un objet placé à la distance Δ est reporté à la distance d du même côté de la lentille (fig. 584). Les distances d et Δ doivent être conjuguées par rapport à la lentille.

$$\frac{1}{\Delta} - \frac{1}{d} = \frac{1}{\varphi},$$

cette équation fera connaître φ .

Pour voir de loin, le presbyte n'a besoin d'aucun verre.

(733. **Évaluation des distances.** — Un seul des deux yeux suffit pour la vision; si l'on regarde avec les deux yeux un même point, on dirige vers ce point les axes visuels des deux yeux. L'*axe visuel* est la ligne qui joint le point observé à la partie la plus sensible de la rétine (*tache jaune*), cette

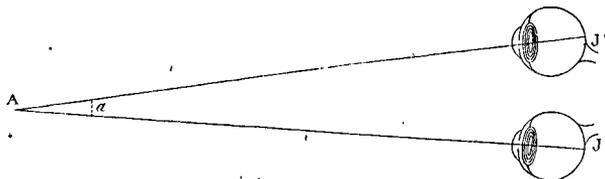


Fig. 585.

ligne passe par le centre optique et diffère peu de l'axe optique du système convergent de l'œil. La distance d'un point A est d'autant plus petite que l'angle JAJ' des axes visuels (fig. 585) est plus grand. La conscience de la grandeur de cet angle peut dépendre de l'effort exigé pour faire converger les deux axes visuels, effort exercé par les organes mis en jeu, par exemple les muscles de l'œil. Quand un objet éloigné change de distance, l'angle des deux axes varie très peu et l'appréciation du changement de distance devient incertaine.

Nous jugeons de la **grandeur des objets** par leur diamètre apparent (grandeur des images rétinienne) et par leur distance (évaluation inconsciente de l'angle des axes visuels.)

734. Appréciation du relief. — Quand on regarde un objet avec un seul œil, surtout un objet que l'on voit pour la première fois, il semble plat comme le serait un dessin : la vue simultanée avec les deux yeux permet d'apprécier le relief. En voici la raison.

Les deux images rétinienne d'une figure plane d'un objet éloigné sont très sensiblement identiques. Mais si l'objet est à trois dimensions et rapproché, les deux images diffèrent un peu entre elles, l'œil droit voyant un peu plus de la partie droite de l'objet et l'œil gauche un peu plus de la partie gauche. On s'en rend compte en fixant successivement de l'œil droit et de l'œil gauche, sans déplacer la tête, un objet à contours bien arrêtés, tel qu'un dé à jouer (fig. 586). La sensation du relief résulte de la légère différence des images formées dans les deux yeux et de l'impression due à la vision simultanée de ces deux images dissymétriques.

Le *stéréoscope* de Wheatstone confirme cette hypothèse. On place en *a* et en *a'* deux photographies d'un même objet qui ont été prises par deux appareils placés côte à côte comme le seraient les deux yeux; ces photographies sont disposées l'une près de l'autre dans le *stéréoscope* (fig. 587), un prisme *C*, interposé entre elles, et

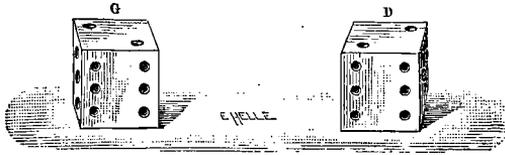


Fig. 586.

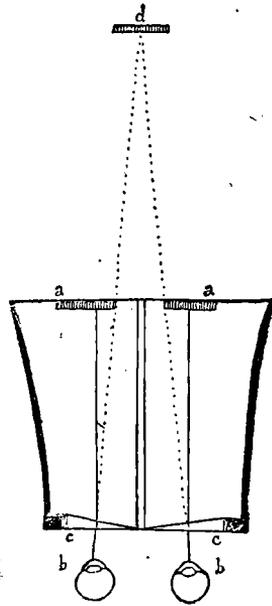


Fig. 587.

chaque œil dévie légèrement les rayons partis de chacune et superpose leur image en *d*. On regarde chacune des images avec l'œil correspondant et la simultanéité des impressions donne lieu à une vive sensation du relief.

735. Persistance des impressions sur la rétine. — Une sensation lumineuse persiste un certain temps après que l'objet qui l'a produite a disparu. C'est pour cela que nous voyons sous l'apparence d'une ligne lumineuse un point brillant qui se meut avec rapidité. La longueur de cette ligne lumineuse est le chemin parcouru par le point lumineux pendant la durée ordinaire de la persistance, sensiblement $\frac{1}{10}$ de seconde. Il est nécessaire d'autre part que la lumière agisse sur la rétine pendant un certain temps pour que la sensation atteigne son maximum et la durée de ce maximum est d'autant plus grande que la lumière est plus intense.

La sensation des couleurs persiste aussi bien que celle de la forme des objets. Nous en avons vu un exemple dans l'expérience du *disque à secteurs colorés* à propos de la recombinaison de la lumière blanche (701.)

INSTRUMENTS D'OPTIQUE

736. Les *instruments d'optique* servent à aider la vision dans l'observation des détails des objets. Ils augmentent la *puissance* de l'œil, c'est-à-dire l'angle sous lequel il voit l'unité de longueur d'un objet. Les principaux instruments d'optique mettent en œuvre des lentilles et surtout des lentilles convergentes.

Une lentille convergente est employée de deux façons principales ; tantôt l'objet est placé au delà du foyer principal, et la lentille en donne une image réelle : la lentille porte alors le nom d'*objectif* ; tantôt l'objet est placé entre le foyer et la lentille, et la lentille en donne une image virtuelle : la lentille est alors appelée *loupe*.

Nous allons d'abord étudier deux appareils dans lesquels la lentille convergente est employée comme objectif : la chambre noire et les appareils de projection.

737. Chambre noire. — La chambre noire décrite précédemment (600) se composait d'une caisse fermée à parois noircies dont l'une des faces était percée d'une petite ouverture ; sur la face opposée

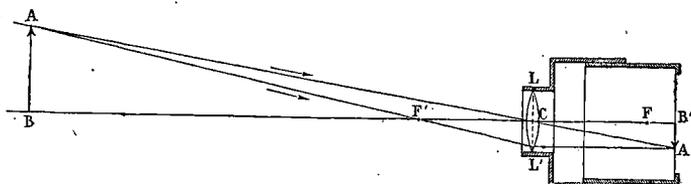


Fig. 588.

était appliqué un écran. On complète l'appareil en fermant l'ouverture par une *lentille convergente* LL' qui sert d'*objectif*. Sur l'écran du fond de la boîte se dessine une image réelle et renversée d'objets placés en avant de l'objectif au delà de son foyer principal (fig. 588) ; un tirage permet d'amener l'écran au foyer conjugué des objets dont on veut l'image. La lentille est en outre portée par un tube qui peut recevoir à l'aide d'une crémaillère et d'un pignon un mouvement lent qui facilite l'exacte mise au point de l'image.

Par l'addition à la chambre noire d'une lentille convergente, l'ouverture peut être considérablement agrandie et par suite l'intensité de la lumière fortement augmentée, car le faisceau issu d'un point lumineux qui pénètre dans la chambre noire a actuellement pour base, non plus une très petite ouverture, mais le diamètre de l'objectif. La netteté des images est elle-même accrue, puisque, par l'emploi de la lentille, l'image d'un point de l'objet se réduit à un point situé dans le plan conjugué de l'objet et sur son axe secondaire.

738. Appareil de projection. — La partie essentielle d'un appareil de projection est une lentille convergente ou objectif qui donne sur un écran placé dans une chambre noire une *image réelle, renversée et amplifiée* d'un objet transparent, peint ou photographié sur verre, fortement éclairé.

L'objet est vivement éclairé au moyen de la lumière solaire, ou de la lumière électrique, ou de la *lumière Drummond*. Cette dernière est la lumière qu'émet un morceau de charbon ou de magnésie rendu incandescent par la combustion d'un mélange d'oxygène et de gaz d'éclairage.

L'écran est ordinairement un écran blanc qui diffuse la lumière et fait voir l'image à tout un auditoire. L'objet est placé un peu au delà du foyer de l'objectif. Sa distance à l'objectif doit être moindre que le double de la distance focale si l'on veut une image agrandie (675). La mise au point sur l'écran se fait en déplaçant la lentille convergente.

L'équation aux foyers conjugués de la lentille est dans ce cas (673, 1°) $\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}$; le *grossissement* ou le rapport de grandeur de l'image à l'objet est $G = \frac{I}{O} = \frac{p'}{p} = \frac{p'}{f} - 1$; il est d'autant plus grand que l'écran est plus éloigné et la distance focale de l'objectif plus petite. Soit G le grossissement d'une dimension linéaire, G^2 sera le rapport de la surface de l'image à la surface de l'objet. Si l'on représente par I l'éclairement de l'objet, l'éclairement de l'image sera réduit à $\frac{1}{G^2}$, puisque la lumière est répartie sur une surface G^2 fois plus grande. En raison de cet affaiblissement de l'éclairement de l'image, on concentre sur l'objet les rayons de la source lumineuse L à l'aide d'une lentille C appelée *condenseur*. L'objet à projeter est placé renversé pour que son image soit droite (673, 1°); il est disposé dans un porte-objet AB très voisin du condenseur (fig. 589). Le condenseur fait converger les rayons de la lampe sur l'objectif O afin que tous les

rayons qui ont traversé l'objet aillent aussi passer par l'objectif. Dans le cas d'un fort grossissement (petite distance focale de l'objectif),

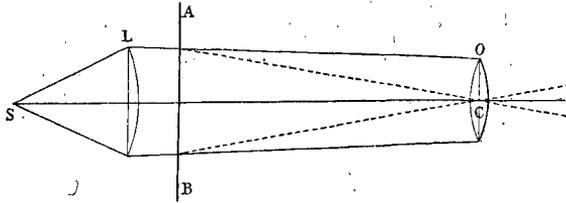


Fig. 589.

l'ouverture de l'objectif doit être petite afin d'éviter de trop importantes aberrations de sphéricité (691).

739. Microscope solaire. — Le microscope solaire est un appareil de projection disposé de façon à donner des images réelles très

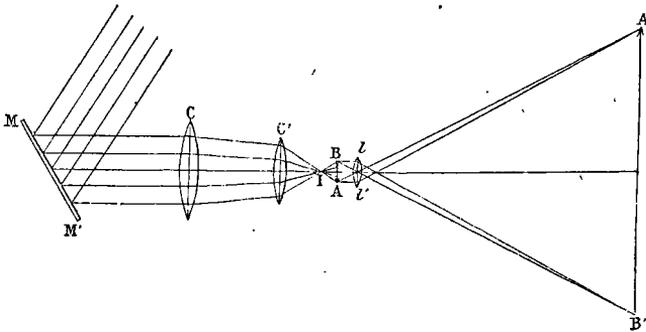


Fig. 590.

agrandies de petits objets transparents (fig. 590). On dirige les rayons solaires sur le condenseur à l'aide d'un miroir plan MM' ou *porte-lumière* placé en dehors de la chambre noire. Les rayons de la source de lumière sont concentrés sur l'objet AB à l'aide des lentilles d'illumination C et C' . Une lentille à court foyer L donne une image réelle et agrandie $A'B'$. La mise au point se fait en déplaçant l'écran ou l'objet ou l'objectif. A un très minime dé-

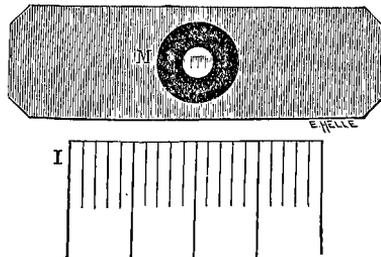


Fig. 591.

placement de l'objet ou de l'objectif correspond un grand déplacement de l'image.

On détermine directement le grossissement en mettant à la place de l'objet un *micromètre*, c'est-à-dire une lame de verre à traits équidistants, divisée en centièmes de millimètre (fig. 591).

Si l'image de n divisions du micromètre couvre sur l'écran A millimètres, on aura, en désignant par G le grossissement,

$$\frac{n}{100} \cdot G = A \quad \text{d'où} \quad G = \frac{100A}{n}$$

G est le grossissement linéaire⁽¹⁾.

LOUPE

740. La *loupe* est une lentille convergente qu'on place devant l'œil pour obtenir des images virtuelles et amplifiées des petits objets.

Soit AB un objet, C le centre optique de l'œil : l'angle ACB s'appelle le diamètre apparent de l'objet. Pour observer à l'œil nu les détails d'un petit objet, on le rapproche le plus possible de l'œil, afin d'examiner ses différentes parties sous le plus grand diamètre apparent, mais la faculté d'accommodation ne permet pas de le placer plus près que la distance minimum de la vision distincte (731).

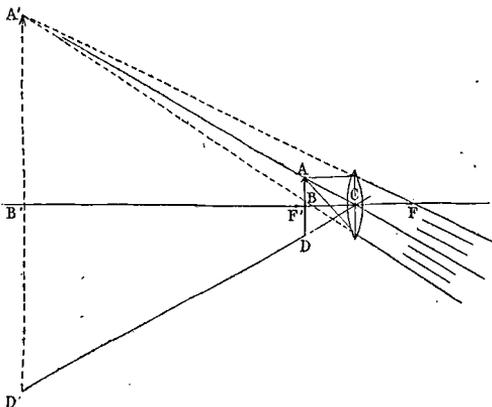


Fig. 592.

Une loupe peut donner de l'objet une image *agrandie* que l'on observe à la *même distance minimum* de la vision distincte.

(1) Les rayons calorifiques de la source étant concentrés sur l'objet éclairé en même temps que les rayons lumineux, on peut éviter un trop grand échauffement en arrêtant les rayons infra rouges à l'aide d'une cuve transparente contenant une dissolution étendue de chlorure de cuivre interposée entre l'objet et la source éclairante.

Position de l'objet. — Pour faire usage d'une loupe, on place l'objet AB entre la lentille et son second foyer F' . La construction générale de l'image (673, 2°), appliquée à ce cas particulier, conduit à une image $A'B'$ agrandie, droite et virtuelle de l'objet (fig. 592).

Marche des rayons dans la loupe. — Un observateur verra le point A' s'il est placé derrière la loupe dans le cône de sommet A' ; il verra le point D' s'il est placé dans le cône de sommet D' . Si l'œil est placé dans la partie commune à ces deux cônes, il recevra des rayons des divers points de l'image (fig. 592).

Mise au point. — L'image est transportée à l'infini si l'objet est dans le plan focal principal F' de la loupe; dans ce cas, cette image peut être vue par un œil normal qui voit nettement, sans effort d'accommodation, à une très grande distance; un myope doit placer la loupe plus près de l'objet, afin que la distance de l'image à l'œil diminue. La mise au point se fera pratiquement en approchant lentement la loupe de l'objet jusqu'à ce que, l'œil étant placé contre la loupe, l'image apparaisse le plus distinctement possible.

Puissance d'une loupe. — On cherche à voir sous le plus grand diamètre apparent une longueur déterminée d'un objet; d'après cela, l'élément qui mesure le degré d'utilité d'une loupe est sa puissance ou l'angle sous lequel on voit à travers la loupe un objet dont la longueur est égale à l'unité de longueur.

Si une longueur AB est vue avec la loupe sur l'angle ACB , l'unité de longueur, comme il s'agit de petits angles, sera vue sous l'angle $\frac{ACB}{AB}$. Cet angle est la puissance P de la loupe.

L'angle ACB est assez petit pour qu'on puisse le remplacer par sa tangente $\frac{AB}{BC}$,

$$P = \frac{AB}{BC} = \frac{1}{p}, \quad \text{en posant } BC = p.$$

Or l'équation aux foyers conjugués de la loupe est $\frac{1}{p} - \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}$; ou $p' = B'C = \Delta$, quand la mise au point est bonne; Δ désignant la distance minimum de la vision distincte.

$$P = \frac{1}{p} = \frac{1}{p'} + \frac{1}{f} = \frac{1}{\Delta} + \frac{1}{f}.$$

La loupe sera, d'après cette expression, plus avantageuse pour un œil myope que pour un œil normal (1).

Des deux termes de P , $\frac{1}{f}$ est ordinairement le plus grand. Pour une loupe à court foyer, la puissance de la loupe est donc à peu près l'inverse de sa distance focale; elle est sensiblement indépendante de la vue de l'observateur.

Une petite dimension h d'un objet sera vue à travers la loupe sous un angle hP .

Grossissement d'une loupe. — C'est le rapport des diamètres apparents sous lesquels sont vues par l'observateur deux dimensions homologues de l'image et de l'objet, l'image et l'objet étant examinés tous deux à la distance minimum de la vision distincte.

L'angle sous lequel une dimension h de l'objet est vue directement, à la distance de la vision distincte, est $\frac{h}{\Delta}$ (en supposant l'angle petit et en le confondant avec sa tangente).

L'angle sous lequel elle est vue à travers la loupe, à la distance de la vision distincte, est hP .

Le grossissement est le rapport de ces deux angles

$$\frac{hP}{\frac{h}{\Delta}} = P\Delta = 1 + \frac{\Delta}{f}.$$

Le rapport des diamètres apparents est aussi égal au rapport des grandeurs puisque l'image et l'objet sont vus à la même distance (en supposant les angles petits et en les confondant avec leurs tangentes). De là encore :

$$G = \frac{A'B'}{AB} = \frac{p'}{p} = 1 + \frac{\Delta}{f}.$$

Le grossissement diminue avec la distance de la vision distincte. Cela se conçoit : un myope place un objet à une petite distance pour en examiner les détails à l'œil nu, il gagnera donc relativement moins qu'un œil normal à faire usage de la loupe.

Achromatisme de la loupe. — D'après la construction géométrique de l'image, une loupe devrait être achromatique, car si les

(1) Si l'acuité visuelle est supposée la même, mais elle est plus faible dans le cas d'une forte myopie. Nous avons supposé l'œil exactement placé contre la loupe.

images rouge et violette d'un même point A sont séparées, elles se trouvent toutes deux sur le même axe secondaire CAA' et un œil placé

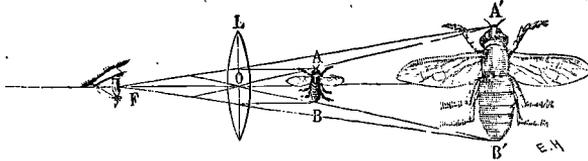


Fig. 593.

en C (fig. 592) contre la loupe verra ces deux images en prolongement, par suite les couleurs se superposent. Mais si l'œil n'est pas exactement appliqué contre la loupe, les images doivent être irisées.

Dans la figure 593 l'œil est placé à peu près au foyer de la loupe.

Le **microscope simple** (fig. 594) est une loupe *m* fixée à une monture en cuivre et pouvant être levée ou abaissée par la mise au point au moyen d'une crémaillère K. Le porte-objet est fixe, il est éclairé par dessous à l'aide d'un miroir légèrement concave M, fixé au support.

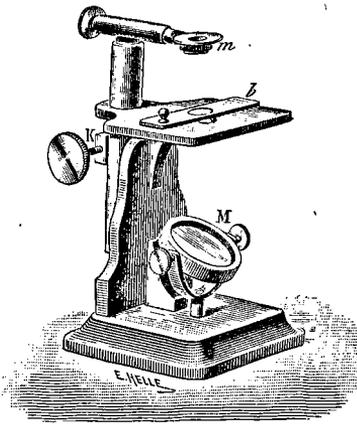


Fig. 594.

MICROSCOPE COMPOSÉ

741. Un microscope composé donne une image virtuelle et agrandie des objets très petits. Il est surtout employé dans les études d'anatomie et d'histoire naturelle. Il est formé : 1° d'un système convergent L, appelé *objectif*, donnant d'un objet AB une image A'B' réelle, renversée et agrandie. L'objet est placé au delà du foyer principal de l'objectif, plus près de l'objectif que le double de la distance focale ; 2° d'un système convergent L', appelé *oculaire*, ayant même axe principal que l'objectif ; l'image A'B' se forme entre l'oculaire et son second foyer, l'oculaire jouant le rôle de loupe par rapport à cette image. L'œil appliqué contre l'oculaire voit une image A''B'' ,

virtuelle, agrandie, droite par rapport à $A'B'$, renversée par rapport à AB .

Construction des images. — L'image réelle $A'B'$ due à l'objectif et l'image virtuelle $A''B''$ donnée par l'oculaire s'obtiennent par l'application de la construction générale (intersection de l'axe secondaire et du rayon réfracté correspondant à un rayon incident parallèle à l'axe) (fig. 595).

Marche des rayons dans le microscope. — Un point A de l'objet envoie sur l'objectif L un cône de rayons qui donne après réfraction

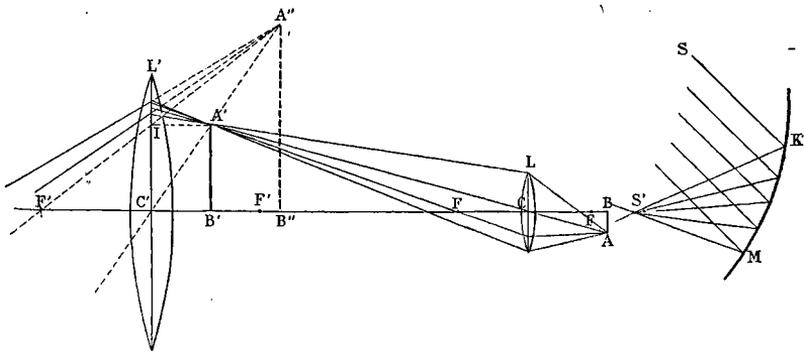


Fig. 595.

un nouveau faisceau conique convergeant en A' sur l'axe secondaire AC . La seconde nappe de ce faisceau conique part de A' , rencontre l'oculaire L' , et après réfraction offre un nouveau cône de sommet A'' (fig. 595).

On verra à la fois A'' et B'' , images de A et de B , en plaçant l'œil dans la partie commune aux deux cônes issus de A'' et de B'' .

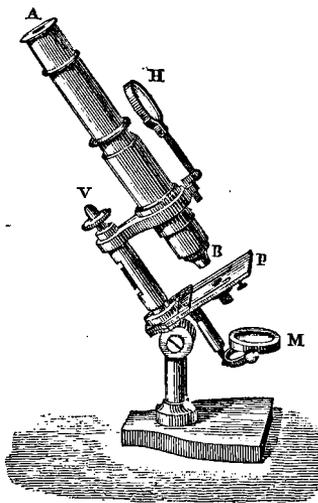


Fig. 596.

Mise au point. — L'oculaire A et l'objectif B , invariablement liés entre eux, sont adaptés aux deux extrémités d'un tube sur l'axe duquel ils sont centrés (fig. 596). L'objet repose sur un anneau P appelé *porte-objet*. On effectue la mise au point en approchant de l'objet *le tube du microscope*

tout entier. La mise au point se fait de manière que l'image A''B'' soit vue à la distance minimum de la vision distincte.

Lorsque le microscope se trouve à une distance de l'objet telle que A'B' se forme dans le plan focal de la loupe, l'image A''B'' est reportée à l'infini. Pour un observateur myope ne pouvant voir l'image A''B'' qu'à une courte distance, A'B' devra se former plus près de l'oculaire ou plus loin de l'objectif; à cet effet, on diminuera la distance de l'objet au foyer principal de l'objectif en déplaçant à l'aide d'une vis V le tube du microscope. Les objets opaques posés sur le porte-objet P sont éclairés à l'aide d'une lentille convergente H ajustée latéralement. Sur les objets transparents on concentre la lumière diffuse du jour par un miroir concave M fixé au pied de l'instrument, au-dessous du porte-objet.

Puissance d'un microscope. — La puissance d'un microscope est l'angle P sous lequel on voit à travers le microscope l'unité de longueur d'un objet (1 millimètre).

L'angle sous lequel on verra un petit objet AB à travers un microscope sera AB . P; d'autre part, cet angle est aussi celui sous lequel on voit l'image A'B' à travers l'oculaire ou A'B' . p, en désignant par p la puissance de l'oculaire.

$$\text{On a donc } AB . P = A'B' . p$$

$$\text{ou } P = \frac{A'B'}{AB} . p = g . p$$

en représentant par g le rapport $\frac{A'B'}{AB}$ qu'on peut appeler le grossissement de l'objectif.

La puissance du microscope est le produit du grossissement de l'objectif par la puissance de l'oculaire.

Mesure expérimentale de la puissance d'un microscope. — On adapte au microscope une chambre claire formée d'une combinaison d'un miroir plan et d'un prisme à réflexion totale (fig. 597).

Le prisme à réflexion totale est un prisme rectangle P (655) dont l'hypoténuse réfléchit les traits d'une règle D divisée en millimètres. Un miroir M fixé au-dessus de l'oculaire et parallèle à la face hypoténuse du prisme réfléchit une seconde fois les traits de la règle divisée. Ce miroir est percé d'un trou à son centre et laisse passer les rayons d'une plaque de verre m divisée en centièmes de millimètres

ou micromètre placé sur le porte-objet. L'œil reçoit dans la même direction et voit à la distance Δ de la vision distincte : 1° la règle D par la chambre claire ; 2° l'image du micromètre à travers le microscope. Supposons que K divisions du micromètre couvrent N millimètres de la règle.

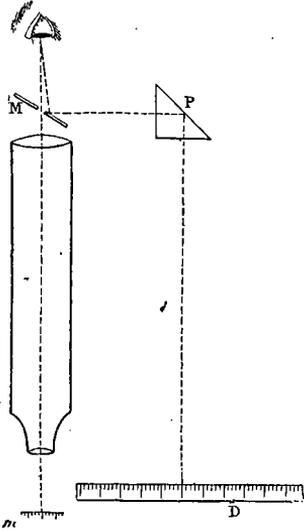


Fig. 597.

Les N millimètres de la règle sont vus sous l'angle $\frac{N}{\Delta}$.

P étant l'angle sous lequel on voit un millimètre à travers le microscope.

Les K divisions du micromètre sont vues sous l'angle $\frac{K}{100} \cdot P$.

Ces deux angles sont égaux puisque les divisions du micromètre et de la règle se recouvrent

$$\frac{K}{100} P = \frac{N}{\Delta}$$

on déduit de là P.

Grossissement du microscope. — C'est le rapport des *diamètres apparents de l'image et de l'objet*, vus tous deux à la distance de la vision distincte de l'observateur. L'angle sous lequel on voit à travers le microscope une petite dimension h d'un objet est Ph ;

à l'œil nu on voit h sous l'angle $\frac{h}{\Delta}$,

le rapport de ces deux angles est $\frac{Ph}{\frac{h}{\Delta}} = P\Delta = G$;

le grossissement diminue avec la distance de la vision distincte ; l'accroissement de diamètre apparent par l'emploi du microscope est en effet *relativement moindre* pour une vue myope que pour une vue normale.

Pour le microscope, comme pour la loupe, le grossissement est encore le rapport de grandeur de l'image et de l'objet.

$$G = \frac{A''B''}{AB} = \frac{A''B''}{A'B'} \cdot \frac{A'B'}{AB} = g \cdot g'$$

en appelant g et g' les grossissements de la loupe et de l'objectif.

Détermination de la grandeur d'un objet. — Supposons qu'un objet placé sur le porte-objet et vu à travers la chambre claire couvre N' divisions de la règle D : sa longueur x sera donnée par $x G = N'$.

Il n'est pas nécessaire de connaître G pour obtenir la grandeur d'un objet. Plaçons en effet sur le porte-objet un micromètre divisé en centièmes de millimètres et au foyer de l'oculaire un micromètre divisé en dixièmes de millimètres. Si K divisions du micromètre objectif couvrent n divisions du micromètre oculaire, une division du micromètre oculaire correspondra à

une longueur $\frac{K}{100} \frac{1}{n}$ placée sur le porte-objet.

Un objet placé sur le porte-objet et couvrant n' divisions du micromètre oculaire aura pour grandeur en millimètres :

$$\frac{K}{100} \cdot \frac{n'}{n}$$

Champ du microscope. — Le champ d'un microscope est l'espace angulaire dans lequel sont compris tous les points visibles à travers l'oculaire. Un point A ne peut être vu que si le faisceau qui a pour

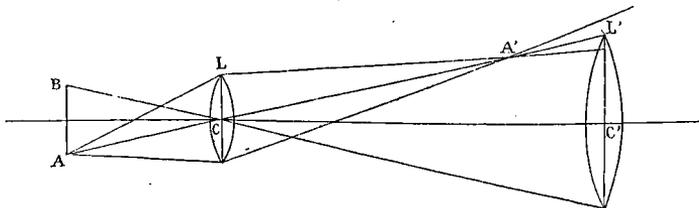


Fig. 598.

base l'objectif et pour sommet A' foyer conjugué de A , vient rencontrer l'oculaire. Ce cône est de très petit angle, vu le petit diamètre de l'objectif; en le supposant réduit à son axe, on regardera comme visible tout point A dont l'axe secondaire CA , par rapport à l'objectif, rencontre l'oculaire (fig. 598). Le champ a ainsi pour mesure, dans un plan qui passe par l'axe CC' du système optique, l'angle des axes secondaires extrêmes qui peuvent rencontrer l'oculaire, $\frac{2C'L'}{CC'}$.

Le faisceau réfracté de sommet A' ne rencontrant que partiellement l'oculaire, le point A sera vu moins éclairé que les points de l'objet situés sur l'axe du microscope. On évite ces différences d'éclat en plaçant dans le plan focal principal de l'oculaire qui diffère très peu du plan conjugué de l'objet, un mince disque de laiton noir percé d'une ouverture circulaire qui a son centre sur l'axe CC' (fig. 599). Le rayon $D\alpha$ de ce diaphragme doit intercepter les faisceaux qui ne rencontreraient que partiellement l'oculaire.

Pour déterminer ce rayon, dans un plan qui passe par l'axe CC' , nous menons une droite GH du bord inférieur de l'objectif au bord supérieur de l'oculaire; le point α où cette droite rencontre le plan focal limite l'ouverture

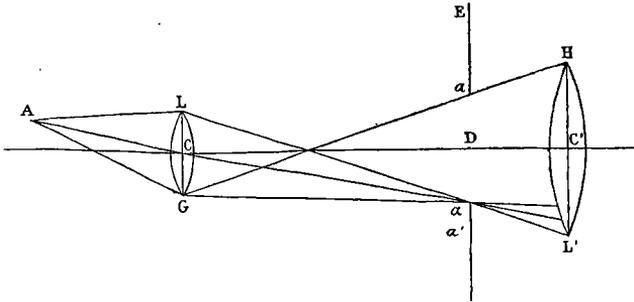


Fig. 599.

du diaphragme. Il est visible par le tracé que le faisceau d'axe secondaire C_α rencontre en entier l'oculaire et que c'est un axe secondaire extrême, car tout autre axe secondaire plus écarté, tel que $C_{\alpha'}$, est l'axe d'un faisceau qui ne rencontre l'oculaire que partiellement.

Le champ de pleine lumière est donc limité par un cône dont le sommet est au centre optique de l'objectif et dont la base est l'ouverture du diaphragme.

Cercle oculaire. — Un rayon lumineux peut être considéré comme partant d'un point quelconque de sa direction; d'après cela, tout rayon qui a traversé l'objectif peut être supposé partir de sa surface, et, s'il traverse aussi l'oculaire, il passe par l'image de l'objectif donnée par l'oculaire. Cette image est appelée *cercle oculaire*. C'est là que se croisent après leur sortie de l'oculaire tous les rayons qui ont traversé l'objectif, et c'est là qu'il faut mettre l'œil pour embrasser tout le champ du microscope⁽¹⁾. Vu le petit diamètre de l'objectif, ce cercle oculaire est très petit, plus petit que le diamètre de la pupille.

LUNETTE ASTRONOMIQUE

742. La lunette astronomique, destinée à l'observation d'objets très éloignés, en donne des images virtuelles, vues sous un diamètre apparent plus grand que celui de l'objet.

(1) Dans le cas d'un oculaire simple de petite distance focale, le cercle oculaire occupe sensiblement le foyer de l'oculaire.

Cet instrument est formé des mêmes éléments que le microscope : un objectif et un oculaire, tous deux convergents et ayant même axe principal. L'objectif L , à large surface et à long foyer, est achroma-

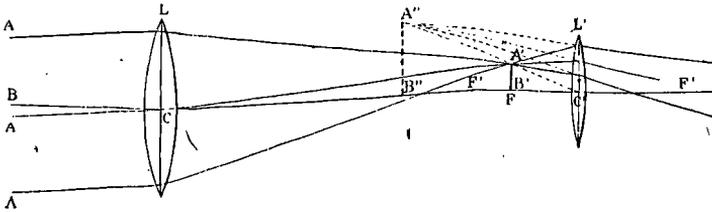


Fig. 600.

tique (719) (crown convergent, flint divergent) ; à cause de l'éloignement des objets, il donne un peu au delà de son premier foyer principal F , une image $A'B'$, réelle et renversée d'un objet AB . L'oculaire L' , à court foyer, fonctionne comme une loupe et fournit de l'image $A'B'$ une image virtuelle et agrandie $A''B''$. Cette nouvelle image est droite par rapport à la première image et renversée par rapport à l'objet (fig. 600).

Construction des images. — La construction graphique des images se fait comme dans le cas du microscope.

L'objet, s'il est très éloigné, ne peut être indiqué que par l'angle AOB des axes secondaires de ses extrémités. Les intersections de ces axes secondaires avec le plan focal limitent l'image $A'B'$.

Marche des rayons. — Un point A de l'objet envoie sur l'objectif L un cône de rayons qui se transforme après réfraction en un nouveau faisceau conique convergeant en un point A' sur l'axe secondaire AC . La seconde nappe de ce faisceau conique part de A' , rencontre l'oculaire L' , et, après réfraction, offre un cône divergent ayant son sommet A'' sur l'axe secondaire $A'C'$ (fig. 600).

Mise au point. — L'image $A''B''$ doit être observée à la distance minimum de la vision distincte.

L'objet étant très éloigné, son image se forme à une distance à peu près fixe de l'objectif, sensiblement en F , et pour la mise au point on déplace l'oculaire seul par rapport à l'objectif. L'objectif est fixé dans une monture qui se visse à l'extrémité d'un large tube cylindrique de laiton (fig. 604) ; à l'autre extrémité de ce tube glisse à frottement un autre tube plus étroit qui porte l'oculaire.

La mise au point est faite pour une vue infiniment longue lorsque

l'objet A'B' est au foyer de l'oculaire ; pour une vue myope, l'image A'B' doit se trouver entre l'oculaire et son foyer, d'autant plus près de l'oculaire que la vue est moins longue. Il faut dans ce cas *enfoncer* l'oculaire pour le rapprocher de l'image.

Grossissement de la lunette astronomique. — C'est le rapport du diamètre apparent d'un astre vu dans la lunette au diamètre apparent de cet astre vu directement.

Pour la vision de l'image, nous supposons le centre optique de l'œil et le centre optique de l'oculaire confondus. Pour la vision directe de l'astre, à cause de l'éloignement, le centre optique de l'œil peut être supposé placé aussi bien au centre optique de l'objectif qu'au centre optique de l'oculaire.

D'après cela, le grossissement est $G = \frac{A'CF}{ACB} = \frac{A'CF}{A'CF}$ ou comme ces angles sont très petits et peuvent être remplacés par leurs tangentes,

$$G = \frac{\frac{A'F}{C'F}}{\frac{A'F}{CF}} = \frac{CF}{C'F} = \frac{F}{f}$$

en désignant par F la distance focale de l'objectif et par f la distance focale de l'oculaire.

Dans le cas d'un objet infiniment éloigné (image au foyer de l'objectif) et d'une vue infiniment longue (image au foyer de l'oculaire), A'B' se forme en F qui est alors à la fois le foyer de l'objectif et le foyer de l'oculaire.

L'expression $\frac{F}{f}$, indépendante de la vue de l'observateur, peut être considérée comme caractérisant l'instrument.

Ce grossissement est d'autant plus grand que la distance focale de l'objectif est plus grande et que la distance focale de l'oculaire est plus petite. Il n'est pas possible d'employer des oculaires très convergents à cause des aberrations (691). Aussi prend-on des objectifs de grande distance focale, ce qui donne à l'instrument une grande longueur. Le diamètre de l'objectif croît avec sa distance focale, afin d'admettre une grande quantité de lumière et augmenter l'éclat de l'image.

Mesure expérimentale du grossissement. — La mesure du grossissement $\frac{F}{f}$ repose sur la considération du cercle oculaire ou de l'image de l'objectif donnée par l'oculaire.

Nous allons voir que le grossissement $\frac{F}{f}$ est égal au rapport des diamètres de l'objectif et du cercle oculaire.

Désignons par R le rayon de l'objectif, par r le rayon du cercle oculaire. La lunette étant ajustée pour des objets très éloignés et une vue infiniment longue, $OC = F + f$.

Pour construire l'image de R à travers l'oculaire menons l'axe secondaire de l'extrémité de l'objectif et un rayon issu de ce point passant par le foyer de l'oculaire et sortant parallèlement à l'axe.

Nous formons deux triangles, rectangles en O et en C , ayant en F un angle aigu égal comme opposé par le sommet (fig. 601).

La similitude de ces deux triangles nous donne :

$$\frac{R}{r} = \frac{F}{f}$$

Le grossissement limite $\frac{F}{f}$ est donc égal à $\frac{R}{r}$.

On reçoit le cercle oculaire sur un micromètre m divisé en dixièmes de millimètre que l'on regarde avec une loupe l ; le nombre de divisions couvertes par le cercle oculaire représente $2r$ (fig. 602).

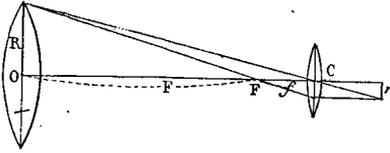


Fig. 601.

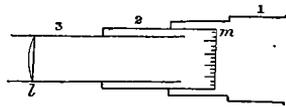


Fig. 602.

On applique d'autre part sur l'objectif les pointes d'un compas qu'on ouvre jusqu'à ce que leurs images limitent un diamètre de l'anneau oculaire. Les deux pointes portées sur une règle divisée feront connaître le diamètre $2R$ de la partie de l'objectif dont l'image forme l'anneau oculaire.

Expression pratique du grossissement. — La valeur $\frac{F}{f}$ est une valeur limite du grossissement. Habituellement, on observe l'image à la distance minimum de la vision distincte.

Si nous supposons en outre qu'il s'agit d'un objet qui n'est pas infiniment éloigné (fig. 600),

$$G = \frac{A''C'B''}{ACB} = \frac{A'B'}{C'B'} = \frac{CB'}{C'B'} = \frac{p_1}{d}$$

p_1 désigne la distance de l'image $A'B'$ à l'objectif; d est la distance de l'oculaire à laquelle $A'B'$ doit se former pour que l'image définitive $A''B''$ soit vue par l'observateur à la distance minimum Δ de la vision distincte. D'après l'équation aux foyers conjugués de la loupe (740), d et Δ sont liés par la relation

$$\frac{1}{d} - \frac{1}{\Delta} = \frac{1}{f} \quad \text{d'où} \quad \frac{1}{d} = \frac{1}{\Delta} + \frac{1}{f}$$

$$\text{et } G = p_1 \left(\frac{1}{\Delta} + \frac{1}{f} \right)$$

le grossissement de la lunette est égal au produit de la distance de l'image à l'objectif par la puissance de l'oculaire. Dans le cas d'un astre

$$p_1 = F \quad \text{et} \quad G = F \left(\frac{1}{\Delta} + \frac{1}{f} \right)$$

Pour un fort grossissement, $\frac{F}{\Delta}$ est négligeable par rapport à $\frac{F}{f}$ à cause de la petitesse de f .

Champ. — Comme dans le microscope, on peut définir le champ : l'angle des axes secondaires issus du centre de l'objectif et s'appuyant sur le contour de l'oculaire.

Pour ne recevoir que des images uniformément éclairées, la lunette astronomique est munie d'un *diaphragme* qui se place dans le plan où se forme l'image réelle donnée par l'objectif. L'ouverture du diaphragme est déterminée, comme dans le microscope, par l'intersection du plan focal avec une droite qui joint les extrémités opposées de deux diamètres parallèles de l'objectif et de l'oculaire; le diaphragme ne laisse tomber sur l'oculaire que les faisceaux qui peuvent y arriver en totalité. Le champ de la lunette est alors la nappe extérieure d'un cône qui a son sommet au centre optique de l'objectif et dont la base est le cercle d'ouverture du diaphragme (fig. 599).

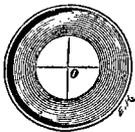


Fig. 603.

Réticule. — Le réticule est l'ensemble de deux fils croisés très fins tendus dans le plan focal de l'objectif⁽¹⁾ (fig. 603). L'image et le réticule sont vus distinctement en même temps. L'image paraît coupée par une croix noire très fine.

Axe optique. — Une lunette astronomique peut servir non seulement à observer des objets éloignés, mais aussi à fixer leur direction.

(1) Sur le diaphragme.

La ligne de visée est l'*axe optique* : c'est une ligne joignant dans la lunette le centre optique de l'objectif au point de croisement des deux fils du réticule. En déplaçant latéralement le point de croisement des fils du réticule, on déplace l'axe optique jusqu'à ce qu'il coïncide avec l'axe géométrique de l'instrument. Quand on vise une étoile, on tourne la lunette autour d'un centre fixe de manière à amener l'image à se former au point de croisement des fils du réticule ; cela revient à faire coïncider l'axe optique de l'instrument et l'axe secondaire de l'étoile ou la direction menée du centre optique de l'objectif à l'astre. Pour viser une deuxième étoile, on fait de nouveau tourner la lunette, et on fait coïncider à son tour avec l'axe optique l'axe secondaire de cette deuxième étoile. Le déplacement angulaire de l'axe géométrique de la lunette mesure l'angle des deux positions de l'axe optique ou l'*angle des axes secondaires* des deux astres.

Chercheur. — On accroît le grossissement en augmentant F et en diminuant f . En diminuant f , on diminue nécessairement le dia-

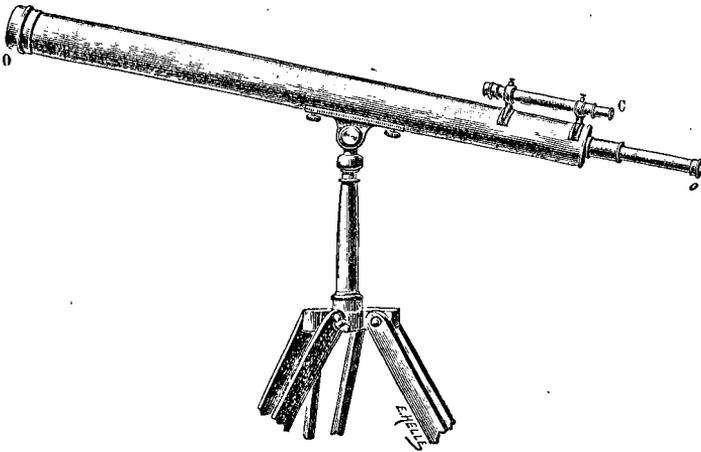


Fig. 604.

mètre de l'oculaire⁽¹⁾. L'augmentation de F et la diminution du diamètre de l'oculaire réduisent l'angle du cône qui a pour sommet le centre de l'objectif et s'appuie sur l'oculaire. *Le champ devenant très petit pour un fort grossissement*, il devient difficile d'amener dans le champ de l'instrument un astre déterminé que ses relations de posi-

(1) Pour que les aberrations de sphéricité ne soient pas trop fortes, le diamètre d'une lentille ne doit pas dépasser la moitié de la distance focale (691).

tion avec les astres voisins ne font plus reconnaître. La lunette astronomique est alors munie d'un *chercheur* C, petite lunette ayant un réticule, de faible grossissement et de champ étendu (fig. 604). Le chercheur permet de distinguer un astre par sa situation dans l'ensemble des astres qu'il laisse voir à la fois ; on le vise et on amène son image au centre du réticule du chercheur. Un réglage antérieur ayant établi le parallélisme des axes optiques de la grande lunette et du chercheur, l'astre se trouvera sensiblement au centre du réticule de la grande lunette ; un petit mouvement de la lunette l'y amènera exactement.

Position de l'œil. — Tous les rayons qui ont traversé à la fois l'objectif et l'oculaire passent par le cercle oculaire ; c'est dans ce plan que les faisceaux qui ont traversé l'objectif présentent la plus petite section par un plan perpendiculaire à l'axe. L'œil placé au cercle oculaire recevra tous ces rayons et embrassera tout le champ de l'instrument si, comme cela arrive avec les lunettes de fort grossissement, l'ouverture de la pupille est plus grande que le cercle oculaire. Le tube porte-oculaire se prolonge au delà de l'oculaire et se termine par une plaque percée d'une ouverture appelée *œilleton* dont la position correspond au cercle oculaire ; c'est contre ce trou qu'on applique l'œil. L'œilleton est situé un peu au delà du foyer de l'oculaire ; il est *exactement au foyer*, si l'objectif est très éloigné de l'oculaire.

743. Lunettes viseurs. — Pour viser à des distances diverses, on se sert fréquemment de lunettes construites comme la lunette astronomique, mais d'un plus faible grossissement.

Les images se forment à des distances variables de l'objectif, suivant la position de l'objet ; l'ensemble du diaphragme et de l'oculaire est porté par un tube qu'on déplace à l'aide d'une crémaillère (fig. 284 et 311). L'oculaire est lui-même mobile dans ce dernier tube : on commence par l'enfoncer ou le reculer de manière à voir distinctement les bords du diaphragme. Cela fait, on déplace ensemble le diaphragme et l'oculaire jusqu'à amener le diaphragme et le réticule dans le plan de l'image.

Comme nous l'avons vu pour la lunette astronomique, le grossissement a pour expression $G = p_1 \left(\frac{1}{\Delta} + \frac{1}{f} \right)$.

Le *grossissement* se détermine en adaptant à la lunette L une chambre claire à l'aide des vis v (fig. 605) et en comparant à une mire divisée A à traits également espacés vue directement, l'image de cette

mire A' vue à travers la lunette. Les rayons venant de la mire sont vus directement après deux réflexions en M et en m sur les deux miroirs parallèles de la chambre claire. L'œil voit en même temps, à

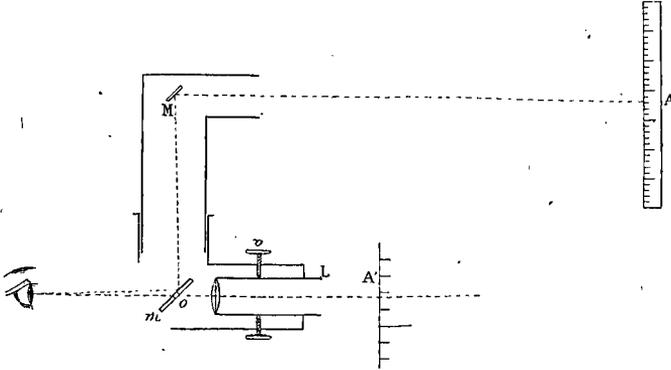


Fig. 605.

travers la lunette, l'image de la mire. Si n divisions vues dans la lunette recouvrent N divisions vues directement, les n divisions grossies se présentent sous le même angle que les N divisions directes :

$$nG = N, \quad \text{d'où} \quad G = \frac{N}{n}.$$

744. Lunette terrestre. — Les images données par la lunette astronomique sont renversées : cela est indifférent pour l'astronome. Dans l'observation des objets terrestres, il convient de redresser l'image réelle $A'B'$ donnée par l'objectif. On réalise ce redressement de plusieurs façons dans la lunette terrestre.

Une seule lentille L pourrait suffire. φ étant la distance focale de

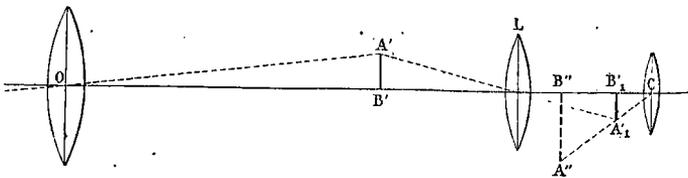


Fig. 606.

cette lentille, on pourrait la placer à une distance 2φ de l'image réelle $A'B'$: cette image serait reproduite en A_1B_1 , égale à $A'B'$, de l'autre côté de la lentille L à la même distance 2φ . Cette image redressée

serait enfin observée avec l'oculaire. La longueur de la lunette est ainsi accrue de 4φ (fig. 606).

On obtient le même résultat avec deux lentilles convergentes L_1 et L_2 de même distance focale φ ; le deuxième foyer principal de la lentille L_1 coïncide avec le plan de l'image $A'B'$; cette lentille réfracte les

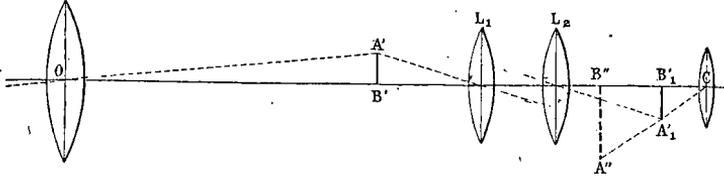


Fig. 607.

rayons venant de chaque point A' en les rendant parallèles à l'axe secondaire de ce point; la deuxième lentille L_2 recevant ces rayons parallèles les fait converger dans son premier plan focal en A_1 à la distance φ ; l'intervalle des deux lentilles L_1 et L_2 est quelconque et pourrait être très réduit sans changement pour la grandeur de l'image (fig. 607).

Avec la première et la deuxième forme du système redresseur, le grossissement est le même qu'avec une lunette astronomique ayant même objectif et même oculaire; il a pour expression :

$$\frac{F}{d} \quad \text{ou} \quad F \left(\frac{1}{\Delta} + \frac{1}{f} \right).$$

Ces deux solutions donnant à la lunette une trop grande longueur, on procède souvent autrement. Une première lentille L_1 , de distance focale φ_1 , est placée à une distance de $A'B'$ inférieure à φ_1 , ce qui fournit une image vir-

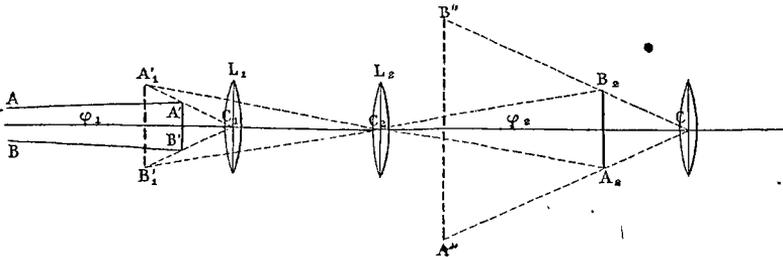


Fig. 608.

tuelle, agrandie A_1B_1 , encore renversée de l'objet; une lentille L_2 , de distance focale φ_2 , est placée à une distance de l'image A_1B_1 assez grande pour en donner une image A_2B_2 réelle et renversée, redressée par rapport à $A'B'$.

L'image A_2B_2 est observée avec l'oculaire, qui en donne une image virtuelle $A''B''$ (fig. 608).

$$\text{Le grossissement est } \frac{A''CB''}{A'OB'} = \frac{\frac{A_2B_2}{d}}{\frac{A'B'}{F}} = \frac{A_2B_2}{A'B'} \cdot \frac{F}{d}$$

$$\text{ou } \frac{A_2B_2}{A'B'} F \left(\frac{1}{\Delta} + \frac{1}{f} \right).$$

745. Oculaires. — Dans le microscope composé et dans la lunette astronomique, on emploie des oculaires *composés* formés de deux lentilles convergentes séparées par un petit intervalle; les oculaires augmentent le champ sans réduire le grossissement et ils corrigent les irisations que présente l'image réelle qu'ils grossissent.

746. Lunette de Galilée. — La lunette terrestre est notablement plus longue qu'une lunette astronomique de même grossissement; en outre, des pertes notables de lumière ont lieu par réflexion à la surface des lentilles du système redresseur. Dans la lunette de Galilée, le redressement est réalisé avec une seule *lentille divergente* qui sert en même temps d'oculaire. Cette lunette est un peu plus courte qu'une lunette astronomique de même grossissement.

Construction des images. — La lunette de Galilée comprend un objectif convergent achromatique à long foyer L et un oculaire divergent L' , montés aux deux extrémités d'un tube métallique; les axes

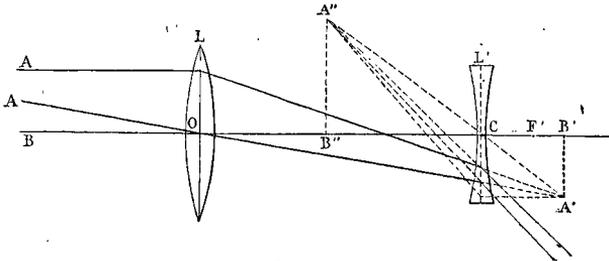


Fig. 609.

principaux des deux lentilles coïncident. L'objectif donnerait en $A'B'$ une image réelle et renversée d'un objet AB , si les rayons convergents qui se rendent en $A'B'$ ne rencontraient sur leur trajet la lentille divergente L' (fig. 609).

D'après l'étude des lentilles divergentes recevant des rayons convergents (684), l'image donnée par la lentille divergente peut être réelle ou virtuelle. Elle est virtuelle si l'image $A'B'$ tend à se former

au delà du deuxième plan focal F' de la lentille divergente. On réalise cette condition en rapprochant la lentille divergente de l'objectif jusqu'à ce qu'on obtienne une image virtuelle $A''B''$ renversée par rapport à $A'B'$; elle est agrandie et redressée par rapport à l'objet.

Marche des rayons. — La figure 609 représente la marche des rayons pour le point A de l'objet. Le faisceau qui part d'un point A d'un objet très éloigné se compose de rayons parallèles à l'axe secondaire AO ; ce faisceau parallèle devient convergent après sa réfraction à travers l'objectif L ; le sommet du cône réfracté serait A' sans l'interposition de l'oculaire divergent L' ; cet oculaire réfracte à son tour le faisceau lumineux et le rend divergent; l'image virtuelle, c'est-à-dire le sommet des rayons prolongés est derrière la lentille en A'' .

Mise au point. — L'objet virtuel $A'B'$ est d'autant plus voisin du deuxième foyer F' que l'image $A''B''$ doit se faire plus loin de la lentille divergente; pour que l'image $A''B''$ se rapproche, $A'B'$ doit être éloigné du foyer, ce qui revient à enfoncer l'oculaire.

La mise au point se fait donc comme dans la lunette astronomique, en enfonçant d'autant plus l'oculaire que la vue est plus courte.

Grossissement. — Le grossissement est égal au rapport des diamètres apparents de l'image et de l'objet :

$$G = \frac{A''CB''}{AOB} = \frac{A'CB'}{A'OB'}$$

La petitesse des angles permet de confondre les angles et leurs tangentes :

$$G = \frac{\frac{A'B'}{CB'}}{\frac{A'B'}{OB'}} = \frac{OB'}{CB'}$$

OB' est sensiblement égal à la distance focale F de l'objectif, si l'objet AB est suffisamment éloigné.

$CB' = d$ est la distance à laquelle $A'B'$ doit être de l'oculaire pour que l'image définitive $A''B''$ apparaisse à la distance minimum de la vision distincte Δ .

$$\text{Donc } G = \frac{F}{d}$$

Dans le cas actuel, l'équation aux foyers conjugués de la lentille divergente est (684, 3°)

$$-\frac{1}{d} - \frac{1}{\Delta} = -\frac{1}{f},$$

$$\text{d'où } \frac{1}{d} = \frac{1}{f} - \frac{1}{\Delta}$$

$$\text{et } G = \frac{F}{f} - \frac{F}{\Delta}.$$

Le grossissement augmente avec la distance de la vision distincte Δ . d se réduit à f si f est très petit par rapport à Δ .

Le grossissement pour un objet très éloigné et une vue infiniment longue est $\frac{F}{f}$. La longueur de la lunette de Galilée ajustée pour ces conditions limites est $F - f$, tandis que la longueur de la lunette astronomique est $F + f$.

La mesure expérimentale du grossissement se fait pour la lunette terrestre et pour la lunette de Galilée comme pour la lunette viseur (743).

Cercle oculaire. — L'image de l'objectif à travers l'oculaire est virtuelle, elle est comprise entre l'objectif et l'oculaire ; tous les rayons lumineux qui ont traversé l'instrument passent par ce cercle oculaire qui forme comme dans la lunette astronomique la section la plus petite de l'ensemble des faisceaux par un plan perpendiculaire à l'axe, mais c'est une section des faisceaux prolongés derrière l'oculaire après leur émergence⁽¹⁾. On ne peut donc y placer l'œil ; on place l'œil le plus près possible de l'oculaire divergent.

Absence de réticule. — L'image des rayons réfractés par l'objectif ne se formant pas, on ne peut placer de réticule dans le plan de cette image pour l'observer en même temps qu'elle. Il n'y a donc pas d'axe optique et la lunette de Galilée ne peut servir à mesurer l'angle de deux directions.

Les jumelles de théâtre, les jumelles marines se composent de deux lunettes de Galilée assujetties parallèlement pour la vision binoculaire. On ne leur donne qu'un faible grossissement, pour ne pas trop diminuer le champ.

(1) Le grossissement limite $\frac{F}{f}$ est égal dans la lunette de Galilée au rapport des rayons de l'objectif et du cercle oculaire ; mais le cercle oculaire étant virtuel, il n'est pas possible de mesurer directement son rayon et d'obtenir ainsi le grossissement.

TÉLESCOPE DE NEWTON

747. Un télescope diffère d'une lunette en ce que l'image objective est fournie par un miroir concave au lieu de l'être par une lentille. Dans le télescope de Newton, un miroir sphérique concave M est fixé au fond d'un tube à parois noircies T, ouvert par l'autre extrémité, que l'on dirige vers un objet éloigné à observer.

Construction des images. — Les rayons d'un objet éloigné réfléchis par le miroir M formeront une image *réelle et renversée* ab entre le centre C et le foyer principal F du miroir, très près de ce foyer.

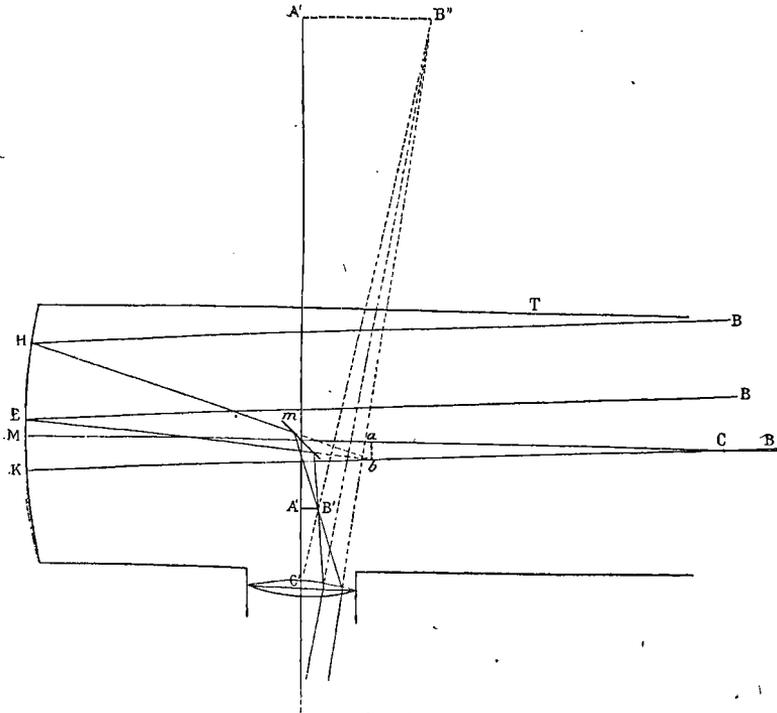


Fig. 610.

Sur le trajet des rayons réfléchis, entre le miroir concave et son foyer principal, est interposé un *miroir plan* m incliné à 45° , qui les réfléchit en $A'B'$, symétrique de ab , par rapport au miroir (617). Le miroir

plan m est ordinairement remplacé par la face hypoténuse d'un prisme rectangle isocèle en verre qui *réfléchit totalement* la lumière. L'image réelle $A'B'$, égale à l'image ab , est observée avec un *oculaire* C' qui en donne une image *virtuelle et agrandie* $A''B''$; le point B'' se trouve sur l'axe secondaire $B'C'$ (fig. 610).

Marche des rayons. — Les rayons lumineux issus d'un point éloigné situé sur un axe secondaire bC forment un faisceau BHBE de rayons parallèles à cet axe secondaire; par la réflexion sur le miroir concave, ce faisceau cylindrique est transformé en un faisceau conique dont le sommet serait b dans le plan focal principal. Ce faisceau, devenant divergent au delà de b , pourrait être observé par l'œil ou par un oculaire, mais le miroir plan m reçoit les rayons convergents avant leur réunion en b et les fait concourir après leur réflexion au point B' symétrique de b . Le faisceau réfléchi de sommet B' , devenu divergent au delà de B' , tombe sur l'oculaire et après réfraction semble venir de B'' .

Mise au point. — L'image $A''B''$ doit être vue à la distance minimum de la vision distincte. L'image fixe $A'B'$ doit être située entre le foyer de l'oculaire et l'oculaire et d'autant plus près de l'oculaire que la vue de l'observateur est plus courte; un myope doit *enfoncer* l'oculaire; l'oculaire est mobile dans un tube qui permet la mise au point.

Grossissement. $G = \frac{A'C'B'}{aCb}$;

à cause de la petitesse des angles,

$$\frac{A'C'B'}{aCb} = \frac{\frac{A'B'}{C'A'}}{\frac{ab}{Ca}} = \frac{Ca}{C'A'}$$

Si l'objet est très éloigné, son image se forme au foyer principal; $Ca = F$, $C'A' = d$ est la distance de l'oculaire à laquelle $A'B'$ doit se former pour que $A''B''$ soit reporté à la distance minimum de la vision distincte. $G = \frac{F}{d}$.

D'après l'équation de la loupe, $\frac{1}{d} = \frac{1}{\Delta} + \frac{1}{f}$.

$$G = F \left(\frac{1}{\Delta} + \frac{1}{f} \right)$$

Comme pour la lunette astronomique, le grossissement limite est $\frac{F}{f}$ (pour un objet infiniment éloigné et une vue infiniment longue).

Cercle oculaire. — Pour simplifier les constructions, nous supprimerons le miroir plan m , et nous supposerons l'oculaire au delà de l'image réelle ab fournie par le miroir concave.

Il y a un cercle oculaire : c'est l'image du miroir concave à travers l'oculaire. R étant le rayon de base du miroir, r le rayon du cercle oculaire, le grossissement limite $\frac{F}{f}$ est égal à $\frac{R}{r}$; le calcul se fait comme pour la lunette astronomique. L'œil doit être placé au cercle oculaire pour recevoir tous les rayons réfléchis par le miroir concave (en son symétrique par rapport à la surface m).

Champ. — Le champ est la nappe extérieure d'un cône ayant pour sommet l'oculaire ou plus exactement le diaphragme placé dans le plan focal. Le rayon du diaphragme est choisi de façon à intercepter les faisceaux qui ne rencontreraient que partiellement l'oculaire. Un réticule peut être tendu dans le plan du diaphragme. L'axe optique du télescope est la ligne qui joint le centre O du miroir au point de croisement des fils du réticule.

On augmente le grossissement $\frac{F}{f}$ en faisant croître F et en diminuant f (en diminuant f , on diminue aussi l'ouverture de l'oculaire) : ce sont deux conditions qui diminuent le champ. La faible étendue du champ dans le cas d'un fort grossissement rend nécessaire l'emploi d'un *chercheur*, petite lunette astronomique dont l'axe optique est parallèle à l'axe optique du télescope.

Avantages des télescopes. — Les télescopes ont l'avantage de présenter des images objectives *exemptes d'aberration de réfrangibilité*; on leur a pourtant longtemps préféré les lunettes astronomiques chez lesquelles la perte de lumière par transmission à travers l'objectif était plus faible. Les miroirs en bronze des télescopes n'avaient en effet qu'un pouvoir réflecteur de 0,6 environ et leur poli s'altérait par l'action de l'air. On les a remplacés par des miroirs en verre *argentés* sur leur surface concave, beaucoup plus légers et dont le pouvoir réflecteur atteint 0,95, ce qui rend les images du télescope aussi claires que celles de la lunette astronomique. Quand la surface argentée a été ternie, un nouveau polissage n'est pas nécessaire comme avec un miroir de bronze, on dissout simplement la couche d'argent et on en dépose une autre à la surface du verre, sans qu'un polissage vienne modifier la surface du verre.

En outre, dans le télescope, l'*aberration de sphéricité* est annulée pour les rayons parallèles à l'axe par l'emploi d'une surface parabolique qui les concentre exactement en son foyer (646). Dans ces conditions, les télescopes sont souvent employés pour l'observation des astres.

L'usage du télescope doit toutefois être rejeté pour les *observations solaires*, le miroir concave subissant par la chaleur des déformations qui enlèvent aux images leur netteté.

748. Télégraphie optique. — La construction des collimateurs (709) et des lunettes astronomiques (742) permet de comprendre aisément le principe de la télégraphie optique. Dans ce mode de communication (fig. 611), on installe à la station de départ un collimateur OL qui envoie un faisceau cylindrique de lumière. Ce faisceau

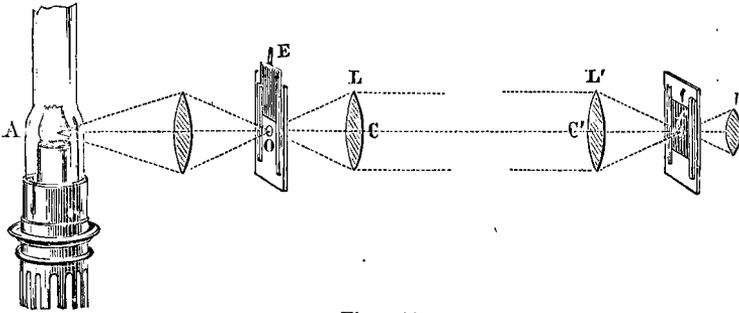


Fig. 611.

est observé à la station d'arrivée au foyer f d'une lunette L' qui a le même axe que le collimateur. Pour produire les signaux, on concentre avec une lentille sur la fente circulaire O d'un écran E les rayons d'une lampe A . Le faisceau conique qui part du point O est rendu cylindrique par la lentille L . L'axe du faisceau de départ est l'axe OC du collimateur; il coïncide avec l'axe $C'f$ de la lunette réceptrice. Par le jeu d'un obturateur qu'on manœuvre avec un levier, on découvre l'ouverture de l'écran E de manière à faire voir au foyer f de la lunette réceptrice des éclairs de durée longue ou brève et à reproduire ainsi les signaux de Morse (1001).

PHOTOGRAPHIE

749. Principe de la photographie. — Une chambre noire munie d'une lentille convergente enchâssée dans une ouverture du volet donne sur un écran une image réelle et renversée des objets qui sont situés à l'extérieur dans le plan conjugué de l'écran. La photo-

graphie permet de fixer les images dessinées par l'action de la lumière sur certains composés chimiques. Elle repose sur la propriété que possède la lumière de décomposer certains sels d'argent, tels que le chlorure, le bromure et l'iodure d'argent (708).

Opérations photographiques. — La photographie comprend deux opérations distinctes : 1° production d'une épreuve négative sur verre où les parties claires sont devenues noires et inversement ; 2° production d'épreuves positives sur papier où les clairs et les ombres reprennent leur ordre naturel.

Appareil photographique. — Un appareil photographique se

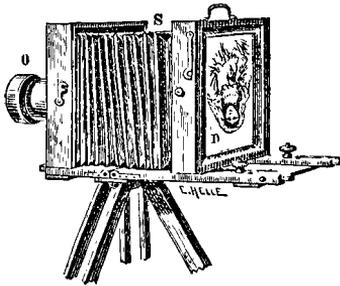


Fig. 612.

compose d'une chambre noire (fig. 612), munie d'un objectif O rendu achromatique pour que le foyer des rayons violets (rayons chimiques) coïncide avec le foyer des rayons jaunes. Le fond D est un écran translucide en verre dépoli, mobile. Les parois latérales de la chambre sont disposées en soufflet S, ce qui rend la chambre plus légère et permet un tirage étendu.

I. ÉPREUVE NÉGATIVE SUR VERRE

750. Mise au point. — Le photographe placé derrière le verre dépoli dirige l'axe principal de l'objectif vers la partie centrale de l'objet à reproduire, puis, en déplaçant le fond mobile de la chambre noire, il avance ou recule le verre dépoli jusqu'à ce que la netteté de l'image soit maximum (le verre dépoli se trouve alors dans le plan conjugué de l'objet par rapport à l'objectif).

La mise au point ayant été effectuée avec soin, on recouvre l'objectif avec un obturateur, et on substitue à l'écran dépoli une plaque de verre chimiquement sensible, placée dans un châssis, le côté sensible tourné vers l'objectif et protégé par un volet mobile.

La substance sensible déposée sur la plaque de verre introduite dans le châssis est du bromure d'argent tenu en suspension dans une substance visqueuse, la gélatine. Cette émulsion de **gélantino-bromure**

d'argent est attaquée par tous les rayons lumineux auxquels on l'expose, sauf par les rayons rouges.

Pose. — On soulève verticalement le volet qui recouvre la plaque au gélatino-bromure et qui glisse dans une rainure, et on écarte l'obturateur de l'objectif. Dans toutes les parties éclairées de l'image, la lumière agit sur le sel d'argent en mettant le métal en liberté; dans les demi-teintes, l'action est moins vive; et dans les ombres, elle est nulle. Quand le *temps de pose* est suffisant, on bouche l'objectif de la chambre noire avec son obturateur, et on recouvre la plaque sensible en rabattant le volet du châssis. Un temps de pose de quelques secondes est le plus souvent suffisant; avec des plaques extra rapides, ce temps peut être abaissé à une petite fraction de seconde.

Développement de l'image. — La plaque enfermée dans son châssis est emportée dans une salle qui n'est éclairée que par de la lumière rouge; là seulement on sort la plaque de son châssis; malgré l'action de la lumière, *rien n'est encore apparent*. On emploie alors pour *développer* l'image des substances réductrices énergiques, telles que des solutions d'oxalate de protoxyde de fer ou d'acide pyrogallique ou d'hydroquinone qui continuent la réduction du sel d'argent aux points qui avaient subi l'action de la lumière. La liqueur *révélatrice* ayant été versée dans une cuvette, on y plonge la plaque impressionnée, gélatine en dessus. Une image apparaît progressivement dans laquelle les parties éclairées par le modèle sont recouvertes d'un dépôt noir d'argent divisé, tandis que les noirs du modèle restent blancs. C'est l'*épreuve négative*.

Fixage. — Si on exposait alors la plaque à la lumière, elle noircirait sur toute la partie restée intacte. Il faut donc supprimer la sensibilité de la plaque à toute action lumineuse ultérieure, cela s'appelle *fixer* l'image. Pour cela, après avoir lavé la plaque et avant de la sortir de la salle obscure, on dissout le sel d'argent resté intact avec une solution d'hyposulfite de soude, ce qui rend transparentes d'une façon définitive les parties de l'épreuve où la lumière n'a pas agi. Quant au bromure réduit, il est devenu insoluble dans l'hypo-sulfite. On *lave* ensuite la plaque à grande eau pour éliminer toute trace d'hyposulfite et on la sèche.

Cliché négatif. — L'épreuve sur verre obtenue, regardée par transparence, laissera passer la lumière dans les parties de la plaque

qui correspondent aux régions noires de l'objet, tandis que les parties correspondantes aux blancs de l'objet seront noires, étant recouvertes d'argent réduit.

Le négatif va servir comme un véritable *cliché* à tirer autant d'épreuves positives qu'on voudra sans qu'on ait besoin de faire poser de nouveau le modèle.

II. EPREUVES POSITIVES SUR PAPIER

751. Les positifs se tirent sur papier. Dans un châssis dont le fond est en verre, on place l'épreuve négative et au-dessus une feuille de papier qui a été imprégnée de chlorure d'argent dans l'obscurité (dite *sensibilisée* au chlorure d'argent), le côté sensibilisé étant appliqué sur la couche impressionnée du cliché, et on expose le tout à la lumière du jour. La lumière traverse la plaque de verre dans les parties du négatif qui sont transparentes, noircit le papier chloruré en ces points tandis que le papier reste blanc sous les régions du négatif rendues opaques par l'argent réduit. On suspend l'exposition quand l'action de la lumière est suffisante (quand le positif est *bien venu*), puis on lave l'épreuve positive avec une solution d'hyposulfite qui *fixe* l'image en dissolvant le chlorure non réduit par la lumière.

On a ainsi une épreuve définitive dont les tons sont renversés par rapport à l'épreuve négative, et qui reproduit l'objet, *sauf la coloration*.

Cette épreuve positive est soumise à un lavage prolongé pour enlever toute trace d'hyposulfite, puis séchée. Cette formation d'épreuves positives peut être indéfiniment répétée puisque le cliché n'est pas altéré.

Applications. — 1° Calculer la puissance d'une loupe dont la distance focale est 2 centimètres et l'angle sous lequel elle fera voir 1 millimètre.

2° Les distances focales d'un microscope composé étant 5 millimètres pour l'objectif et 20 millimètres pour l'oculaire, l'objet étant placé à $5^{mm}1$ et la distance minimum de la vision distincte de l'observateur étant 20 centimètres, calculer l'angle sous lequel on verra 1 millimètre.

3° Calculer le grossissement linéaire et le grossissement en surface avec les mêmes données.

4° Sur l'axe principal d'une loupe dont la distance focale est 1 centimètre, on place un objet. A quelle distance du foyer doit-il se trouver pour un observateur dont l'œil, placé au foyer, est accommodé pour voir à 25 centimètres?

5° Le *punctum remotum* d'un œil myope est à 20 centimètres de cet œil. Quel est le numéro de la lentille capable de corriger cette myopie?

6° Le *punctum remotum* d'un œil est à 0^m80. son *punctum proximum* est à 0^m15;

quelle est la puissance en dioptries d'une lentille convergente qui produirait le même effet que l'accommodation ?

7° Deux loupes ont séparément pour distance focale 5 millimètres et 7 millimètres ; on les accole. En négligeant leurs épaisseurs, quelle est la puissance pour un millimètre du système ainsi formé ?

8° On regarde le Soleil avec une lunette astronomique dont l'objectif a une distance focale de 70 centimètres et l'oculaire une distance focale de 4 centimètres. Le diamètre apparent du Soleil vu directement étant $32'$, quel est le diamètre apparent de l'image ?

9° Avec une lunette astronomique primitivement réglée pour voir à l'infini, on doit écarter l'oculaire de 4 centimètres pour voir nettement un objet placé à 5 mètres. Quelle est la distance focale de l'objectif ?

10° Un observateur, dont la distance de la vision distincte est 40 centimètres, vise avec une lunette astronomique un objet distant de l'objectif de 50 mètres. Les longueurs focales de l'objectif et de l'oculaire étant respectivement 1 mètre et 2 centimètres, quelle est la longueur qui sépare l'objectif de l'oculaire ?

11° L'oculaire d'une lunette astronomique ayant une distance focale de 1 centimètre, on dirige la lunette astronomique vers un objet très éloigné, puis on donne à l'oculaire deux positions différentes : dans l'une, l'image est définitive et virtuelle et à 20 centimètres de l'oculaire ; dans l'autre, elle est réelle et à la même distance. Quel est le déplacement de l'oculaire de l'une à l'autre de ces positions ?

12° La distance focale de l'objectif d'un microscope est $\frac{1}{2}$ centimètre, la distance focale de l'oculaire est 1 centimètre. La distance minimum de la vision distincte de l'observateur étant 12 centimètres, quelle doit être la distance entre l'objectif et l'oculaire quand l'objet est à 5,2 millimètres de l'objectif ?

13° Trouver le grossissement d'un télescope pour un objet placé à 51 mètres et une vue accommodée à 25 centimètres, l'œil étant placé au foyer de l'oculaire. Distance focale du miroir concave $F = 1$ mètre ; distance focale de l'oculaire $f = 1$ centimètre.

14° Le rayon de base de la partie efficace du miroir concave d'un télescope est de 4 centimètres, et le rayon du cercle oculaire est $0^{\text{mm}},3$. Sachant que la distance focale du miroir concave est 1 mètre, calculer la distance focale f de l'oculaire.

HISTORIQUE

752. Vitesse de la lumière. — Elle a d'abord été mesurée par des procédés astronomiques par *Rœmer* en France et *Bradley* en Angleterre au XVII^e siècle. *Fizeau*, en 1849, imagina une méthode qui lui permit de mesurer le temps que met la lumière à parcourir une distance de 17 kilomètres. *Foucault*, en 1850, parvint à mesurer le temps de la propagation de la lumière pour une longueur de quelques mètres.

Réflexion. — Les miroirs métalliques plans furent connus à une époque très ancienne ; il en est de même des miroirs concaves, employés comme miroirs ardents ; les lois de la réflexion de la lumière sont formulées dans un ouvrage d'*Euclide* (300 av. J.-C.).

Réfraction. — *Ptolémée* d'Alexandrie (70-147) paraît avoir reconnu que pour de petits angles d'incidence, il y a proportionnalité entre l'angle d'incidence et l'angle de réfraction. Cette loi permit à *Képler* d'établir la théorie

physique de l'œil, la théorie des lentilles et le fonctionnement de la lunette astronomique (1611). C'est à *Descartes* que l'on doit la loi exacte de la réfraction : il en a déduit l'explication de l'arc-en-ciel.

Instruments d'optique. — L'usage des besicles remonte au XIII^e siècle, mais la connaissance des propriétés des lentilles ne fut bien acquise qu'après les travaux de *Galilée* et de *Képler*. Vers 1570, *Porta* fit usage de lentilles biconvexes pour obtenir dans la chambre noire des images nettes des objets extérieurs. La lunette et le microscope composé, construits à la fin du XVI^e siècle, sont attribués à *Zaccharias Janssen*, fabricant de besicles à Middelbourg. Mais c'étaient des instruments encore très imparfaits; ce n'est qu'après la découverte des lentilles achromatiques par l'opticien anglais *Dollond*, en 1757, et après de nouveaux progrès dans la fabrication des verres, que la lunette et le microscope ont été amenés à la perfection que nous leur connaissons.

L'appareil de projection, ou lanterne magique, est dû au *P. Kircher* (1645).

Les miroirs ayant été fabriqués bien avant les lentilles, les télescopes avaient précédé les lunettes. *Newton*, en 1668, construisit un télescope qui est resté le type des appareils modernes. *Foucault* a remplacé le miroir métallique par un miroir de verre argenté et le miroir sphérique par un miroir parabolique.

Dispersion. — Depuis longtemps, on avait observé les couleurs irisées que les rayons solaires donnent par leur passage à travers un prisme de verre. Vers 1670, *Newton* déduisit de ce phénomène que la lumière blanche résulte de la superposition de rayons colorés de diverses réfrangibilités. Au commencement du XIX^e siècle, l'opticien *Fraunhofer*, en faisant usage d'instruments qu'il avait construits avec une grande perfection, fit connaître les raies du spectre solaire. L'analyse spectrale est due à *Kirchhoff* et *Bunsen* (1850), l'explication des raies solaires à *Kirchhoff*.

Photographie. — La découverte de la photographie résulte des travaux de *Niepce* et de *Daguerre*. L'action de la lumière sur les sels d'argent était connue à la fin du XVIII^e siècle; mais c'est *Nicéphore Niepce* qui produisit le premier, en 1814, une épreuve photographique permanente. En 1839, le problème de la reproduction des objets avec leurs couleurs a été résolu par *Lippmann*. En 1895, l'étude des radiations obscures émises par les tubes de *Crookes* et la découverte de la transparence pour ces radiations d'un grand nombre de corps opaques (étoffes, cuir, muscles) a permis d'étendre les applications de la photographie (photographie du squelette à travers les muscles et les viscères, etc.).

ÉLECTRICITÉ STATIQUE

PHÉNOMÈNES GÉNÉRAUX

753. **Électrisation par le frottement.** — Un bâton de *verre* ou de *résine* tenu à la main et frotté avec une étoffe de laine, attire les corps légers : barbes de plume, fragments de papier, feuilles d'or (fig. 613). L'attraction diminue quand la distance augmente. Cette propriété attractive ayant été observée d'abord par les Grecs sur

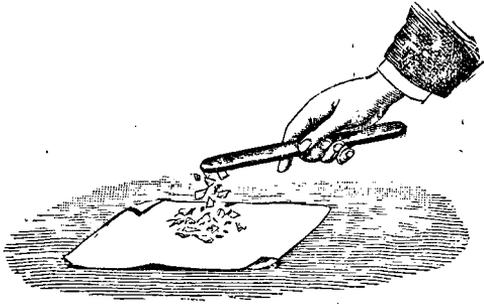


Fig. 613.

l'ambre qu'ils nommaient *électron*, on appelle *électrique* l'état dans lequel se trouve le corps frotté, et *électricité* la cause de cet état. Le verre et la résine frottés sont dits *électrisés*.

754. **Bons conducteurs et mauvais conducteurs.** — Tous les corps sont électrisables par le frottement, mais ils se distinguent en *bons* et *mauvais conducteurs* d'après la facilité avec laquelle ils propagent la propriété attractive.

Sur les mauvais conducteurs tels que le verre, la résine, la propriété électrique reste *localisée aux points frottés* qui attirent seuls les corps légers.

Sur les corps dits bons conducteurs ou simplement conducteurs, tels que les métaux, le corps humain, le sol, la propriété électrique

ne se limite pas aux points frottés, mais *se communique immédiatement à toute leur étendue*.

L'électricité d'un mauvais conducteur ne peut être enlevée que si on touche les points mêmes où elle a été développée. L'électricité d'un bon conducteur disparaît si on le met en communication avec le sol en un quelconque de ses points. Pour la commodité du langage, on assimile l'électricité à un fluide, et on dit qu'elle *se répand* sur un conducteur et qu'elle *s'écoule dans le sol*.

755. Isolants. — Un bon conducteur électrisé doit être entouré par de mauvais conducteurs pour conserver ses propriétés électriques. Un cylindre de métal supporté par une colonne de verre se trouve isolé de tout autre corps bon conducteur, car l'air et le verre avec lesquels il est en contact sont de mauvais conducteurs. Les mauvais conducteurs sont appelés *isolants*. On ne réussit pas à électriser par le frottement un tube de métal tenu à la main, car il transmet l'électricité développée à la main qui est conductrice, et l'électricité se répand dans le sol; mais si le tube est séparé de la main par une tige de verre qui le supporte, il est isolé et devient par le frottement capable d'attirer les corps légers. Si tous les corps étaient bons conducteurs, l'électricité ne pourrait être retenue et étudiée.

CORPS BONS CONDUCTEURS

Métaux,
Charbon de cornue,
Cordes de chanvre,
Liège,
Eau commune,
Solutions aqueuses de sels ou d'acides,
Corps des animaux,
Sol.

CORPS MAUVAIS CONDUCTEURS

Air et gaz secs,
Soufre,
Paraffine,
Verre,
Résine,
Gomme laque,
Caoutchouc,
Soie,
Essence de térébenthine.

756. Pendule électrique. — On appelle pendule électrique une petite balle conductrice de sureau B suspendue à un support de verre C par un fil de soie isolant F (fig. 614). Comme il est plus aisé d'écarter de la verticale un corps soutenu par un fil que de le soulever, le pendule électrique est employé avec avantage pour reconnaître l'action attractive d'un corps électrisé.

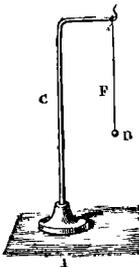


Fig. 614.

757. Communication d'électricité par contact.

— Quand on touche avec un bâton de résine, électrisé

par frottement, un cylindre de métal supporté par une colonne isolante, le cylindre attire à son tour les corps légers et paraît électrisé sur toute sa surface. Si à la suite de ce premier cylindre, maintenant électrisé, on en dispose un second qui le touche, les deux cylindres sont électrisés, mais l'attraction d'un pendule par le premier est moindre qu'avant son contact avec le second. L'attraction du pendule devient inappréciable si le second cylindre a de très grandes dimensions, elle disparaît quand la communication est établie avec le sol.

758. Deux espèces d'électricité. — *Il y a deux espèces d'électricités. Deux corps chargés d'une même électricité se repoussent, deux corps chargés d'électricités différentes s'attirent.*

Remplaçons la balle de sureau du pendule électrique par un petit cylindre de verre électrisé par le frottement. Ce cylindre est repoussé

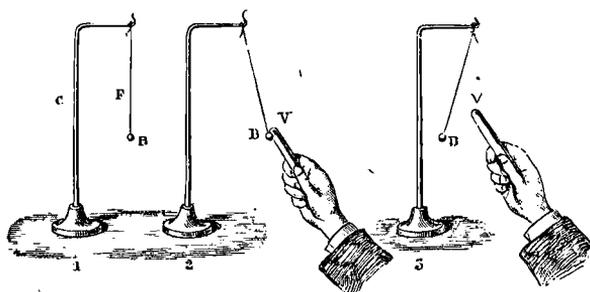


Fig. 615.

par un bâton de verre frotté, attiré par un bâton de résine frotté. Un petit cylindre de résine suspendu à son tour au fil de soie du pendule et électrisé par frottement est repoussé par la résine et attiré par le verre ⁽¹⁾.

On observe les mêmes effets d'attraction et de répulsion en posant successivement sur un même pivot vertical où elles sont mobiles horizontalement, deux aiguilles plates de verre et de résine que l'on électrise par le frottement.

C'est le plus souvent avec le pendule électrique à balle de sureau qu'on démontre l'existence des deux électricités et leurs propriétés.

(1) La résine et le verre sont tous les deux frottés avec de la laine.

A la balle de sureau B présentons un bâton de verre frotté (fig. 615₂): la balle est d'abord vivement attirée, elle vient en contact avec le verre, y adhère un instant, s'électrise comme lui par contact, et est ensuite vivement repoussée (fig. 615₃); mais, à cet état, elle est attirée par le bâton de résine frotté.

En touchant avec le doigt la balle de sureau électrisée par son contact avec le verre, nous lui enlevons son électricité. Si l'on approche alors le bâton de résine, la balle est attirée puis repoussée après le contact; mais, à ce moment, le bâton de verre l'attire ⁽¹⁾.

Double pendule électrique. — Le pendule employé plus haut peut être remplacé par un double pendule formé de deux fils de *lin conducteurs*, fixés à un support isolant et soutenant chacun une balle de sureau (fig. 616). Électrisées par contact avec un bâton de verre, les deux balles *bb'* prennent une même électricité et se repoussent, le bâton de verre les repousse également toutes les deux, mais le bâton de résine les attire.

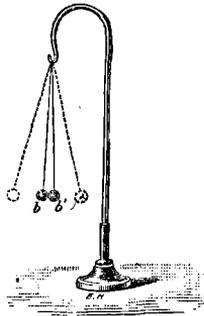


Fig. 616.

Il n'y a que deux espèces d'électricité. — Il y a deux états électriques différents : celui du verre et celui de la résine frottée, mais il n'y en a que deux. En effet, deux pendules ayant été électrisés par contact, l'un avec le verre, l'autre avec la résine, si l'on approche un corps quelconque électrisé, il attire l'un des pendules, repousse l'autre, et se comporte par conséquent soit comme le verre, soit comme la résine.

Électricités vitrée et résineuse. — Les deux états électriques des corps électrisés sont attribués à deux électricités différentes qu'on appelle électricité *vitrée* et électricité *résineuse*.

759. Quantités d'électricité égales. — Deux sphères métalliques égales *S* et *S'* soutenues par des supports isolants et chargées d'une même électricité, sont dites contenir des quantités égales, si elles exercent séparément à la même distance la même attraction sur la balle d'un pendule électrique.

(1) La concordance des expériences faites avec le pendule à cylindre de verre et avec le pendule à balle de sureau, fait voir que, dans l'électrisation par simple contact, un corps prend la même électricité que le corps électrisé qui l'a touché.

On dit que la sphère S renferme une plus grande quantité d'électricité que la sphère S' , si elle exerce une action plus forte sur le pendule électrique.

760. Électricités positive et négative. — Supposons deux sphères égales chargées l'une d'électricité vitrée, l'autre d'électricité résineuse, et exerçant séparément à la même distance des attractions égales sur la balle d'un pendule électrique; quand on met les deux sphères en contact, leurs électricités disparaissent comme si elles s'étaient neutralisées. Elles se sont comportées comme des quantités *numériquement égales*, l'une positive, l'autre négative, qui s'annulent en s'ajoutant. On convient d'appeler *positive* l'électricité vitrée et *négative* l'électricité résineuse.

Charges et masses électriques. — On emploie indifféremment les termes *charge* électrique et *masse* électrique en leur donnant la même signification qu'au terme *quantité* d'électricité.

761. Développement simultané des deux électricités. — Une des deux électricités ne se développe jamais sans qu'il apparaisse une quantité égale de l'autre. Pour le montrer, on frotte l'un contre l'autre deux disques A et B , l'un de verre, l'autre de bois recouvert de drap et soutenus par des manches isolants. Le verre se charge d'électricité vitrée, le drap d'électricité résineuse (fig. 617). Après la séparation, chacun des deux disques attire la balle du pendule électrique. Si cette balle a été préalablement électrisée par contact avec un bâton de verre frotté, le disque de verre la repousse tandis que le disque de drap l'attire. Le corps frotté et le corps frottant sont donc chargés d'électricités de signes contraires. *Leurs charges sont égales*, car si les deux disques sont maintenus en contact et présentés par leur tranche au pendule électrique, ils n'exercent aucune attraction sur la balle de sureau.

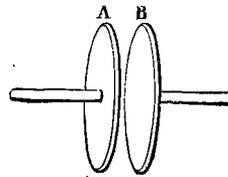


Fig. 617.

Une des deux électricités ne disparaît jamais sans qu'il disparaisse en même temps une quantité égale de l'autre.

762. État neutre et hypothèse des deux fluides. — Le développement simultané des deux électricités en quantités égales sur le corps frotté et sur le corps frottant a conduit à l'hypothèse des deux

fluides. Un corps non électrisé ou à l'état neutre se comporte comme si ses particules contenaient des quantités égales de *fluide positif* et de *fluide négatif* préexistants et juxtaposés. Le frottement ne ferait que séparer ces électricités qui occupent respectivement les deux corps.

L'existence matérielle de ces deux fluides n'est pas probable, mais cette hypothèse facilite l'exposé des phénomènes électriques. Nous sommes d'ailleurs dans l'ignorance absolue de la véritable nature de l'électricité.

763. Hypothèse d'un seul fluide. — On résume encore les phénomènes précédents sous une autre forme. Un corps à l'état neutre peut être supposé contenir une certaine quantité d'électricité. Il paraît électrisé s'il en contient plus ou moins qu'à l'état neutre : on le dit électrisé positivement dans le premier cas, négativement dans le second. Sa charge est la différence entre la quantité qu'il contient et celle qu'il contiendrait à l'état neutre. Au moment de l'électrisation, la quantité totale d'électricité ne change pas, car le gain d'électricité de l'un des deux corps en présence est égal à la perte de l'autre. On *admet* que le verre frotté avec de la laine prend un *excès d'électricité*, cet excès est égal à l'électricité que perd la laine. Nous avons plus haut appelé positive cette électricité du verre.

764. Signe de l'électricité développée. — Ce signe dépend de la nature du corps frotté et de celle du corps frottant. Voici une liste dans laquelle différents corps sont rangés de telle façon que chacun d'eux s'électrise positivement s'il est frotté par un des corps qui le suivent et négativement s'il est frotté par un de ceux qui le précèdent :

Verre poli, drap de laine, papier, soie, gomme laque, résine, verre dépoli, métaux.

Le verre poli et le verre dépoli frottés avec de la laine prennent des électricités contraires.

765. L'électricité se porte à la surface des conducteurs. — Un conducteur électrisé ne présente d'électricité qu'à sa *surface extérieure*, l'intérieur est à l'état neutre.

1° On électrise une sphère métallique, creuse, isolée, S, présentant une petite ouverture (fig. 618); on introduit dans la cavité un corps conducteur *e* porté sur une tige isolante et on établit son contact avec la surface interne. Le conducteur *e* est ensuite retiré avec précaution en ayant soin de ne pas toucher les bords de l'ouverture; on constate *qu'il n'est pas électrisé*, car il n'exerce pas

d'action sur un pendule électrique, mais il s'électrise immédiatement par contact avec la surface extérieure.

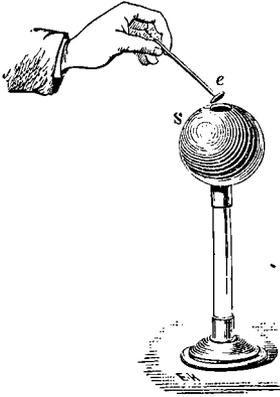


Fig. 618.

Si la sphère creuse avait été à l'état neutre et le corps *e* électrisé, celui-ci aurait cédé son électricité à la sphère. En effet, si un conducteur électrisé est porté dans un conducteur creux et mis en contact

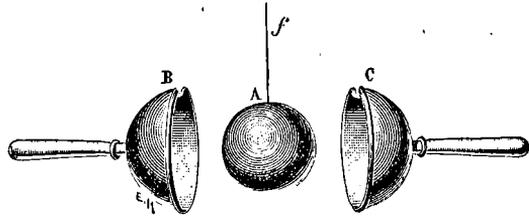


Fig. 619.

avec la paroi intérieure, il abandonne toute sa charge au conducteur creux et *cette électricité passe à la surface extérieure.*

2° Une sphère métallique *A*, isolée par un fil de soie *f*, est électrisée et recouverte avec deux hémisphères creux *B* et *C* de plus grand diamètre portés par des manches isolants (fig. 619). En soulevant les hémisphères placés en contact, on touche la sphère, on les abaisse ensuite légèrement, et on les sépare sans toucher de nouveau la sphère. Ils sont alors électrisés tous les deux, car ils attirent un pendule électrique, et la sphère intérieure n'a plus d'électricité, elle l'a cédée aux hémisphères qui formaient au moment du contact la surface extérieure d'un conducteur unique composé des hémisphères et de la sphère.

3° A un conducteur isolé on suspend une cage en fils métalliques munie de doubles pendules à l'intérieur et à l'extérieur, et on l'électrise fortement. Les doubles pendules extérieurs divergent vivement, les pendules intérieurs restent verticaux. On voit ainsi que l'électricité se porte à la surface extérieure même lorsque cette surface n'est pas continue.

Puisque l'électricité n'existe qu'à la surface des conducteurs, un conducteur creux se comporte comme un conducteur plein, une boule de soufre ou de gomme laque recouverte d'une feuille d'or agit comme une boule métallique, un plateau de verre recouvert d'une feuille d'étain comme un plateau métallique.

766. Un conducteur creux électrisé n'exerce pas d'action à l'intérieur. — Un conducteur creux quelconque électrisé exerce une action sur un pendule extérieur, mais *il est sans action sur un pendule intérieur, électrisé ou non.*

Ce fait expérimental a été vérifié par Faraday (784).

LOIS DES ATTRACTIONS ET RÉPULSIONS ÉLECTRIQUES

767. Coulomb a établi les lois auxquelles obéissent les forces qui s'exercent entre deux petits corps électrisés ; il a construit à cet effet un appareil très sensible appelé **balance de torsion**.

Dans le pendule électrique décrit précédemment, la force électrique qui agissait sur la balle mobile l'écartait de la verticale en soulevant une composante de son poids qui allait en croissant avec la déviation. La balance de torsion est un pendule électrique soustrait par son mode de suspension à l'action de la pesanteur et dans lequel on fait équilibre à une force électrique par la torsion d'un fil métallique.

non (Description de la balance de torsion (fig. 620). — Une tige fine ou

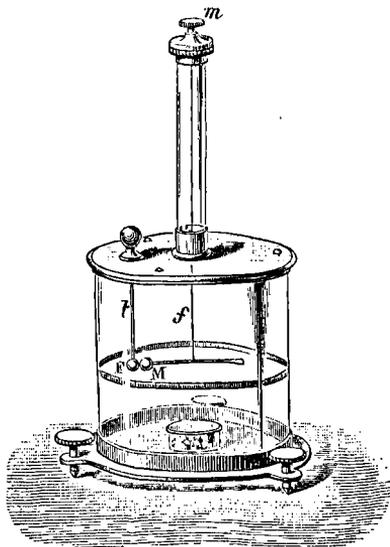


Fig. 620.

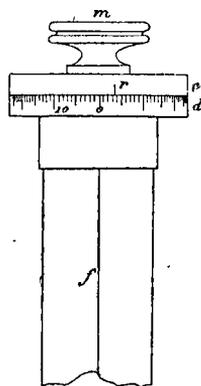


Fig. 621.

aiguille isolante, terminée à l'une de ses extrémités par une boule de sureau doré M, est suspendue horizontalement à un fil d'argent long et fin *f* autour

duquel elle peut tourner. Elle oscille au milieu d'une cage cylindrique de verre qui porte une graduation en degrés sur son pourtour à la hauteur de l'aiguille. Au centre du couvercle de la cage se dresse verticalement un tube de verre. Ce tube est muni à sa partie supérieure d'une garniture métallique traversée par une pince m qui soutient le fil d'argent.

Par une ouverture du couvercle de la cage on peut introduire une tige isolante t supportant une boule conductrice F . On tourne le couvercle pour que le centre de la boule fixe soit en face du zéro de la graduation de la cage et on retire ensuite la tige et la boule.

Le fil de torsion maintient l'aiguille mobile dans une certaine position d'équilibre. En tournant lentement la pince m , on entraîne le fil et l'aiguille jusqu'à ce que le centre de la boule mobile au repos se projette sur le zéro de la graduation de la cage. La boule mobile occupe alors la place de la boule fixe et est en équilibre sans torsion du fil.

A l'aide d'une grosse tête d'épingle électrisée et isolée que l'on descend par l'ouverture du couvercle, on électrise la boule mobile; on descend ensuite la boule fixe que l'on a électrisée séparément de la même électricité. Les deux boules chargées de la même électricité se repoussent; par cette répulsion, l'aiguille mobile est déviée et tord le fil qui la soutient. La torsion du fil fait naître une force élastique qui croît avec l'angle d'écart, et l'aiguille se fixe quand la force de torsion fait équilibre à la force répulsive qui s'exerce entre les deux boules.

Si le fil métallique est très fin, la force de torsion qui correspond à un angle de torsion de quelques degrés est extrêmement faible.

Pour mesurer avec cet appareil les forces de torsion qui font équilibre aux forces répulsives, la garniture métallique d qui termine le tube de verre à sa partie supérieure est divisée en degrés sur sa circonférence (fig. 621). Sur cette garniture qui est fixe tourne à frottement un tambour métallique c muni d'un repère r et traversé en son centre par la pince m qui soutient le fil d'argent f . La pince peut tourner seule indépendamment du tambour; en tournant le tambour supérieur, on entraîne le fil et l'aiguille.

Vérification de la loi des distances. — Les deux boules chargées de la même électricité se repoussent. L'aiguille mobile est déviée, le fil métallique est tordu, l'équilibre s'établit entre la torsion et la force répulsive pour un angle d'écart α , l'angle de torsion est aussi égal à α .

Pour faire varier la distance, on tourne le tambour supérieur d'un angle A en sens inverse du déplacement de l'aiguille de façon à réduire l'angle d'écart à $\frac{\alpha}{2}$ (fig. 622). A ce moment, l'angle de torsion du fil est $A + \frac{\alpha}{2}$ (1). Le tambour supérieur est ensuite tourné d'un angle B (à partir de sa première position) de façon à rapprocher l'aiguille jusqu'à la distance angulaire $\frac{\alpha}{4}$. L'angle d'écart est alors $\frac{\alpha}{4}$ et l'angle de torsion $B + \frac{\alpha}{4}$.

(1) Si la boule fixe F ne repoussait pas la boule mobile M , celle-ci suivrait le mouvement du tambour et se placerait en M_1 ; l'angle de torsion du fil est l'angle de la position actuelle de l'aiguille et de la position qu'elle aurait sans torsion du fil.

Pour chacun de ces trois angles d'écart, la force de répulsion R est équilibrée par une force élastique qu'on peut supposer appliquée au centre de la boule mobile, tangentiellment à la circonférence qu'elle décrit⁽¹⁾.

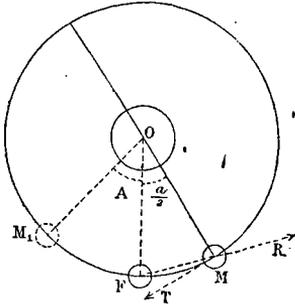


Fig. 622.

Les forces élastiques de torsion étant, d'après des expériences antérieures de Coulomb, *proportionnelles aux angles de torsion*, les forces élastiques de torsion sont ici proportionnelles aux angles a , $A + \frac{a}{2}$

$B + \frac{a}{4}$. Or on trouve que ces angles sont entre eux comme 1, 4, 16. Donc, aux distances $a \frac{a}{2}$, $\frac{a}{4}$ c'est-à-dire à des distances

1, $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{4}$, les forces de torsion ou les forces répulsives qui leur sont égales⁽²⁾ sont entre elles comme 1, 4, 16, ou en raison inverse du carré des distances.

Coulomb a vérifié, en chargeant la boule fixe et la boule mobile d'électricités contraires, que l'attraction entre les deux boules variait aussi en raison inverse du carré de la distance.)

Il résulte des expériences de Coulomb que les forces attractives ou répulsives qui s'exercent entre deux corps électrisés *de petites dimensions par rapport à leur distance*, varient **en raison inverse du carré de la distance** qui les sépare, et sont dirigées suivant la droite qui les joint⁽⁴⁾.

768. Quantités d'électricité. — Dans l'action de corps électrisés de petites dimensions par rapport à leur distance, on dit que deux corps électrisés b et b' possèdent des quantités d'électricité égales s'ils exercent une même action à la même distance sur un corps électrisé A ; on dit que les quantités sont différentes si les actions sont différentes.

(1) Les forces élastiques de torsion sont des forces de réaction égales et opposées à la force qui produit la torsion; or, pour un corps qui tourne autour d'un axe fixe, la torsion peut être produite par une force horizontale perpendiculaire au rayon OM .

(2) On avait $a = 36^\circ$, $\frac{a}{2} = 18^\circ$, $\frac{a}{4} = 9^\circ$; pour ces faibles distances angulaires des deux boules, la corde FM peut être confondue avec l'arc de circonférence et la distance comptée sur l'arc.

(3) Vu la petitesse de l'angle de la corde FM et de la tangente MT à la circonférence en M , pour les petits angles de l'expérience, la force répulsive appliqué en M peut être confondue avec sa composante suivant la tangente en M et considérée comme directement opposée à la force élastique de torsion MT (fig. 622).

(4) Les expériences de Coulomb ne comportaient pas une grande précision, mais la loi des distances a servi de base à une théorie des phénomènes électrostatiques et peut être considérée comme vérifiée par ses conséquences.

La déviation de la boule mobile est la même quand on remplace la boule fixe par b et b' dans la balance de torsion, si b et b' ont la même charge.

La quantité d'électricité de b est dite double de la quantité de b' si l'action de b sur A est double de celle de b' . La quantité est dite n fois plus grande ou plus petite si l'action sur A est n fois plus grande ou plus petite⁽¹⁾.

Si la quantité de b est trouvée n fois plus grande que celle de b' par l'action sur A à une distance d , elle est encore trouvée n fois plus grande à une distance d' . Elle est encore trouvée n fois plus grande par l'action sur un autre corps électrisé B de forme et de charge différentes.

Les quantités d'électricité de A et de B se compareront conformément aux mêmes définitions. Si l'action de A sur b est p fois plus grande que l'action de B sur b , la quantité d'électricité de A est dite p fois plus grande que la quantité d'électricité de B.

En résumé, l'action de deux corps électrisés est **proportionnelle aux quantités d'électricité** qu'ils renferment.

D'après la loi des distances et la loi des quantités, l'action f de deux masses électriques q et q' , distantes de d , sera exprimée par

$$f = K \frac{qq'}{d^2}.$$

(Comparaison des quantités d'électricité par la balance de torsion.

— On fait agir successivement les quantités d'électricité à comparer sur une boule mobile M chargée d'une électricité de même nom et ayant une charge constante. Un corps b , de charge q , occupant la place de la boule fixe en F, et la boule M ayant été repoussée, il faut tourner le tambour supérieur d'un angle A pour amener M à une distance angulaire α . A + α représente la force répulsive f (fig. 623). Il faut tourner le tambour supérieur d'un angle A' pour amener la boule mobile à la même distance angulaire α , lorsque le corps

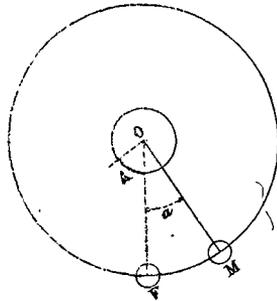


Fig. 623.

(1) Cette définition des quantités d'électricité égales, doubles, multiples, peut être rapprochée de la définition des masses en mécanique. Deux corps b et b' ont la même masse, si une même masse M (par exemple la masse de la Terre), à une même distance, exerce sur eux la même action; la masse de b est double de celle de b' , si la masse M exerce sur lui à la même distance une action double de celle qu'elle exerce sur b' .

b' , de charge q' , occupe la place de la boule fixe ; $A' + a$ représente alors la force répulsive f .

$$f = K \frac{qM}{d^2} = A + a.$$

$$f' = K \frac{q'M}{d^2} = A' + a.$$

$$\left. \frac{q}{q'} = \frac{A + a}{A' + a} \right\}$$

769. Unité de masse électrique. — Suivant les règles suivies pour le choix des unités des diverses grandeurs physiques (135), on prend une unité de quantité ou de masse électrique qui rende le coefficient K égal à l'unité dans la relation $f = K \frac{qq'}{d^2}$.

D'après l'équation $f = \frac{qq'}{d^2}$, où l'on mesure f en dynes et d en centimètres, l'unité de masse électrique est la masse qu'il faut communiquer à deux petits corps pour que, placés dans l'air à une distance de 1 centimètre, ils exercent une action mutuelle égale à 1 dyne⁽¹⁾. A la distance d , leur action sera $\frac{1}{d^2}$ dynes.

Si les masses sont de même signe, la force est répulsive, et f est positif ; si les masses sont de signes contraires, la force est attractive, et f est négatif.

DISTRIBUTION DE L'ÉLECTRICITÉ

770. Sur une sphère isolée, éloignée de tout autre conducteur, la quantité d'électricité par centimètre carré ou la densité est constante. On dit que la distribution est uniforme. Soit q la charge de la sphère, r son rayon, μ la densité :

$$q = 4\pi r^2 \mu \quad \mu = \frac{q}{4\pi r^2}.$$

Sur un conducteur non sphérique, la distribution n'est pas uniforme ; toutefois, sur une petite surface s , la charge est sensiblement proportionnelle à la surface, $q = \mu s$. On appelle densité en un point

(1) Cette unité est l'unité électrostatique CGS de quantité. Si les deux corps électrisés, chargés de quantités q et q' , mesurés avec l'unité qui vient d'être définie, sont plongés dans un milieu isolant autre que l'air, leur action mutuelle n'est pas $\frac{qq'}{d^2}$, mais $K \frac{qq'}{d^2}$, K étant un coefficient qui varie avec la nature du milieu.

le rapport de la charge d'un élément de surface à la surface de cet élément.

771. Comparaison des densités en deux points d'un conducteur. — Pour comparer les densités en deux points A et B d'un conducteur E, on applique sur la surface en A un petit disque métallique e supporté par une tige mince isolante t (fig. 624). Ce disque, appelé *plan d'épreuve*, coïncide avec une portion de la surface externe du conducteur égale à son étendue, et emporte, quand on l'éloigne normalement, une charge proportionnelle à celle qui y existe. A cause de ses faibles dimensions, le plan d'épreuve ne diminue pas d'une façon appréciable la charge totale du conducteur. On compare dans la balance de Coulomb les charges du plan d'épreuve appliqué successivement en A et en B, en substituant le plan d'épreuve à la boule fixe et en le faisant agir sur la boule mobile préalablement chargée de la même électricité. Les charges du plan d'épreuve sont proportionnelles aux charges qui couvrent en A et B des surfaces du conducteur égales à sa surface ou proportionnelles aux densités en A et B. On vérifie que sur une sphère électrisée isolée, éloignée de tout autre conducteur, la densité est la même en tous les points.

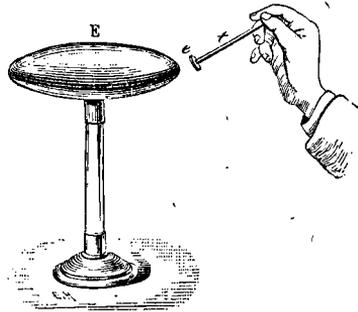


Fig. 624.

Distribution sur un conducteur quelconque. — Sur un conducteur électrisé, isolé, soustrait à toute influence, la distribution ne dépend que de la forme du conducteur; elle ne dépend pas de sa nature. La densité *double, triple* en chaque point avec la charge totale, *sans que la distribution varie*.

La densité en un point croît avec la courbure de la surface du conducteur en ce point. Aux extrémités des axes d'un ellipsoïde de révolution, les densités électriques sont proportionnelles aux longueurs de ces axes; la densité croît donc d'autant plus à l'extrémité du grand axe que cet axe est plus long par rapport à l'autre. Elle sera très grande aux extrémités d'un ellipsoïde très allongé. Si le grand axe s'allonge indéfiniment ou se termine en pointe, la densité tend à devenir infinie à l'extrémité de la pointe. Sur un cylindre terminé par des calottes hémisphériques, la densité est sensiblement uni-

forme sur la partie cylindrique : elle est moindre que sur les hémisphères.

772. Mode de formation de masses électriques multiples. — 1° En juxtaposant deux corps de petites dimensions ayant des masses électriques égales et de même signe, on obtient un système ayant une masse double.

2° En touchant une sphère électrisée avec une sphère neutre de même rayon (de substance conductrice quelconque, creuse ou pleine), on a un système exerçant sur une boule mobile la même action que la première sphère électrisée. Si l'on sépare les deux sphères, chacune a une masse moitié, car elles exercent respectivement la même action, et cette action est la moitié de l'action de la sphère primitive. En touchant l'une de ces sphères avec une sphère neutre égale, on réduit la masse au quart, etc.

D'une façon générale, les quantités d'électricité s'ajoutent : soient, en effet, deux sphères égales contenant, l'une une quantité d'électricité $+q$, et l'autre une quantité d'électricité $+q'$. Après le contact, la charge commune à chacune d'elles est trouvée égale à $\frac{q+q'}{2}$. Si la charge de la seconde est $-q'$, la charge commune après le contact est $\frac{q-q'}{2}$.

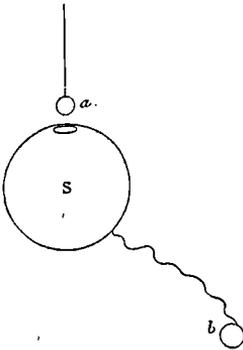


Fig. 625.

3° Prenons un conducteur creux isolé S ; relions-le par un fil conducteur à une petite sphère b prise pour boule fixe dans la balance de torsion. Introduisons plusieurs fois de suite dans la sphère creuse une boule électrisée a ayant une charge constante, et mettons-la en contact avec la surface intérieure de la sphère : nous savons que la boule a (765) se déchargera à chaque contact et que ses charges successives passeront sur la surface extérieure du système Sb (fig. 625). La distribution étant indépendante de la masse totale, la sphère b prise pour boule fixe dans la balance de torsion, accusera des charges qui croîtront comme la suite des nombres 1, 2, 3, 4...

INFLUENCE ÉLECTRIQUE

Nous savons que l'électricité développée par le frottement se communique par *contact* ; nous allons voir qu'elle peut aussi être communiquée par *influence*.

793. Champ électrique. — On appelle champ électrique d'un corps électrisé ou d'un système de masses électriques, l'espace dans lequel s'exercent les forces électriques dues à ces masses; c'est *l'espace dans lequel un petit pendule électrique est sollicité à se mouvoir*. Le champ électrique s'étend pratiquement jusqu'aux points où les forces électriques deviennent insensibles.

Un conducteur à l'état neutre placé dans le champ d'un système électrisé s'électrise *par influence*. Le corps électrisé est souvent appelé *inducteur*. Le corps influencé est appelé *induit*.

774. Phénomène de l'influence électrique. — D'une sphère métallique S, isolée et chargée positivement, approchons un cylindre métallique AB isolé et à l'état neutre : le cylindre s'électrise *sous l'influence de la sphère* (fig. 626).

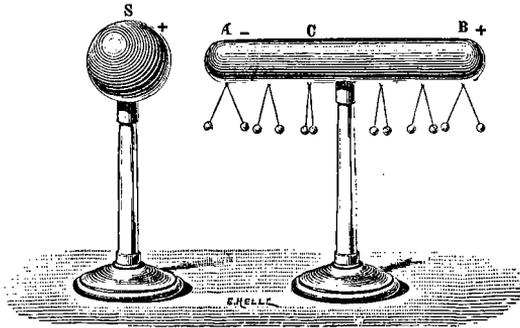


Fig. 626.

Si le cylindre porte des doubles pendules formés de balles de sureau suspendues à des fils de lin conducteurs, ces pendules divergent. L'extrémité A, *la plus voisine de la sphère*, est électrisée négativement ou *en sens contraire de l'inducteur*, car un bâton de résine frotté qu'on approche lentement du pendule de cette extrémité le repousse.

Le bâton de résine attire le pendule de l'extrémité B. La partie B, *la plus éloignée de la sphère*, est donc électrisée positivement ou *comme l'inducteur*. La divergence des pendules est la plus grande aux deux extrémités A et B du cylindre; elle diminue vers le milieu, et devient nulle dans une région moyenne C (plus voisine de A que de B) où les balles de sureau ne divergent pas.

Si la sphère avait été chargée négativement, il aurait apparu de l'électricité positive en A et de l'électricité négative en B.

Avant que le cylindre fût approché de la sphère, la distribution sur la sphère était uniforme. *L'induit réagit sur l'inducteur* et y détermine un changement de distribution; l'électricité positive de S, attirée par l'électricité négative de A, s'accumule au voisinage du cylindre.

Si on éloigne la sphère S ou si on la décharge en la touchant avec le doigt, le cylindre reprend immédiatement son état neutre initial et ses pendules retombent. Les électricités opposées développées par influence étaient *en quantités égales* puisqu'elles se sont neutralisées complètement quand l'influence a cessé (*la charge totale était nulle*).

Les charges développées par influence augmentent lorsque la charge de l'inducteur augmente et que sa distance à l'induit diminue.

Lorsque, à la suite du cylindre influencé, on en place d'autres également isolés et à distance, ils s'électrisent tous par influence et *dans le même sens*. Leur électricité disparaît si on éloigne le corps influençant.

Quand un conducteur influencé est déjà électrisé, il subit l'influence d'un corps électrisé comme s'il était à l'état neutre : l'électricité produite par influence s'ajoute en chaque point de la surface à celle que possédait préalablement le conducteur influencé.

Interprétation du phénomène de l'influence dans le langage des deux fluides. — L'électricité de la sphère S exerce une action sur les particules neutres du cylindre, sépare des quantités égales d'électricité positive et négative, attire l'électricité de nom contraire sur l'extrémité la plus voisine en A, tandis que l'électricité de même nom est repoussée le plus loin possible, en B, sur l'extrémité opposée. La charge sur S ne varie pas, sa distribution seule varie.

A cause de l'extrême facilité avec laquelle les électricités se déplacent sur un conducteur, l'équilibre s'établit en un temps extrêmement court. Quand l'équilibre s'est établi, la décomposition électrique s'arrête; à ce moment, *la résultante des actions électriques en un point intérieur quelconque est nulle*.

Quand l'équilibre électrique s'est établi, la distribution de l'électricité sur un conducteur doit être telle que l'*action résultante* de toutes les masses électriques du champ électrique sur une molécule neutre du conducteur *soit nulle*. S'il n'en était pas ainsi, comme une molécule neutre est formée de masses égales d'électricité positive et négative, la charge $+m$ de cette molécule serait sollicitée par une force $+mf$, la charge $-m$ par une force $-mf$, ce qui produirait une nouvelle séparation par influence.

775. Communication du corps influencé avec le sol. — Si l'on touche le cylindre AB avec un autre cylindre placé en prolongement, la décomposition par influence a lieu dans un conducteur plus étendu et la divergence du pendule en A augmente. Si l'on réunit au sol un *point quelconque* du cylindre pendant qu'il est soumis à l'influence, la séparation des deux fluides se produit dans un vaste conducteur composé du cylindre et du sol. L'électricité positive se rend le plus loin possible, c'est-à-dire dans le sol, et le pendule de l'extrémité B tombe;

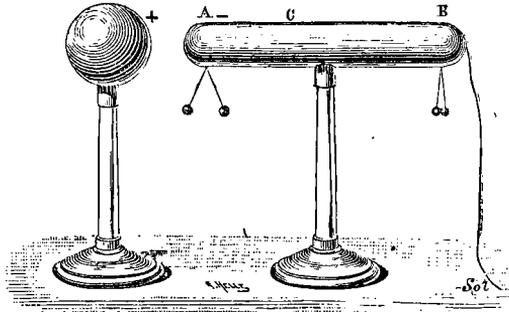


Fig. 627.

l'électricité négative persiste en A où elle est maintenue par l'attraction de l'électricité de la sphère, et la divergence du pendule correspondant augmente (fig. 627).

Si l'on supprime alors la communication du cylindre avec le sol et si on éloigne *ensuite* la sphère inductrice, l'électricité négative qui subsiste seule se répand sur toute la surface du cylindre dont tous les pendules divergent : un bâton de résine frotté les repousse.

On a ainsi **chargé par influence** un conducteur isolé *sans établir de contact*, en se servant d'un corps électrisé dont on n'a pas modifié la charge. L'induit a pris une *électricité opposée à celle de l'inducteur*. Nous verrons une application de cette charge par influence dans l'électroscope.

776. Diélectriques. — L'influence ou l'induction électrostatique s'exerce à travers les substances isolantes qu'on appelle pour cette raison *diélectriques*. L'influence est plus grande à travers un diélectrique qu'à travers une couche d'air de même épaisseur.

777. Explication de l'attraction des corps légers. — Le développement d'électricité par influence donne une explication de l'attraction des corps légers par un corps électrisé.

Corps léger à l'état neutre. — *Corps léger conducteur et isolé.* — Présentons un corps électrisé positivement M à la balle de sureau N

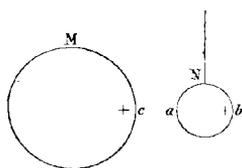


Fig. 628.

d'un pendule électrique à fil de soie (fig. 628) : l'électricité positive du corps M produit sur la balle une décomposition par influence : la face tournée vers M se charge négativement, la face opposée prend une charge positive égale ; l'attraction de l'électricité négative, plus voisine du corps M, est plus forte que la répulsion de l'électricité positive ; c'est donc l'attraction qui l'emporte.

Corps léger conducteur, non isolé. — Si la balle de sureau n'est pas isolée, mais soutenue par un fil de lin conducteur fixé à un support métallique, l'électricité positive développée par l'influence du bâton de verre s'écoule dans le sol ; l'attraction est alors notablement plus forte (775) que lorsque la balle est isolée.

Corps léger, mauvais conducteur. — La décomposition par influence ne se produit que lentement sur un mauvais conducteur : il y aura après quelque temps attraction par le corps inducteur si celui-ci est suffisamment électrisé.

Corps léger électrisé. — L'étude que nous allons faire du pendule électrique se rapporte à ce cas.

ÉLECTROSCOPES

On donne le nom d'*électroscopes* aux appareils qui permettent de reconnaître *si un corps est électrisé, et de quelle électricité il est chargé.*

778. Pendule électrique. — Le pendule électrique est un électroscope. Quand un pendule à l'état neutre est attiré par un corps, on est certain que ce corps est électrisé. L'attraction est plus vive (775) si le pendule n'est pas isolé.

Un pendule isolé, *préalablement chargé d'une électricité connue* (par contact avec un bâton de verre ou un bâton de résine), permet de reconnaître la nature de l'électricité d'un corps électrisé qu'on en

approche, d'après l'attraction ou la répulsion. Toutefois cette question réclame un examen attentif.

Corps électrisé chargé de la même électricité que le pendule. — En approchant lentement le corps électrisé, il y a répulsion; mais si l'on continue à approcher le corps électrisé, à une petite distance, une décomposition de fluide neutre charge par influence la balle mobile d'électricité contraire sur la face en regard, ce qui donne lieu à une attraction. Il y a donc *répulsion suivie d'attraction*, l'attraction peut être seule remarquée si le corps électrisé a été trop vivement approché.

Corps électrisé et pendule chargés d'électricités contraires. — Il y a attraction, et l'*attraction persiste* même à une petite distance, car la nouvelle décomposition produite par influence charge encore d'électricité contraire la face en regard de la balle mobile.

Pendule électrisé et corps neutre. — Le pendule est *attiré*, quel que soit le signe de son électrisation, car c'est ici le pendule qui agit par influence sur le corps neutre et développe sur les parties voisines du corps approché de l'électricité contraire à la sienne.

Conclusion pratique. — Une attraction du pendule ne fixe pas sur l'électrisation du corps approché; seule, une *répulsion* caractérise une électricité de même signe que celle du pendule. Afin d'obtenir cette indication, on chargera, si cela est nécessaire, successivement le pendule positivement et négativement.

779. Électroscope à feuilles d'or. — L'électroscope à feuilles d'or (fig. 629) se compose d'une tige droite de laiton terminée en haut par un bouton sphérique B, et en bas par une

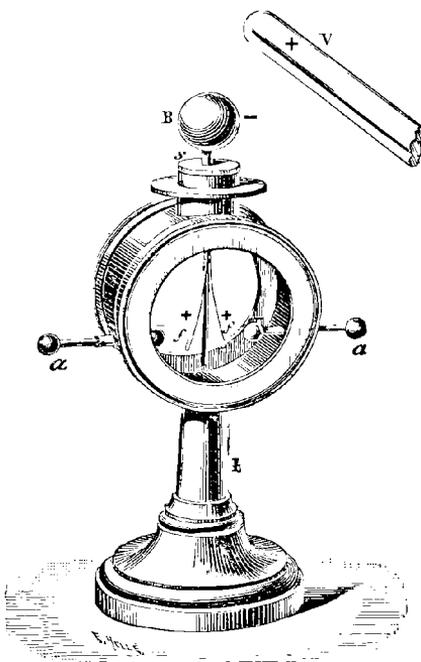


Fig. 629.

lame métallique contre laquelle s'appliquent deux feuilles d'or battu *f* verticales et très légères.

La tige de laiton est maintenue par un bouchon *s* de *soufre* ou de paraffine dans la tubulure supérieure d'une boîte cylindrique de métal. Cette boîte est portée par un pied conducteur et fermée en avant et en arrière par des glaces planes. Deux tiges horizontales *a* terminées par des boules et glissant à frottement dans les parois de la boîte cylindrique peuvent être rapprochées plus ou moins des feuilles d'or et décharger les feuilles si l'écart est trop grand.

L'électroscope à feuilles d'or est beaucoup plus sensible que le pendule et que le double pendule.

Action d'un corps électrisé sur un électroscope. — La *divergence des feuilles* d'un électroscope, à l'approche d'un corps, indique que ce corps est électrisé. Supposons, en effet, qu'on approche un bâton de verre frotté *V* : la boule de l'électroscope s'électrise par influence, l'électricité négative est attirée, tandis que l'électricité positive est chassée dans les feuilles qui sont repoussées par la bande de laiton verticale. Si les feuilles divergent très fortement, elles touchent les tiges de décharge, ce qui les fait communiquer avec le sol et empêche qu'elles ne viennent se coller sur les parois de l'électroscope. D'autre part, les tiges de décharge contribuent à augmenter la sensibilité de l'électroscope, en subissant l'influence des feuilles et en se chargeant d'électricité contraire qui augmente la divergence par l'attraction qu'elle exerce.

780. Usage de l'électroscope pour reconnaître le signe de l'électricité d'un corps. — On commence par charger l'électroscope d'une électricité connue.

Charge de l'électroscope. — On pourrait le charger par contact avec un corps électrisé. Habituellement, pour éviter de déchirer les feuilles par une charge trop forte, on procède par influence.

Supposons qu'on veuille le charger *positivement*. On approche du bouton de l'électroscope un bâton de résine frotté : les feuilles d'or divergent, chargées négativement. On touche le bouton avec le doigt pendant *l'influence* : les feuilles tombent, car leur charge négative est refoulée dans le sol (775). L'électricité positive reste maintenue sur le bouton par l'attraction du bâton de résine. On éloigne *d'abord* le doigt, *puis* le bâton de résine : l'électricité positive du bouton se répand sur tout l'appareil et fait diverger les feuilles.

On aurait chargé l'électroscope d'électricité négative en approchant un bâton de verre frotté et en touchant le bouton avec le doigt pendant l'influence.

Corps électrisé chargé de la même électricité que l'électroscope (positivement). — On approche lentement le corps électrisé : la divergence des feuilles augmente. En continuant à approcher le corps, une nouvelle décomposition par influence de l'électricité neutre du conducteur de l'électroscope a lieu : l'électricité positive séparée est repoussée dans les feuilles, s'ajoute à l'électricité positive qui y est déjà, et *augmente la divergence*.

Corps électrisé et électroscope chargés d'électricités contraires (corps négatif et électroscope positif). — On approche lentement le corps électrisé : la divergence des feuilles diminue, car l'électricité de l'électroscope est attirée par l'électricité contraire du corps. En continuant à approcher le corps, une nouvelle décomposition par influence a lieu sur le bouton et les feuilles ; l'électricité négative séparée est refoulée dans les feuilles où elle neutralise l'électricité positive qui les chargeait, les feuilles se rapprochent et se touchent. En approchant davantage le corps, l'électricité négative séparée surpasse l'électricité positive de charge, les feuilles s'écartent de nouveau, mais cette fois par une charge négative. Il y a donc eu *rapprochement jusqu'au contact, puis divergence*. Le rapprochement peut passer inaperçu si le corps électrisé est présenté trop vivement à l'électroscope.

Corps neutre et électroscope chargé. — Quel que soit le signe de la charge de l'électroscope, les feuilles *se rapprochent* quand on présente au bouton la main ou un corps neutre. En effet, l'électricité de l'électroscope agit par influence sur le conducteur neutre, y développe de l'électricité de nom contraire qui réagit sur l'électricité de l'électroscope et l'attire sur le bouton.

Conclusion pratique. — La détermination du signe de l'électricité d'un conducteur électrisé résulte sans ambiguïté de la constatation d'un *rapprochement suivi d'une divergence*, mais on ne l'observe qu'en approchant *de loin et lentement* le corps électrisé de l'électroscope. Afin d'obtenir cette indication, on chargera, si cela est nécessaire, successivement l'électroscope positivement et négativement.

(781. Graduation d'un électroscope. — Un électroscope est gradué si l'on a dressé un tableau (ou tracé une courbe) faisant connaître *les charges correspondant aux différents angles d'écart*.

A la hauteur de la partie inférieure de la feuille, l'une des deux glaces parallèles est munie d'une division sur laquelle les feuilles mobiles se projettent par leur tranche⁽¹⁾.

Pour la graduation, on met l'électroscope en communication par un long fil métallique avec un conducteur creux de petite ouverture dans lequel on introduit une sphère isolée chargée. Cette sphère est descendue jusqu'au contact, elle cède sa charge qui se répand sur la surface extérieure du conducteur et sur l'électroscope (765). On note l'écart de la feuille d'or. La sphère est retirée; après lui avoir rendu la même charge que précédemment, on l'introduit de nouveau dans le conducteur creux jusqu'au contact, la charge de l'électroscope devient double; on note le nouvel angle d'écart. En continuant, on rend la charge de l'électroscope triple, quadruple, etc.

On peut encore faire usage d'un électroscope dont la boule est creuse et introduire dans la cavité à plusieurs reprises une boule isolée *b* ayant une charge constante et dont on

établit le contact avec la surface interne de la sphère creuse (fig. 630).

L'écart des feuilles, *tant qu'il est petit*, est sensiblement proportionnel à la charge de l'électroscope.)

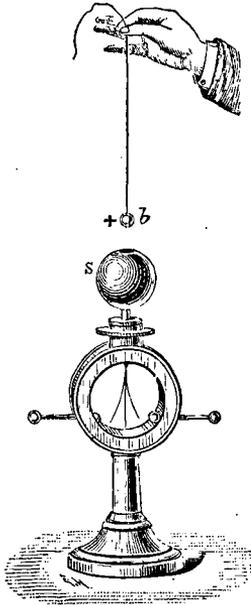


Fig. 630.

INFLUENCE A L'INTÉRIEUR D'UN CONDUCTEUR FERMÉ

782. Théorème de Faraday. — La masse électrique induite sur des conducteurs qui entourent complètement un corps électrisé est égale à la masse inductrice et de signe contraire.

Démonstration expérimentale. — Un cylindre métallique C, isolé, haut et étroit, ouvert à la partie supérieure, est relié extérieurement par un fil métallique au bouton d'un électroscope E (fig. 631). On introduit dans le cylindre une boule A, isolée par un fil de soie et

(1) Pour plus de précision, on peut viser l'une des feuilles d'or avec un microscope dont l'oculaire renferme une division parcourue par l'image de la feuille.

électrisée positivement : les feuilles de l'électroscope divergent et la divergence augmente à mesure que la boule descend. Le cylindre s'est chargé par influence : la charge positive de la surface extérieure du cylindre C et de l'électroscope est égale à la charge négative sur la surface intérieure du cylindre, car, si on enlève la boule, toute électrisation du système induit disparaît, par neutralisation des charges contraires.

Si son ouverture est étroite, le cylindre peut être considéré comme entourant complètement la boule lorsque celle-ci est suffisamment descendue, et, à partir de ce moment, la divergence des feuilles de l'électroscope ne croît plus d'une façon appréciable.

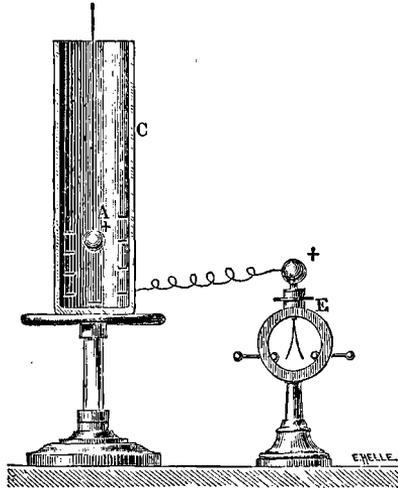


Fig. 631.

On continue à faire descendre la boule, et, avant qu'elle ait gagné le fond du cylindre, on touche un instant l'électroscope avec le doigt : l'électricité positive du système induit s'écoule dans le sol et les feuilles tombent. Le cylindre est encore chargé, car si à ce moment on retire la boule, l'électroscope se montre négatif ; en faisant rentrer la boule, les feuilles d'or retombent. *Si l'on établit alors le contact de la boule et du cylindre, il n'y a aucune divergence des feuilles de l'électroscope.* On constate en outre que la boule, retirée du cylindre, n'est plus électrisée, car elle n'agit plus sur un pendule électrique. Il n'y a plus d'électricité sur le cylindre ; sinon, elle se porterait sur la surface externe du système et chargerait l'électroscope.

L'électricité positive de la boule et l'électricité négative qu'elle avait induite sur les parois intérieures du cylindre ont disparu : elles se sont donc exactement neutralisées, elles étaient égales.

Quand un conducteur est placé en présence d'un corps électrisé, mais ne l'entoure pas, la charge induite sur le conducteur est inférieure à la charge inductrice, car c'est la charge induite sur *tous* les conducteurs enveloppant l'inducteur qui est égale à la charge inductrice.

Une salle d'expériences est assimilable au conducteur creux C de l'expérience de Faraday. Un conducteur quelconque, électrisé et isolé,

placé dans la salle, se comporte comme la sphère A et maintient sur l'ensemble des conducteurs qui l'entourent une charge égale et contraire à la sienne.

783. Une enveloppe conductrice entourant des masses électrisées supprime leur action à l'extérieur. — Reconnaissons l'expérience précédente en descendant la boule électrisée A dans le cylindre, mais sans toucher cette fois l'électroscope. Les feuilles de l'électroscope divergent par une charge positive, et *cette divergence ne varie pas au moment du contact* de la boule et du cylindre⁽¹⁾. La distribution de l'électricité positive sur le cylindre et l'électroscope ne dépend donc pas des masses intérieures (charge positive de la boule et charge négative induite sur la surface intérieure du cylindre), puisque la divergence reste la même après le contact, c'est-à-dire après que ces masses ont disparu. *Les masses intérieures n'ont donc pas d'action à l'extérieur*, en d'autres termes, l'électricité développée par influence sur la surface intérieure de la cavité neutralise à l'extérieur l'électricité enveloppée.

L'expérience peut être variée : pendant que la boule descend dans le cylindre, on peut donner à l'électroscope une charge nouvelle en le touchant avec un corps électrisé ; la divergence est alors due à la superposition de la nouvelle charge et de la charge positive due à l'influence, et, comme les masses intérieures n'agissent pas, la divergence ne varie pas au moment du contact de la boule et du cylindre.

784. Une enveloppe conductrice entourant des masses électrisées les protège contre les actions extérieures. — Si l'on recouvre un électroscope d'une cage métallique C, les feuilles ne divergent pas quand on approche un corps électrisé R, même très fortement électrisé, et si l'électroscope a été préalablement chargé, *la divergence ne varie pas*. L'électricité développée par influence sur la surface même du conducteur neutralise donc pour un point intérieur l'électricité des corps électrisés extérieurs. La divergence de l'électroscope ne varie pas même quand on vient à charger directement la cage (766).

Il n'est pas nécessaire que l'enveloppe conductrice soit absolument

(1) La divergence positive actuelle est égale à la divergence négative qu'on obtient en chargeant négativement par influence avec la même boule positive, voisine du fond du cylindre, le système du cylindre et de l'électroscope.

continue pour remplir son rôle d'*écran électrique*. Une cage en toile métallique suffit (fig. 632).

Une plaque métallique *P* communiquant avec le sol, interposée entre un corps électrisé *S* et un corps conducteur *C*, rend à peu près nuls les phénomènes d'influence produits par le corps *S* sur le conducteur (fig. 633). C'est une des conséquences de l'expérience précédente; voici, d'ailleurs, comment on s'en rend compte directement. Par suite de l'influence exercée par le corps *S*, la plaque reliée au sol se charge d'électricité contraire à celle de *S*; sa charge est inférieure à celle de *S*, mais en raison de sa moindre distance, elle exerce sensiblement la même action sur le cylindre.

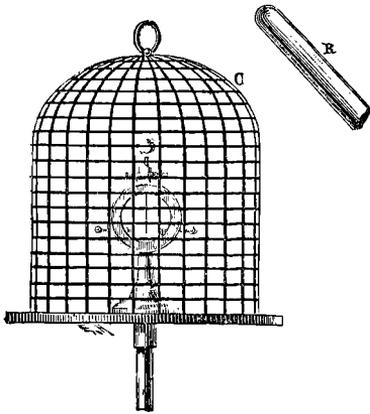


Fig. 632.

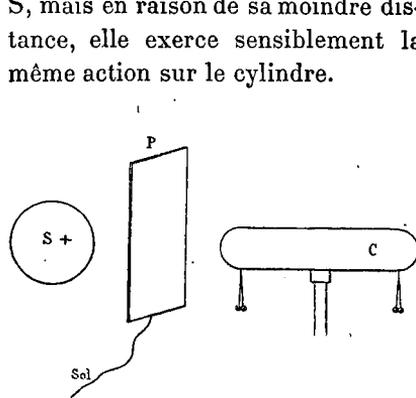


Fig. 633.

Une plaque métallique *isolée* n'exerce pas d'effet appréciable; l'influence de *S* la charge, en effet, d'électricités opposées sur les deux faces; ces charges égales et contraires, à la même distance du cylindre, exercent des actions qui s'annulent si la plaque est mince.

785. Résumé. — Soit un corps *A*, électrisé positivement, placé dans un conducteur creux fermé et isolé *B*. Désignons par *M* la charge de *A*; la charge de la surface interne de *B* sera $-M$, et la charge de la surface externe sera $+M$. La distribution de $-M$ à la surface interne de *B* varie avec la position de *A*, la distribution de $+M$ sur *A* varie en même temps. Quant à la distribution de $+M$ à la surface externe, elle est la même que si les charges intérieures n'existaient pas (fig. 634).

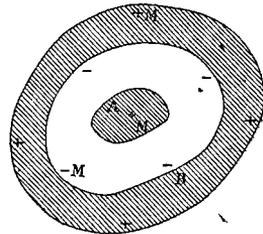


Fig. 634.

Une charge extérieure agit sur la surface externe de B, mais n'agit pas à l'intérieur.

Il y a donc un *champ électrique intérieur* et un *champ électrique extérieur* complètement *indépendants*. Ces deux champs électriques sont séparés par la matière du conducteur creux.

786. Applications du théorème de Faraday. — Par suite de l'influence exercée par un corps électrisé introduit dans le cylindre de Faraday, la charge extérieure est égale à la charge du corps électrisé et de même signe. Si le corps introduit comprend deux charges égales et contraires, la charge extérieure du cylindre et aussi celle de l'électroscope sera nulle.

Voici, d'après cela, comment on constate que les quantités d'électricité développées par le frottement de deux corps sont égales et contraires.

Dans un cylindre de Faraday dont les parois latérales sont formées d'une toile métallique à mailles serrées, on introduit un bâton de verre non électrisé et un morceau de cuir enduit d'amalgame de zinc porté par un manche isolant ; on frotte le verre contre le cuir sans toucher les parois du cylindre, l'électroscope n'accuse aucune déviation tant que les deux corps sont maintenus en même temps dans le cylindre ; on observe des divergences égales et contraires en les retirant tour à tour.

787. Action extérieure d'une couche sphérique uniforme. — Soit une sphère conductrice S de rayon R, et une enveloppe sphérique concentrique de rayon R' également conductrice. Supposons la sphère S électrisée positivement : sa charge + M développe sur la surface interne de la seconde sphère une charge négative égale - M (fig. 635) ; toute charge externe étant sans influence sur le système des deux charges + M et - M, ces électricités sont, par raison de symétrie, uniformément distribuées sur les deux surfaces sphériques. Comme ces deux charges se neutralisent sur un point extérieur (783), si le rayon de la sphère intérieure diminue indéfiniment, la charge - M exerce la même action

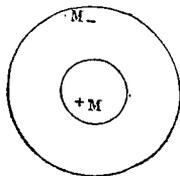


Fig. 635

qu'une charge - M placée au centre ; cela prouve qu'une couche sphérique uniformément distribuée agit sur un point extérieur de la même manière que si elle était concentrée en son centre.

DÉPERDITION DE L'ÉLECTRICITÉ

(788. **Pression électrostatique.** — Sur un conducteur électrisé *en équilibre*, l'électricité d'un élément superficiel tel que ab est soumise à l'action d'une **force résultante** exercée par les diverses charges du champ électrique. Cette force ne peut être que *normale à l'élément*. Si, en effet, elle avait une direction oblique telle que If (fig. 636), on pourrait la décomposer en deux composantes, l'une normale In , l'autre It tangente à la surface ; à cause de l'extrême mobilité des masses électriques sur un conducteur, la composante tangentielle déplacerait l'électricité de l'élément ; or cela ne peut avoir lieu puisque l'équilibre est établi. La force résultante doit être de plus dirigée vers l'extérieur du conducteur, puisque rien ne s'opposerait au mouvement vers l'intérieur et que l'équilibre a lieu.

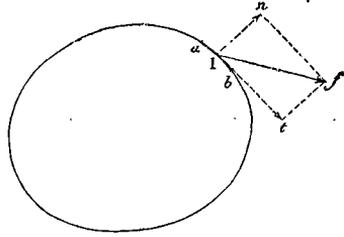


Fig. 636.

La résistance opposée par le milieu isolant qui entoure le conducteur empêche la charge de l'élément ab de quitter la surface. On reconnaît que c'est la *pression du gaz extérieur* qui maintient l'électricité à la surface d'un corps, car si l'on introduit sous la cloche d'une machine pneumatique une sphère isolée suffisamment électrisée et si l'on fait le vide, on constate après avoir rendu l'air que la sphère a perdu la plus grande partie de sa charge.

La force qui pousse l'électricité vers l'extérieur sur un centimètre carré de la surface s'appelle **pression électrostatique** : elle agit contre la pression atmosphérique. On démontre que la pression électrostatique en un point croît *proportionnellement au carré de la densité électrique* en ce point.)

La force qui pousse l'électricité vers l'extérieur sur un centimètre carré de la surface s'appelle **pression électrostatique** : elle agit contre la pression atmosphérique. On démontre que la pression électrostatique en un point croît *proportionnellement au carré de la densité électrique* en ce point.)

789. Rôle des pointes. — Sur une pointe, sur une arête d'un corps électrisé, la densité est extrêmement grande (771).

Corps électrisé terminé en pointe. — Un corps électrisé terminé en pointe perd rapidement sa charge : les particules d'air et les grains de poussière en suspension prennent par contact la même électricité que le conducteur et la dissipent, car ils sont d'autant plus vivement repoussés que la densité à la pointe est plus forte ; on sent à la main une *vent électrique* qui semble s'échapper de la pointe ; la flamme d'une bougie peut être courbée dans le sens du courant d'air et même éteinte (fig. 637). De même que l'air est repoussé par une pointe, une pointe est aussi repoussée par l'air : elle se met en

mouvement si elle est mobile et se meut en sens inverse du vent électrique. Cela se démontre avec le *tourniquet électrique* (fig. 638). C'est une petite chape mobile sur un axe vertical ; elle porte six tiges

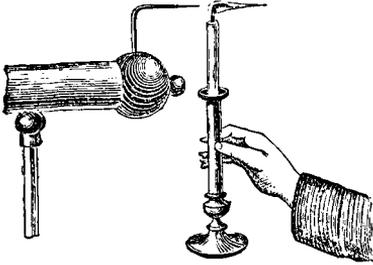


Fig. 637.

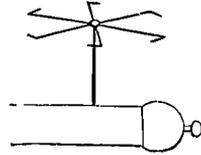


Fig. 638.

de laiton formant les rayons d'un cercle, recourbées dans le même sens et pointues à leur extrémité. Placé sur une machine électrique

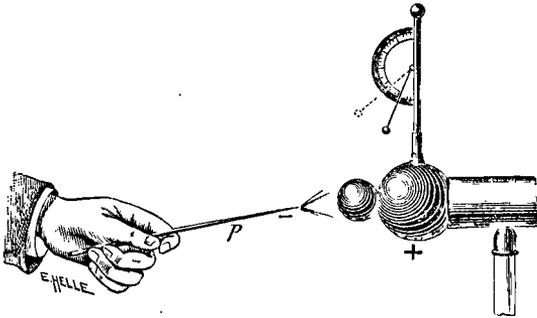


Fig. 639.

en fonctionnement, cet appareil se met à tourner rapidement *en sens inverse* de la direction de ses pointes.

Pointe présentée à un corps électrisé. — On décharge complète-

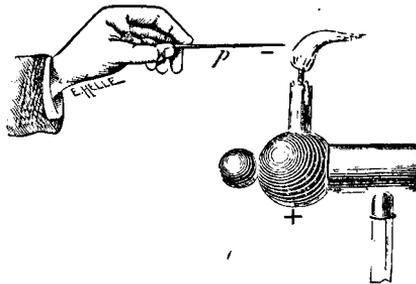


Fig. 640.

ment un conducteur électrisé en lui présentant une pointe communiquant avec le sol. L'électricité de la pointe est décomposée par influence; si le conducteur est positif, l'électricité négative s'écoule de la pointe et va neutraliser le conducteur (fig. 639). Cette décharge est accompagnée d'un vent électrique qui s'échappe de la pointe (fig. 640). Si le conducteur terminé par une pointe est isolé, il se charge par influence de la même électricité que le corps électrisé auquel il est présenté.

(790. Explication par la pression électrostatique des attractions et des répulsions des conducteurs électrisés. — Soient deux conducteurs ayant des charges opposées (fig. 641): en vertu du phénomène d'influence, les électricités contraires s'accablent sur les faces en regard, et les densités

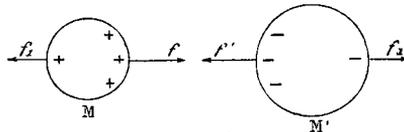


Fig. 641.

électriques y sont beaucoup plus grandes que sur les faces opposées. Les pressions électrostatiques sont donc notablement plus grandes sur les faces en regard et entraînent les deux conducteurs l'un vers l'autre s'ils sont mobiles. A une petite distance, les pressions électrostatiques pourront sur-

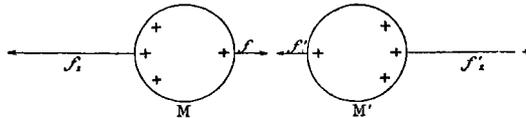


Fig. 642.

monter la pression du gaz interposé et établir une communication passagère entre les deux conducteurs : la réunion des deux électricités opposées est accompagnée d'un trait lumineux et bruyant ou *étincelle*.

Si les deux conducteurs sont chargés d'électricité de même signe (fig. 642), les densités les plus fortes sont sur les faces opposées et les pressions électrostatiques agissent de manière à éloigner les deux conducteurs.)

791. Étincelle. — Lorsque la distance de *deux corps électrisés en sens contraire* sur leurs parties voisines est suffisamment petite, l'attraction mutuelle des deux électricités peut vaincre la résistance de l'air, et on voit se produire un trait de feu avec un bruit sec : c'est *l'étincelle électrique*. Elle entraîne des particules des corps entre lesquels elle jaillit et rend l'air lumineux sur son trajet.

Une étincelle courte a la forme d'un trait lumineux (fig. 643), d'autant plus épais que les quantités d'électricité mises en jeu sont plus considérables.

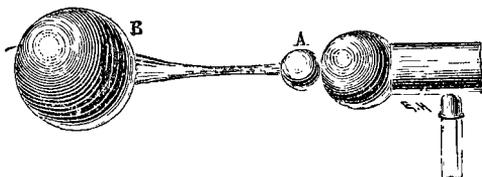


Fig. 643.

Si la distance augmente, le trait devient grêle, moins brillant, a la forme d'un zig-zag et se ramifie (fig. 644).

Si l'on approche d'un corps électrisé un *conducteur à l'état neutre*, de l'électricité de nom contraire à celle de l'inducteur se développe sur la partie de l'induit qui regarde l'inducteur, et une étincelle peut

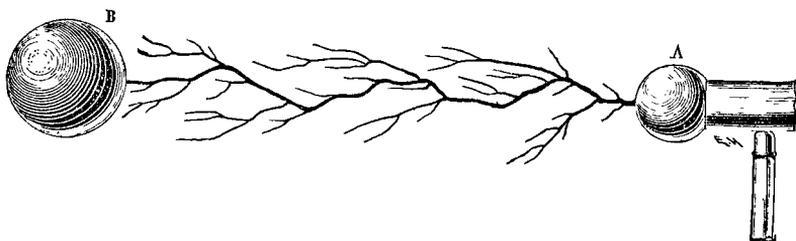


Fig. 644.

jaillir entre les électricités contraires. Dans le cas où le conducteur approché du corps électrisé est isolé, des charges égales de l'inducteur et de l'induit se neutralisent, et le conducteur induit ne garde plus après l'étincelle que de l'électricité du même signe que celle de l'inducteur. Si le conducteur approché du corps électrisé communique avec le sol, le corps électrisé est *déchargé* après l'étincelle.

L'électricité qui s'écoule par une pointe offre dans l'obscurité une *lueur violacée* qui change d'aspect avec le signe de l'électricité qui se perd. Une pointe positive paraît entourée d'une *aigrette* qui s'étend assez loin de la pointe; une pointe négative se termine par un *point lumineux brillant*.

Lorsqu'une étincelle éclate entre deux conducteurs séparés par une substance isolante solide, il y a rupture de l'isolant sur le trajet de l'étincelle. Cette décharge à travers l'isolant, accompagnée d'étincelle, est appelée *décharge disruptive*.

L'étincelle prend le nom d'*effluve* quand elle jaillit dans le vide, ou à la pression ordinaire entre de larges surfaces isolantes.

792. Conservation de l'électricité. — Un corps électrisé resterait indéfiniment électrisé, et son électricité *se conserverait*, tant que l'on ne viendrait pas à la neutraliser par une électricité de signe contraire, en quantité égale. Si, sur un conducteur isolé, l'électricité paraît disparaître d'elle-même, plus ou moins vite, cela tient à un *isolement imparfait*; on réussit, en effet, à réduire d'autant plus la déperdition que l'isolement est rendu plus parfait.

793. Déperdition de l'électricité. — Un conducteur électrisé et isolé, perd lentement son électricité, même lorsqu'il ne présente que des surfaces arrondies et finit par revenir à l'état neutre. La déperdition a lieu par le *support*, par le *gaz ambiant* et par la *lumière*.

Certains supports isolants se laissent peu à peu pénétrer par l'électricité, surtout si la charge du conducteur isolé est forte; la perte est toutefois négligeable si le support isolant est long et fin.

La cause la plus importante de déperdition par les supports est l'*humidité qui les recouvre*, car cette couche d'humidité établit une communication superficielle entre le conducteur et le sol. C'est ainsi que les supports de *verre* isolent mal parce qu'ils attirent l'humidité.

Pour cette raison, on doit dessécher l'atmosphère qui entoure les appareils; les expériences de Coulomb étaient faites dans une balance de torsion contenant des fragments de chaux vive. L'*ébonite* attire moins l'humidité que le verre et constitue un meilleur isolant.

Le *soufre* et la *paraffine* ne sont pas hygrométriques, et, comme ils offrent d'ailleurs par leur substance une résistance extrêmement grande à la propagation de l'électricité, ils forment d'excellents supports isolants.

L'*air sec* et en repos est un isolant presque parfait; l'*air humide* isole moins bien.

À l'action de l'isolant et du gaz ambiant il convient d'ajouter l'action de la *lumière*. La lumière rouge est sans action, les radiations violettes et ultra-violettes sont les plus actives. La décharge est rapide pour toutes les surfaces métalliques à la lumière de l'arc voltaïque et de l'étincelle électrique, surtout si elles sont électrisées négativement. Un conducteur *frûchement poli* de zinc, de cadmium et surtout d'aluminium perd presque instantanément sa charge négative à la lumière solaire; la déperdition est encore rapide à la lumière diffuse du jour.

POTENTIEL

DEFINITION EXPÉRIMENTALE DU POTENTIEL

794. Conducteurs soustraits à toute influence électrique.
 — Un plan d'épreuve appliqué sur un conducteur électrisé non sphérique emporte des quantités d'électricité qui varient avec le point touché (771), mais si le conducteur est *mis en communication lointaine* (pour éviter les effets d'influence) par un *fil métallique long et*

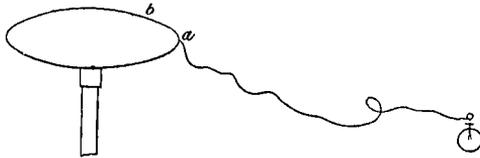


Fig. 645.

fin, avec un électroscope de petites dimensions, l'électroscope prend la même électricité que le conducteur et *sa déviation reste constante, quel que soit le point touché* de la surface extérieure ou de la surface intérieure. Cela se vérifie pour un ellipsoïde allongé (fig. 645), pour un cylindre terminé par deux hémisphères et pour un conducteur quelconque en équilibre électrique. *Cette charge constante de l'électroscope caractérise l'état électrique du conducteur.* Tous les points d'un conducteur électrisé en équilibre sont dits au même **potentiel**.

Si l'électricité du conducteur est positive, la charge de l'électroscope est positive, et il en est de même du potentiel. Le potentiel est négatif si le conducteur est négatif.

Dans le cas de plusieurs conducteurs électrisés distincts, ne communiquant pas entre eux, en équilibre électrique, et éloignés les uns des autres, le potentiel a une valeur déterminée pour chacun des conducteurs et elle est variable d'un conducteur à l'autre.

Conducteurs au même potentiel. — On dit que deux conducteurs A et B ont le même potentiel s'ils donnent séparément des charges

égales et de même signe à deux électroscopes identiques a et b , avec lesquels ils sont mis respectivement en communication lointaine.

Communication de deux conducteurs au même potentiel. — Reunions deux conducteurs au même potentiel par un fil mn : les écarts de leurs électroscopes ne changent pas ; si nous mesurons aussi les

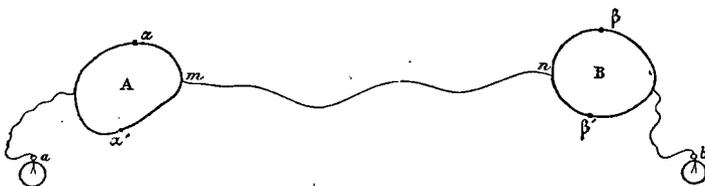


Fig. 646.

densités en divers points α et α' sur le premier, β et β' sur le second, avant et après la communication, on reconnaît qu'elles n'ont pas varié : les densités et les potentiels sont restés les mêmes (fig. 646).

Communication de deux conducteurs ayant des potentiels différents. — Le potentiel d'un conducteur A est dit supérieur au potentiel d'un autre conducteur indépendant B, si la charge de l'électroscope indicateur a est supérieure à la charge de l'électroscope indicateur b (en tenant compte du signe)⁽¹⁾. Quand on réunit A et B par un fil mn , le potentiel de A étant supérieur au potentiel de B, l'équilibre est rompu dans chacun des conducteurs : il y a passage d'électricité positive de A sur B, les densités diminuent sur A et augmentent sur B, et un nouvel équilibre est établi lorsque les potentiels se sont égaux ; les charges de a et de b sont alors devenues égales, celle de a ayant diminué et celle de b ayant augmenté.

Choix de l'indicateur du potentiel. — Les dimensions de l'électroscope indicateur doivent être assez petites pour que sa charge ne diminue pas d'une façon appréciable la quantité d'électricité du conducteur. Il peut être remplacé par un conducteur quelconque de petites dimensions. Pour la simplicité des définitions, nous suppose-

(1) Un conducteur chargé négativement communique une charge négative à l'électroscope : le potentiel du conducteur est compté négativement.

Deux conducteurs dont les potentiels sont négatifs et égaux, conservent leur état électrique et leur potentiel quand on les met en communication lointaine. Si l'on relie entre eux deux conducteurs dont le potentiel est négatif, celui dont le potentiel a la plus petite valeur absolue cède de l'électricité positive à l'autre (ou lui enlève de l'électricité négative). En résumé, le potentiel 5 est supérieur au potentiel 2, et le potentiel -2 supérieur au potentiel -5.

rons qu'on emploie une sphère d'un rayon égal à l'unité de longueur, relié au conducteur par un fil long et fin ; le conducteur, le fil métallique et la sphère prennent le même potentiel, c'est le potentiel du conducteur. On appelle *potentiel d'un conducteur quelconque la charge d'une sphère d'un rayon d'un centimètre mise en communication lointaine avec le conducteur*. Le rapport des potentiels de deux conducteurs sera le rapport des charges de deux sphères de rayon 1 mises respectivement en communication lointaine avec les deux conducteurs.

Unité de potentiel. — On choisit pour unité de potentiel le potentiel d'une sphère d'un rayon de un centimètre ayant une charge égale à une unité électrostatique (769). Le potentiel sera n si la charge de la sphère vaut n unités électrostatiques.

Potentiel zéro. — Un conducteur mis en communication avec le sol se décharge, ainsi que la sphère qui mesure son potentiel : son potentiel devient nul. *Le potentiel zéro est le potentiel du sol.*

La transmission d'électricité entre deux conducteurs dépend de leur différence de potentiel. — Ce ne sont ni les quantités d'électricité contenues dans chacun des conducteurs, ni les densités qui déterminent la transmission de l'électricité. C'est en vertu de la différence de leurs potentiels que l'électricité se transmet entre deux conducteurs. Un conducteur de potentiel a cède de l'électricité à un conducteur de potentiel b avec lequel il est mis en communication, si a est supérieur à b , a et b étant considérés avec leurs signes. Un nouvel équilibre s'établit dans lequel les deux conducteurs prennent un potentiel commun.

795. Conducteurs soumis à des influences électriques. — Un conducteur soumis à des influences électriques peut présenter aux divers points de sa surface des charges différentes de grandeurs et de signes (774) ; toutefois, la charge d'un électroscope mis en communication lointaine avec un point quelconque de ce conducteur est constante. La charge d'une sphère de rayon 1 *caractérise* encore l'état électrique du conducteur et *mesure son potentiel*.

Ici encore, entre deux conducteurs de potentiels différents que l'on

(1) Si cette sphère, reliée au conducteur par un fil long et fin, sert de boule fixe dans la balance de Coulomb, on pourra déduire sa charge de la mesure de la répulsion de la boule mobile.

met en communication, il y a échange d'électricité; le *conducteur de potentiel plus élevé cède de l'électricité positive au conducteur de potentiel moindre*, et un nouvel équilibre s'établit avec un potentiel commun.

796. Résumé. — On appelle *potentiel d'un conducteur* quelconque la charge (en unités électrostatiques) d'une sphère d'un rayon d'un centimètre mise en communication lointaine avec ce conducteur.

Quand on relie deux conducteurs à des potentiels différents, l'équilibre est rompu : le sens de la transmission d'électricité est réglé par le signe de la différence des potentiels. Un nouvel équilibre s'est établi quand les potentiels *se sont égalisés*.

797. Conductibilité. — Supposons les conducteurs A et B (fig. 646), munis de leurs électroscopes, à *des potentiels différents*; réunissons-les par un fil *mn* bien isolé. Si ce fil est *bon conducteur*, tout le système sera amené au même potentiel en un temps inappréciable, et les deux électroscopes indiqueront la même charge. Si l'on remplace ce fil par un autre notablement *moins conducteur*, les électroscopes varieront lentement, et ce ne sera qu'après un temps sensible que le système aura pris un même potentiel. Avec un fil *isolant*, les potentiels des deux conducteurs ne s'égaliseront pas.

Nous verrons que la transmission d'électricité entre deux conducteurs *est accompagnée de manifestations d'énergie (890)*. Le système de deux conducteurs qui offrent une différence de potentiel possède une *énergie potentielle*, et leur retour à un potentiel commun développe du travail.

CAPACITÉ

798. I. Soit un conducteur A isolé dans l'espace et électrisé, de potentiel v et de charge q : le **potentiel de ce conducteur est proportionnel à sa charge**. En effet, si l'on multiplie par n la charge totale, on observe que l'équilibre électrique a encore lieu avec la même distribution (771), la densité électrique en chaque point est multipliée par n , la charge d'un électroscope avec lequel le

conducteur est mis en communication lointaine est donc aussi multipliée par n et le potentiel devient nv .

Le potentiel d'un conducteur devenant nv en même temps que sa charge devient nq , le quotient $\frac{q}{v}$ est constant; on l'appelle **capacité**: c'est la charge c qu'il faut donner au conducteur pour lui communiquer un potentiel égal à l'unité⁽¹⁾. Ce quotient caractérise un conducteur de forme et de dimension déterminées, soustrait à toute influence électrique.

II. Soit un conducteur A de potentiel v et de charge q , en présence d'autres conducteurs B, C, D, de potentiels v' , v'' ..; en doublant, triplant toutes les charges, on obtiendra un nouvel équilibre, avec la même distribution, les indications des électroscopes à communication lointaine croîtront proportionnellement, et les potentiels respectifs des conducteurs seront proportionnels aux charges. Le quotient $\frac{q}{v}$ sera constant pour le conducteur A si la position et les relations des différents conducteurs ne varient pas; ce quotient s'appelle encore *capacité électrique* du conducteur A, mais il ne caractérise plus ce conducteur, car il dépend aussi de l'influence exercée par les autres conducteurs.

Unité de capacité. — Suivant la relation $\frac{q}{v} = c$, la capacité d'un conducteur *placé dans des conditions définies* est égale à l'unité de capacité si l'unité de charge électrostatique lui donne un potentiel égal à l'unité.

C'est le cas d'une sphère isolée d'un rayon d'un centimètre, puisque, d'après la *définition* du potentiel, son potentiel est égal à 1 pour une charge égale à l'unité électrostatique. Il faut lui donner une charge v pour la porter au potentiel v .

La capacité d'une sphère est mesurée par son rayon. — Considérons deux sphères conductrices en communication lointaine et par conséquent au même potentiel, l'une de rayon R et l'autre de rayon 1;

(1) Ou encore pour faire croître son potentiel d'une unité; en effet $\frac{q}{v} = \frac{q+c}{v+1}$; par suite $\frac{q}{v} = c$, d'après les propriétés des rapports.

on trouve que la charge de la sphère de rayon R est R fois plus grande que celle de la sphère de rayon 1⁽¹⁾.

Puisque v est la charge d'une sphère de rayon 1 au potentiel v , $q = Rv$ sera la charge d'une sphère de rayon R au même potentiel; donc $c = R$; la capacité d'une sphère est mesurée par son rayon.

Il faudra faire passer R unités électrostatiques de quantité sur une sphère d'un rayon de R centimètres pour la porter à l'unité de potentiel.

La capacité d'un conducteur quelconque est représentée par le rayon d'une sphère qui aurait la même charge et le même potentiel. Comme le rayon de la sphère équivalente, la capacité d'un conducteur s'exprime en centimètres.

799. Potentiel d'une sphère. — Pour une sphère soustraite à toute influence électrique, l'équation $q = cv$ devient $q = Rv$: le potentiel d'une sphère est donc exprimé par $\frac{q}{R}$.

Le potentiel de deux sphères en communication lointaine étant le même, le partage de l'électricité a bien lieu de telle sorte que $\frac{q}{R} = \frac{q'}{R'}$, ou proportionnellement à leurs rayons.

(800. Analogies calorifiques. Potentiel et température. — Deux corps sont dits à la même température s'ils ne se cèdent aucune partie de leur chaleur quand on les met en présence. Ils sont alors en équilibre calorifique. Deux corps de températures différentes étant mis en présence, le corps le plus chaud perd de la chaleur, le plus froid en gagne jusqu'au moment où les températures se sont égalisées. La température caractérise l'état calorifique d'un corps; ce n'est pas de la quantité de chaleur des deux corps, mais de leur différence de température que dépendent leurs échanges de chaleur.

Deux conducteurs sont dits au même potentiel, si leur état électrique ne varie pas quand on les met en communication: ils sont en équilibre électrique. Les potentiels de deux corps tendent à s'égaliser par une transmission d'électricité d'un corps à l'autre si ces potentiels sont différents. Le

(1) En effet, sur deux sphères en communication lointaine, l'expérience montre que les densités électriques sont inversement proportionnelles aux rayons :

$$\frac{\mu}{\mu'} = \frac{R'}{R}$$

$$\text{or, pour ces deux sphères (770), } \mu = \frac{q}{4\pi R^2} \quad \mu' = \frac{q'}{4\pi R'^2}$$

$$\text{de là } \frac{q}{R} = \frac{q'}{R'}$$

potentiel joue dans l'équilibre électrique le rôle de la température dans l'équilibre calorifique.

Une sphère de rayon 1 mesure les potentiels et se comporte comme un thermomètre électrique. Son zéro correspond au potentiel du sol.

Capacités calorifique et électrique. — Deux corps différents, à la même température, peuvent fondre des masses de glace inégales pour passer à 0° : leurs capacités calorifiques sont proportionnelles à ces masses et différentes. De même, deux conducteurs au même potentiel devront perdre des quantités d'électricité inégales pour passer au potentiel zéro si leurs capacités électriques sont différentes⁽¹⁾.

A l'équation $Q = C\theta$ en chaleur, où θ désigne la température et C la valeur en eau du corps ou sa capacité calorifique, correspond en électricité l'équation $q = cv$.)

801. Analogies hydrauliques. Potentiel et niveau. — Si l'on réunit par un tube deux réservoirs contenant un même liquide à des niveaux différents, il y a écoulement du réservoir où le niveau est le plus haut vers le réservoir où le niveau est le plus bas, quelles que soient les sections relatives des deux réservoirs, et ce n'est pas la quantité de liquide contenue dans chacun des réservoirs qui détermine l'écoulement, mais la *différence des niveaux*; l'écoulement cesse quand les niveaux des surfaces libres se sont égalisés. Cette transmission de liquide entre les deux réservoirs correspond à la transmission électrique entre deux conducteurs.

Pour porter au même niveau H deux vases *cylindriques* de sections différentes, il faut des quantités de liquide proportionnelles aux sections des vases; dans l'égalité $M = SH$ comparée à $q = cv$, le niveau du liquide joue le rôle du potentiel, et la section du cylindre se comporte comme la capacité électrique.

De même que la hauteur du niveau dans un vase augmente proportionnellement à la masse du liquide et en raison inverse de la section, le potentiel électrique d'un conducteur croît proportionnellement à la charge du conducteur et en raison inverse de sa capacité.

La transmission électrique entre deux conducteurs correspond à l'expérience des vases communicants.

De même que la masse d'un liquide se partage proportionnellement aux

(1) Il y a toutefois des différences importantes entre les deux sortes de capacités. La capacité calorifique est proportionnelle à la masse du corps et elle dépend de sa nature : la capacité électrique d'un conducteur creux est la même que celle du conducteur plein de même surface extérieure. En outre, la capacité électrique ne dépend pas de la nature du corps, mais de sa forme et de ses relations avec les conducteurs voisins.

sections de deux vases cylindriques, une charge électrique se partage proportionnellement aux capacités de deux conducteurs.

La sphère qui mesure les potentiels en électricité se comporte comme un petit tube indicateur de niveau mis en communication latérale avec un réservoir.

Les analogies se poursuivent dans les conséquences auxquelles conduit la forme de l'égalité $q = cv$ qui convient également pour exprimer une quantité d'électricité, une quantité de chaleur ou une quantité de liquide.

802. Partage de l'électricité entre deux conducteurs en communication lointaine. Calcul du potentiel final.— Prenons deux conducteurs électrisés assez distants pour ne pas exercer d'influence mutuelle; désignons leurs charges par q et q' , leurs capacités par c et c' et leurs potentiels par v et v' : les charges sont exprimées par $q = cv$, $q' = c'v'$.

Si on les réunit par un fil long et fin, de capacité négligeable, l'égalité de potentiel s'établit entre les deux conducteurs et le fil qui ne forment plus qu'un seul conducteur offrant une capacité $c + c'$ et ayant une charge $q + q'$; le potentiel prend une valeur v_1 intermédiaire entre v et v' .

L'équation qui donnera v_1 sera

$$cv + c'v' = v_1(c + c')$$

$$\text{d'où } v_1 = \frac{cv + c'v'}{c + c'}$$

Cette équation exprime la *constance de la charge*, elle correspond à l'équation des échanges de chaleur dans le mélange de deux corps à des températures différentes. Le premier conducteur a perdu la charge $c(v - v_1)$, le second a gagné $c'(v_1 - v')$; la perte du premier est égale au gain du deuxième.

Si l'un des deux conducteurs est primitivement à l'état neutre, l'équation se réduit à

$$\text{d'où } v_1 = \frac{cv}{c + c'}$$

Application à la mesure des potentiels.— Lorsque c' est très petit par rapport à c , $v_1 = v$ (c'est le cas d'une sphère de petit rayon, mise en communication par un long fil avec un conducteur de grandes dimensions), la charge de la sphère ne diminue pas d'une

façon appréciable la charge du conducteur ni par conséquent son potentiel.

803. Mesure des capacités électriques. — On électrise le conducteur dont on veut mesurer la capacité ; sa charge étant q et son potentiel v , on a $q = cv$. Ce conducteur est mis en communication lointaine avec une sphère non électrisée de rayon ou de capacité R : la charge q se répand sur le système de capacité $c + R$ formé par le conducteur et la sphère ; le potentiel commun devient v_1

$$cv = (c + R) v_1$$

$$\text{d'où } c = R \frac{v_1}{v - v_1} = \frac{R}{\frac{v}{v_1} - 1}.$$

c mesure la capacité du conducteur en unités électrostatiques de capacité, si R est évalué en centimètres ; cette capacité se déduit du rapport $\frac{v}{v_1}$ des potentiels du conducteur, mesurés avant et après la communication avec la sphère.

804. Comparaison des potentiels. — Le rapport des potentiels de deux conducteurs est égal au rapport des charges d'un électroscope gradué de petite capacité (ou d'une petite sphère) mis successivement en communication lointaine avec les deux conducteurs.

805. Variations du potentiel et de la capacité dans l'influence électrique. — Un conducteur S , ayant une charge positive q et une capacité c , est relié par un long fil à un électroscope de très petite capacité, dont la déviation mesure le potentiel v du conducteur : $q = cv$.

On approche de S un conducteur isolé AB à l'état neutre (774) : la distribution change sur S , son électricité s'accumule en face du conducteur induit, tandis que ses parties éloignées perdent de l'électricité ; par suite, la charge de son électroscope à communication lointaine diminue et correspond à un potentiel plus petit v_1 . Comme la quantité d'électricité q du conducteur S n'a pas varié, *la diminution du potentiel est accompagnée d'un accroissement de la capacité.*

$$q = c'v_1$$

$$v_1 < v \quad \text{d'où } c' > c.$$

Si le conducteur induit AB est également relié à un électroscope à communication lointaine, cet électroscope se charge positivement puisque l'électricité positive y est refoulée. Le conducteur induit a donc un potentiel positif; ce potentiel va en diminuant à mesure qu'on s'éloigne de S. Avec un inducteur négatif, l'induit aurait un potentiel négatif.

Si l'induit est mis en communication avec le sol, son potentiel devient nul, l'électricité de S se porte en même temps en plus grande quantité sur la face qui regarde l'induit, et, pour cette raison, la charge de son électroscope diminue davantage; le potentiel de S diminue donc encore et sa capacité augmente.

(806. Potentiel en un point d'un champ électrique. — Il résulte des phénomènes fondamentaux de l'influence (774) qu'un conducteur isolé, primitivement à l'état neutre ou au potentiel du sol, s'électrise par influence quand on le place dans un champ électrique : il prend un potentiel différent de celui du sol puisque son électroscope à communication lointaine indique une charge. Si le conducteur introduit dans le champ électrique est isolé et a de très petites dimensions, les masses électriques égales, contraires et très voisines développées sur lui par l'influence ne modifient pas la distribution des masses électriques du champ. On appelle le potentiel de ce petit conducteur le *potentiel du point* où il se trouve. L'ensemble des points du champ électrique qui sont à un même potentiel forme une *surface équipotentielle*.

Si le champ électrique est dû à un point électrisé ou à une sphère uniformément électrisée S, le potentiel à une même distance du centre est constant, par raison de symétrie : les surfaces équipotentielles sont des sphères concentriques à la sphère inductrice (fig. 647). En même temps que l'influence, le potentiel va en diminuant à mesure qu'on s'éloigne du centre. Il est toujours de même signe que celui de la sphère influençante.

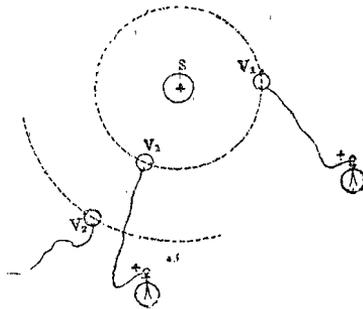


Fig. 647.

Il n'y aurait pas de transmission d'électricité entre deux conducteurs situés sur une même surface équipotentielle si on les réunissait par un fil fin.

Supposons la sphère inductrice électrisée positivement; si l'on vient à réunir par un fil fin deux petits conducteurs placés à des distances différentes et possédant des potentiels v_1 et v_2 , il y a écoulement d'électricité positive vers le conducteur le plus éloigné, et le système des deux conducteurs prend un potentiel intermédiaire entre les potentiels v_1 et v_2 .

De même, un conducteur dont les dimensions ne sont pas négligeables prend, quand on le place dans un champ électrique, un potentiel intermé-

diare entre les potentiels que prendraient ses extrémités si elles étaient isolées.)

Applications. — 1° Deux petites sphères ont des charges électriques $+12$ et -8 . Avec quelles forces s'attirent-elles à une distance de 2 centimètres?

2° Une petite boule électrisée est mise en contact avec une boule égale à l'état neutre, puis on les sépare. A la distance de 10 centimètres, elles exercent l'une sur l'autre une répulsion de 9 dynes. Quelle était la charge primitive de la boule électrisée?

3° Deux petites sphères sont distantes de 5 centimètres; l'une d'elles a une charge de 40 unités; quelle doit être la charge de l'autre pour qu'il s'exerce entre elles une répulsion égale au poids de 5 milligrammes?

4° Quelle charge m faut-il donner à une sphère de 3 centimètres de diamètre pour que la densité superficielle soit 7?

5° Une sphère d'un rayon de 14 centimètres est électrisée et sa densité est 10. Quel est son potentiel?

6° Deux sphères, ayant l'une 1 centimètre et l'autre 2 centimètres de rayon, ont été reliées un instant par un long fil et sont au même potentiel 40. La force de répulsion qui s'exerce actuellement entre elles est 4 dynes; quelle est leur distance?

7° Deux sphères conductrices électrisées, ayant pour rayons 5 millimètres et 1 centimètre, ont été reliées par un fil long et fin de capacité négligeable. La communication ayant été interceptée, les centres des deux sphères ont été placés à 5 centimètres; on a observé une répulsion de 8 dynes; quel était le potentiel commun des deux sphères?

8° Une sphère conductrice de 5 centimètres de rayon a un potentiel 5, une autre sphère de 10 centimètres de rayon a un potentiel 10; on les réunit par un fil long et fin; que devient le potentiel commun?

9° Une sphère électrisée de 14 centimètres de diamètre a une densité 10. Quelle est la force exercée par cette charge sur un point extérieur très voisin de la surface?

10° Deux sphères isolées, dont les rayons sont entre eux comme 7 et 11, contiennent la même quantité d'électricité; dans quel rapport sont leurs densités? Dans quel rapport seront les densités si les deux sphères précédentes sont mises en communication lointaine?

ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

807. Énergie d'un conducteur électrisé. — La décharge d'un conducteur électrisé donne lieu à diverses manifestations d'énergie : calorifiques, mécaniques, chimiques, etc. Un conducteur électrisé possède donc une capacité de travail (54) ou une **énergie potentielle** qui disparaît dans la décharge. Cette énergie potentielle est égale au travail qu'il a fallu dépenser pour électriser le conducteur. Les analogies constatées expérimentalement avec les phénomènes hydrauliques vont nous aider à exprimer cette énergie potentielle.

De même qu'un corps pesant, et en particulier un liquide, produit un travail en descendant d'un niveau supérieur à un niveau inférieur, de même *une quantité d'électricité positive effectuée un travail en passant, sous l'influence des forces électriques, d'une région à potentiel plus élevé à une région de potentiel moins élevé.*

§ 808. Énergie potentielle d'une masse électrique q au potentiel v . — Imaginons un réservoir contenant un liquide dont le niveau est maintenu à une hauteur H ; un poids P de ce liquide produit, en s'écoulant à la partie inférieure du réservoir un travail PH , ou le même travail que s'il tombait de la hauteur H . Quand l'écoulement n'a pas lieu, le liquide est dans les mêmes conditions qu'un poids P soutenu à la hauteur H : il possède une énergie potentielle PH (P en dynes, H en centimètres, PH en ergs).

Soit en second lieu un conducteur électrisé dont le potentiel est maintenu à la valeur v ; une quantité d'électricité q peut produire en passant de ce conducteur au sol, c'est-à-dire en passant du potentiel v au potentiel zéro, un travail qv : l'énergie potentielle d'une masse q au potentiel v est qv .

809. Signification du potentiel d'un conducteur. — Le potentiel v d'un conducteur est donc l'énergie potentielle de l'unité de masse électrique sur ce conducteur, ou le travail que pourrait produire l'unité d'électricité positive en passant du potentiel v au potentiel zéro, c'est-à-dire en s'écoulant dans le sol.

Sans recourir à ces analogies, on démontre directement, en partant des lois des attractions et répulsions électriqués, que le potentiel d'un conducteur en unités électrostatiques (1) est numériquement égal au travail (en ergs) que l'unité électrostatique d'électricité positive peut produire en passant de ce conducteur au sol.

a) de conducteurs se déchargeant plus complètement.

§ 810. Travail d'une masse électrique q passant du potentiel v_1 au potentiel v_2 . — Si un poids P de liquide dans un réservoir de niveau H au lieu de s'écouler jusqu'au sol s'arrête à un niveau H' , le travail produit est $P(H - H')$; de même, une masse électrisée q effectuera un travail $q(v_1 - v_2)$ en passant du potentiel v_1 au potentiel v_2 .

Pour un poids qui tombe, le travail ne dépend pas du chemin parcouru, mais seulement de la hauteur de chute (49); de même, le travail électrique ne varie pas avec la façon dont la décharge a lieu, ni avec le mode de fractionnement de la masse transportée: il ne dépend que de cette masse et des potentiels extrêmes.

(1) On la charge d'une petite sphère d'un rayon d'un centimètre, mise en communication lointaine avec ce conducteur.

811. Énergie potentielle d'un conducteur électrisé isolé à charge limitée. — Un conducteur électrisé, ayant une charge limitée q et un potentiel v , ne produira pas en passant au potentiel zéro un travail qv , mais un travail inférieur, car, pendant le cours de la chute, le potentiel diminue en même temps que la charge (comme le niveau d'un réservoir qui se vide) puisqu'il est proportionnel à la charge.

Un réservoir cylindrique contenant un liquide de hauteur H et de poids P , produit en se vidant un travail $\frac{PH}{2}$, c'est-à-dire le même travail qu'un poids P tombant entièrement du niveau $\frac{H}{2}$ au niveau zéro ; de même, un conducteur électrisé de charge q et de potentiel v produira un travail $\frac{qv}{2}$.

D'après la relation $q = cv$, ce travail peut encore s'exprimer par $\frac{cv^2}{2}$ ou $\frac{q^2}{2c}$. Ce sont des expressions équivalentes de l'énergie électrique d'un conducteur ou du travail qu'il peut réaliser par sa décharge.

Inversement, pour donner au conducteur une charge q au potentiel v , il faudrait dépenser un travail $\frac{qv}{2}$ (1).

(Pour démontrer cette proposition, on peut développer, à propos d'un conducteur électrisé qui se décharge, le raisonnement que l'on ferait pour un réservoir cylindrique qui se vide. Subdivisons la masse q en une infinité de masses très petites $m, m', m'' \dots$ transportées successivement du conducteur au sol.

cv étant la charge primitive du conducteur, cette charge devient cv_1 après l'écoulement de m , m est la charge qui portait le potentiel de v_1 à v , $m = c(v - v_1)$. Si m est très petit, v et v_1 diffèrent très peu, et on peut attribuer au conducteur pendant le transport de m un potentiel moyen $\frac{v + v_1}{2}$. Le travail effectué est $m \frac{v + v_1}{2} = c \frac{v^2 - v_1^2}{2}$.

(1) En évaluant q avec l'unité électrostatique de quantité, et v avec l'unité de potentiel adoptée précédemment, $\frac{qv}{2}$ sera exprimé en ergs, de même $\frac{cv^2}{2}$ et $\frac{q^2}{2c}$.

Vérifions-le pour $\frac{q^2}{2c}$.

D'après la définition de l'unité électrostatique, $q^2 = d^2F$ (où F est mesuré en dynes et d en centimètres), c est le produit du carré d'une longueur par un certain nombre de dynes. Comme on évalue c en centimètres, $\frac{q^2}{2c}$ sera le produit d'une force en dynes par des centimètres et représentera des ergs.

La charge suivante $m' = c(v_1 - v_2)$ produira un travail

$$m' \frac{v_1 + v_2}{2} = c \frac{v_1^2 - v_2^2}{2}.$$

La somme des travaux dus au transport des masses successives sera $c \frac{v^2 - v_1^2}{2} + c \frac{v_1^2 - v_2^2}{2} \dots + c \frac{v_{n-1}^2 - v_n^2}{2}$. Le potentiel v_n du conducteur après le transport de la n^{e} masse, c'est-à-dire après la décharge complète, est nul; c'est le potentiel du sol. La somme se réduit d'après cela à $\frac{cv^2}{2}$.

812. Énergie d'un système de conducteurs électrisés. — Si le champ électrique renferme un certain nombre de conducteurs, le travail total de la décharge sera la somme des travaux dus à la décharge des différents conducteurs.

Si nous déchargions les conducteurs successivement, la disparition d'un conducteur électrisé apporterait dans la distribution et dans les potentiels des modifications qu'il serait compliqué de suivre. Mais le travail produit étant pour chaque conducteur indépendant du mode de décharge (810), nous pouvons supposer qu'on effectue simultanément la décharge des différents conducteurs en leur enlevant à la fois des quantités telles que la distribution ne change pas après chaque décharge partielle; de cette façon, nous n'avons pas à nous préoccuper des changements produits dans les capacités par des modifications d'influence; chacun des conducteurs passera graduellement de son potentiel v au potentiel zéro en gardant une capacité constante et produira un travail $\frac{cv^2}{2}$ ou $\frac{qv}{2}$.

q, q', q'' étant les charges respectives des conducteurs dont les potentiels sont v, v', v'' , l'énergie totale sera

$$W = \frac{1}{2} (qv + q'v' + q''v'' + \dots)$$

Cette expression générale conduit à quelques simplifications.

Lorsque, dans un champ électrique, un conducteur n'a reçu aucune électricité par contact et n'est électrisé que *par influence*, il renferme des quantités égales des deux électricités, sa charge totale q est nulle, et le terme qui lui correspond dans l'expression de l'énergie totale est nul.

Le terme relatif à un conducteur *communiquant avec le sol* est également nul, car, si la charge n'est pas nulle, son potentiel est nul.

Applications. — 1° Calculer directement le travail qu'une masse électrique $+q$ occupant une petite sphère conductrice S , produit en repoussant une masse d'électricité $+1$ depuis la surface de la sphère jusqu'à l'infini.

2° Quelle est l'énergie dépensée pour donner à une sphère isolée de 30 centimètres de rayon une charge de 1000 unités électrostatiques?

3° Une sphère conductrice de 5 centimètres de rayon est au potentiel 5, une autre de 10 centimètres de rayon est au potentiel 10. Quelle est la somme de leurs énergies quand elles sont indépendantes? que devient cette énergie quand on les a reliées par un fil long et fin?

4° La capacité d'un conducteur est 700; à quel potentiel faut-il le charger pour que l'énergie de sa décharge soit équivalente à 1 calorie?

5° Un conducteur de capacité 150 est chargé au potentiel 100. Quelle vitesse devrait avoir un projectile de 400 grammes pour avoir la même énergie?

UNITÉS PRATIQUES

Les unités de charge, de potentiel et de capacité précédemment définies sont appelées **unités électrostatiques**.

813. Dans les applications industrielles on fait usage d'unités empruntées à l'électricité dynamique; ce sont des multiples ou des sous-multiples des unités électrostatiques.

Quantité. — L'unité pratique de masse électrique est le *coulomb* qui vaut $3 \cdot 10^9$ (3 milliards) unités électrostatiques.

Soit Q une masse électrique en coulombs; sa mesure en unités électrostatiques sera :

$$q = 3 \cdot 10^9 Q.$$

Potentiel. — L'unité pratique de potentiel est le *volt* qui vaut $\frac{1}{300}$ de l'unité électrostatique.

Soit V un potentiel en volts; sa mesure en unités électrostatiques sera :

$$v = \frac{V}{300}.$$

Capacité. — L'unité pratique de capacité est le *farad*. Le farad a été choisi de telle façon que si l'on exprime la masse en coulombs Q , le potentiel en volts V , la capacité en farads C , la relation $Q = CV$ est applicable, comme l'était la relation $q = cv$ entre les mesures électrostatiques.

Une capacité évaluée en unités électrostatiques est :

$$c = \frac{q}{v} = \frac{3 \cdot 10^9 Q}{\frac{V}{300}} = 9 \cdot 10^{11} \frac{Q}{V} = 9 \cdot 10^{11} C.$$

C représente des farads ; le farad vaut donc $9 \cdot 10^{11}$ unités électrostatiques de capacité. Le plus souvent, on fait usage du *microfarad*, millionième partie du farad. Le microfarad vaut $9 \cdot 10^5$ unités électrostatiques de capacité.

Énergie. — Avec les unités électrostatiques l'énergie électrique $\frac{1}{2} vq$ est exprimée en ergs, or

$$\frac{1}{2} vq = \frac{1}{2} \cdot \frac{V}{300} \cdot 3 \cdot 10^9 Q = \frac{1}{2} VQ \cdot 10^7.$$

Puisque $\frac{1}{2} VQ \cdot 10^7$ représente des ergs, le produit $\frac{1}{2} VQ$ (en volts et en coulombs) mesure l'énergie électrique en joules, puisqu'un joule vaut 10^7 erg.

Les unités pratiques qui viennent d'être définies (coulomb, volt, farad) sont des unités dont on fait usage en électricité dynamique pour évaluer la quantité, le potentiel et la capacité. En raison des applications plus nombreuses de l'électricité dynamique, on a été amené à généraliser l'emploi de ces unités.

MACHINES ÉLECTRIQUES

814. Les machines électriques sont des *appareils producteurs d'électricité qui servent à établir une différence de potentiel entre deux conducteurs isolés ou entre un conducteur isolé et le sol*. Les deux électricités sont développées à la fois *en quantités égales* sur les deux *collecteurs*. Si l'un des deux est mis en communication avec le sol, l'autre se charge seul. Dans ce dernier cas, en ne changeant rien au fonctionnement de la machine, *la différence de potentiel des deux collecteurs reste la même* que s'ils étaient tous les deux isolés.

Le fonctionnement de toute machine électrique a lieu avec une dépense de travail. Ce travail est appliqué à porter une charge positive à un potentiel supérieur, et une charge négative égale à un potentiel inférieur à celui du sol. Ces électricités sont séparées sur deux

collecteurs; en se réunissant, elles restituent le travail dépensé; les collecteurs perdent en même temps l'énergie potentielle que leur charge leur avait communiquée.

Dans les machines électrostatiques le travail dépensé est du travail mécanique.

MACHINES A FROTTEMENT

Les premières machines électriques réalisées furent des machines à frottement.

815. Machine électrique de Ramsden. — Elle comprend : 1° un

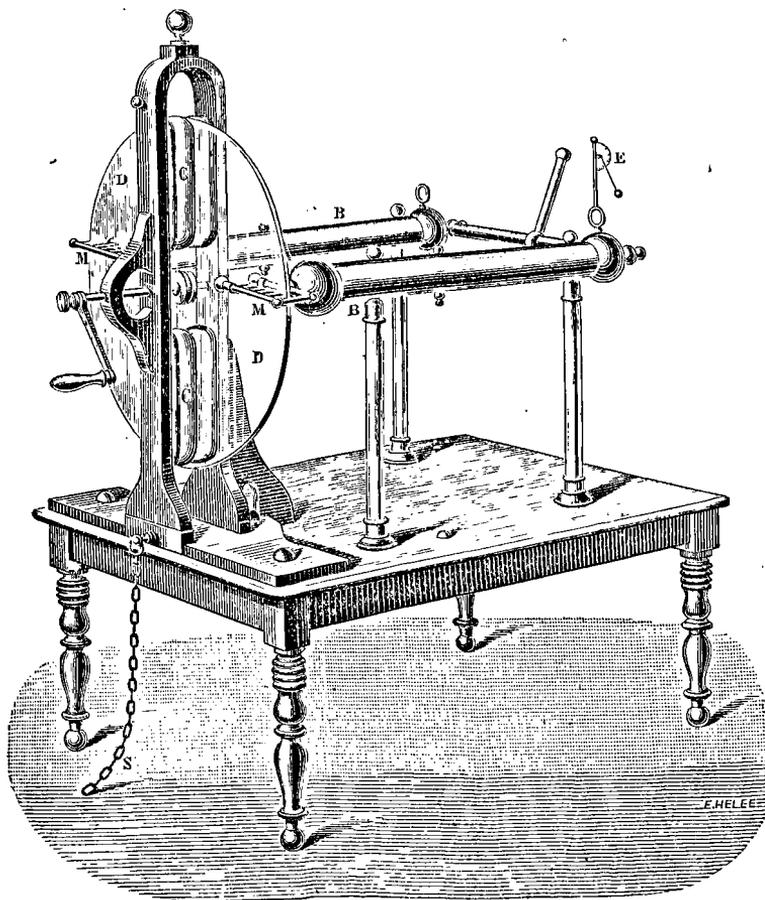


Fig. 648.

appareil où l'électricité est développée par le frottement; 2° un collecteur d'électricité.

Description (fig. 648). — L'appareil producteur d'électricité consiste en un plateau ou disque de verre vertical D, mobile dans son plan autour de son axe, et passant à frottement entre deux paires de coussins en cuir rembourrés de crin C. L'électricité neutre du disque est décomposée par le frottement, au contact du verre et du cuir; l'électricité positive reste sur le verre, et la négative passe des coussins au sol S par les montants de bois auxquels les coussins sont fixés.

Le collecteur d'électricité consiste en deux gros cylindres creux de laiton parallèles B, disposés à la hauteur du diamètre horizontal du disque de verre et ayant leurs axes normaux au plan du disque. Ces cylindres sont isolés par des colonnes de verre fixées sur la table en bois qui porte les montants des coussins. A leurs extrémités les plus éloignées du plateau, ils sont reliés par un tube transversal; leurs extrémités voisines du disque portent des mâchoires métalliques M dont les branches recourbées en fer à cheval contournent les bords du disque. Ces mâchoires, garnies de pointes, forment des peignes tournés vers chacune des faces du disque, perpendiculaires à son plan et assez écartés pour lui permettre de tourner sans les toucher.

Fonctionnement. — Le disque de verre, chargé sur ses deux faces d'électricité positive par le frottement des coussins supérieurs, vient en présence de la mâchoire M et agit sur elle par influence. Il attire de l'électricité négative par les pointes et repousse la positive aux extrémités du collecteur qui sont terminées par des surfaces arrondies. L'électricité négative qui s'écoule par les pointes neutralise l'électricité positive des deux faces du verre, et ramène ainsi à l'état neutre la région O du disque qui a franchi la mâchoire (fig. 649). Après un quart de tour, le quadrant déchargé vient frotter contre les coussins inférieurs, s'y charge positivement, et, en agissant ensuite sur la deuxième mâchoire M', produit la même électrisation positive du collecteur. Comme la rotation est continue, la charge positive tend à croître de plus en plus sur le collecteur qui forme le

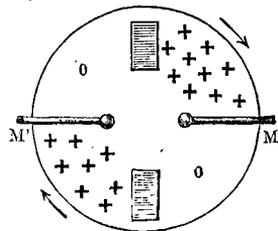


Fig. 649.

pôle positif de la machine⁽¹⁾. Les coussins forment le pôle négatif. L'électricité négative des coussins, au lieu de s'écouler dans le sol par les montants de bois, quand l'électricité positive du disque s'est éloignée et a cessé de l'attirer, pourrait servir à charger un second collecteur qui recevrait ainsi une masse d'électricité négative égale à la masse positive.

Charge et potentiel du collecteur. — A mesure que la charge q des cylindres augmente, leur potentiel v (ou la différence entre leur potentiel et le potentiel du sol) croît conformément à la relation $q = cv$, où c représente la capacité constante du collecteur (798). Sur le conducteur transversal on place un pendule E (électromètre de Henley, fig. 648), dont le support conducteur repousse une tige d'ivoire, mobile, électrisée comme lui et terminée par une balle de sureau. La déviation de la tige, lue sur un cadran, croît avec la charge et par conséquent avec le potentiel.

Débit. — *Le débit d'une machine est la quantité d'électricité que peut fournir le collecteur par seconde.* Il pourrait être mesuré par le nombre des étincelles qu'on tirerait du collecteur en en approchant à une distance déterminée un conducteur relié au sol. Le débit ne dépend ni de la grandeur ni de la durée de la pression des coussins sur le disque pourvu que le contact soit bien assuré⁽²⁾. Il est proportionnel à la hauteur des coussins et ne dépend pas de leur largeur (la hauteur augmente le nombre des points de contact, la largeur augmente la durée du contact). Il dépend de la nature de la surface frottante : on recouvre habituellement les coussins d'or mussif (bisulfure d'étain) où d'amalgame d'étain réduit en poudre. Le débit ne dépend ni de la capacité du conducteur ni du milieu ambiant. Le débit est proportionnel à la vitesse de rotation du disque ; il se produit donc la même quantité d'électricité à chaque tour.

Limite de la charge. — La limite de la charge est atteinte quand le potentiel du collecteur est devenu assez élevé pour qu'une décharge

(1) L'électricité du disque qui passe en face des pointes et agit sur elles par influence, est à peu près entourée par les peignes, et, comme dans le cas de l'influence à l'intérieur d'un conducteur fermé (781), l'électricité enveloppée passe au collecteur, quelle que soit la charge de celui-ci.

(2) Le frottement n'est pas la cause de l'électricité comme il peut être la cause de la chaleur : la production d'électricité paraît due ici au *simple contact de deux substances différentes* ; le frottement a pour objet d'établir un meilleur contact entre un plus grand nombre de particules.

eclate entre les peignes et les coussins. La longueur de l'étincelle entre deux conducteurs augmentant avec leur différence de potentiel, le potentiel limite du collecteur sera plus grand sur une machine à grand diamètre où la distance entre les conducteurs et les coussins est plus grande. Cette limite est rarement atteinte, car il arrive ordinairement un moment où la déperdition en un temps donné par l'air et l'humidité superficielle des supports, est égale à la quantité d'électricité que produit dans le même temps le jeu de la machine ; le potentiel cesse alors de croître. On recule cette limite pratique en vernissant à la gomme laque les supports de verre pour les rendre moins hygrométriques, et en les frottant avec des linges secs et chauds afin de leur enlever toute trace d'humidité.

Quantité d'électricité des décharges. — La quantité d'électricité qui s'écoule dans une décharge est cv , c capacité du collecteur, v différence de son potentiel avec celui du sol. Comme v est fixe pour une étincelle de longueur déterminée, *la quantité d'électricité de la décharge est proportionnelle à la capacité du collecteur.* Si la capacité du collecteur est faible, les étincelles qu'on en tire avec un conducteur non isolé maintenu à une distance d sont grêles et nombreuses. Si l'on augmente la capacité, il faudra pour une même vitesse de rotation ou un même débit, plus de temps pour porter le collecteur au potentiel qui détermine la décharge à la distance d , et le nombre des décharges en un même temps diminuera ; mais les étincelles seront plus bruyantes et plus nourries.

Autrefois, pour augmenter la capacité du collecteur, on accroissait ses dimensions et on le reliait à de gros cylindres métalliques suspendus par des fils de soie ; actuellement, on met le collecteur en communication avec une des armatures d'un condensateur (829) dont l'autre armature va au sol.

Source de l'énergie électrique des collecteurs de la machine à frottement. — Par le *contact*, une différence de potentiel s'est établie entre le cuir et le verre, et les surfaces en regard ont pris des charges contraires. Ces charges sont très voisines comme elles le seraient sur un condensateur à lame isolante très mince, et elles se neutralisent sensiblement. Par la rotation, la charge du verre se trouve soustraite à l'influence de celle des coussins et son potentiel augmente. Il faut dépenser du travail pour éloigner les masses positives des masses négatives et *vaincre la force d'attraction*. C'est par cette dépense de travail (807) que les masses positives prennent un potentiel supérieur à celui du sol : il est la source de l'énergie électrique des conducteurs. *Le travail dépensé pour vaincre le frottement n'est pas converti en énergie électrique ; il est dépensé en pure perte.*

MACHINES A INFLUENCE

L'humidité de l'atmosphère rend irrégulier le fonctionnement des machines à frottement; en outre, leur débit est bien moindre que celui des machines à influence.

816. Machine de Holtz. — Description (fig. 650). — Un plateau de verre mince R, plein, verni à la gomme laque sur ses deux faces, tourne rapidement dans son plan autour d'un axe horizontal entre un

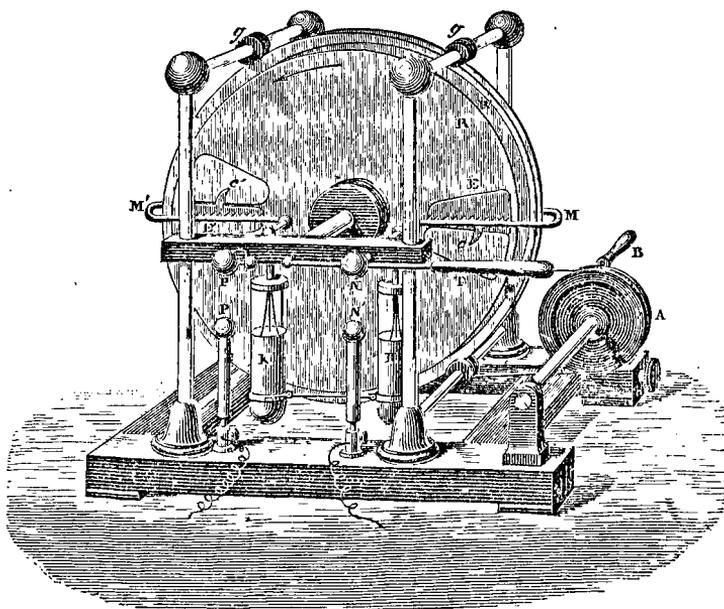


Fig. 650.

plateau de verre fixe et un double système de peignes et de conducteurs métalliques M et M'. La plaque fixe R', verni à la gomme laque et d'un diamètre un peu plus grand que le plateau mobile, est percé en son centre d'un trou circulaire qui laisse passer l'axe de rotation du plateau mobile. De plus, deux fenêtres sont pratiquées aux extrémités d'un même diamètre horizontal; sur chacune d'elles est collée une bande de papier E ou *armature* terminée dans le même sens par une pointe en carton c ou c' qui fait saillie dans la

fenêtre. Le plateau fixe sert uniquement de support isolant aux deux armatures.

A la hauteur des fenêtres, en face des parties pleines des armatures, se trouvent les peignes métalliques. Ces peignes sont fixes et reliés par des tiges métalliques à des boules de décharge entre lesquelles jaillissent des étincelles lorsque l'appareil est en marche.

Amorçement. — Pour faire fonctionner l'appareil, on approche d'abord au contact les boules de décharge, de façon que les deux peignes soient en communication; puis, faisant tourner le plateau mobile de la pointe à la base des armatures, on électrise l'une des armatures par contact avec un corps électrisé tel qu'une plaque d'ébonite frottée. Bientôt la machine s'amorce; on le reconnaît au bruissement des électricités qui s'écoulent par les pointes des armatures et par les peignes; on peut dès lors éloigner la plaque d'ébonite et séparer les boules des excitateurs. Des étincelles jaillissent sans interruption entre les boules, tant que l'on fait tourner le plateau mobile.

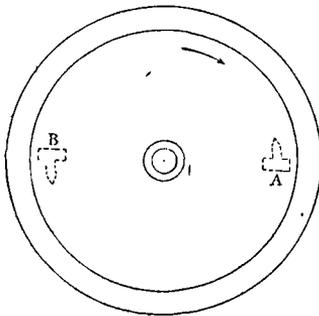


Fig. 651.

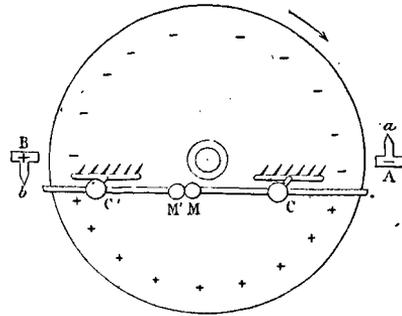


Fig. 652.

Explication (fig. 651). — L'armature A, chargée négativement par l'ébonite, agit par influence sur les conducteurs CC', tire du peigne C de l'électricité positive, qui se porte sur la surface inférieure du disque mobile et y adhère à cause de la mauvaise conductibilité du verre. L'électricité négative, repoussée, s'écoule par C' sur la partie supérieure du disque mobile. L'électricité positive du plateau mobile est transportée devant la pointe b où elle est communiquée par influence à l'armature B (1). Cette électricité posi-

(1) Un conducteur isolé, terminé par une pointe dirigée vers un corps électrisé, se charge par influence de la même électricité que ce corps (789).

Les armatures A et B ont été rejetées latéralement dans la figure 652 pour éviter toute confusion; elles sont en réalité placées derrière le disque mobile, comme l'indique la figure 651.

tive de l'armature agit sur le peigne et attire l'électricité négative de C' qui charge négativement la partie supérieure du disque mobile. Cette électricité négative du plateau mobile est ensuite communiquée par l'effet de la pointe a à l'armature A dont elle augmente la charge positive. Ces actions se continuent jusqu'à ce que les armatures aient acquis leur plus grande charge. La machine est amorcée et les armatures sont chargées d'électricités contraires.

Fonctionnement régulier. — Dans l'obscurité, la pointe a et les pointes du peigne C' sont terminées par des *points brillants* qui accompagnent l'écoulement d'électricité négative. L'extrémité b et les pointes du peigne C laissent écouler de l'électricité positive suivant

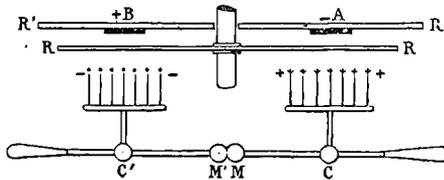


Fig. 653.

de longues *aigrettes* (fig. 653). Ces aigrettes commencent par un pédicule, puis s'épanouissent en une gerbe peu visible.

Des deux électricités séparées par influence sur le peigne C, l'électricité positive s'est écoulee par les pointes, et l'électricité négative se rend sur M; de même, M' reçoit de l'électricité positive; ces électricités se réunissent puisque M et M' sont en contact.

Quand on les sépare, les boules M et M' se montrent électrisées en sens contraires, et, si leur distance n'est pas trop grande par rapport à leur charge, il s'en échappe sans discontinuer des étincelles.

Débit. — Comme dans une machine de Ramsden, le débit est proportionnel à la vitesse de rotation, mais ici, à cause de l'absence de frottement, la vitesse peut être beaucoup plus grande.

Limite de la charge. — La longueur de l'étincelle ne pouvant pas dépasser la distance des deux peignes, la différence de potentiel maximum est celle qui correspond à cette distance.

Quantité d'électricité des décharges. — Avec des collecteurs de petites dimensions, on obtient des étincelles très nombreuses et grêles, une décharge ayant lieu dès que les collecteurs ont acquis une différence de potentiel capable de vaincre la résistance de l'air qui sépare les boules, (la tige T permet de faire varier cette distance en glissant dans la sphère N) (fig. 650). En effet, d'après la relation $q = cv$,

pour une valeur déterminée de v , la valeur de q sera petite et se reproduira très vite si la capacité c est faible.

On remplace le flux d'étincelles par des étincelles nourries et espacées en augmentant la capacité des collecteurs, ce que l'on fait en reliant chaque collecteur à l'armature interne d'une bouteille de Leyde. Les deux armatures externes H et K des deux bouteilles sont réunies entre elles métalliquement (fig. 654).

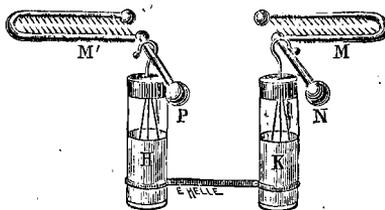


Fig. 654.

Les électricités s'accumulent dans ces bouteilles jusqu'à ce qu'elles aient acquis sur les boules en regard des collecteurs la densité nécessaire pour vaincre la résistance de la couche d'air qui les sépare, et il faut pour cela un temps d'autant plus long que la capacité des bouteilles est plus grande. Une étincelle éclate alors avec bruit entre les deux boules, tandis que les électricités des armatures externes devenues libres se réunissent à travers la bande métallique qui les relie. Cette association de deux bouteilles de Leyde en cascade (832) partage entre deux lames isolantes la différence du potentiel des électrodes de la machine de Holtz, ce qui diminue les risques de rupture.

Causes de désamorçement. — Les charges des armatures sont entretenues par les électricités contraires que déversent les peignes et que transporte le plateau mobile. Les armatures se déchargent si les flux d'électricité des peignes viennent à être suspendus; leur décharge n'est pas très rapide en raison de la faible conductibilité du papier, toutefois la machine se désamorce après quelques instants. C'est ce qui arrive quand on cesse de faire tourner le disque mobile.

Le désamorçement peut encore survenir même pendant la rotation, si la distance des boules devient trop grande pour qu'il y ait étincelle. Si les électricités de MC et de M'C' ne sont pas alors enlevées à mesure qu'elles se produisent, MC garde son électricité négative et finit par acquérir un potentiel égal à celui de A, et A n'exerce plus d'influence sur le peigne. Le plateau mobile ne se charge plus, a se décharge, puis MC par le peigne. Il en est de même pour b et M'C' (fig. 652).

817. Machine de Wimshurst. — **Description.** — Elle se compose de deux disques de verre ou d'ébonite, R et S, de même rayon, qu'une manivelle B fait tourner *en sens inverse* autour d'un axe passant par leur centre. A la face antérieure du disque R et à la face postérieure du disque S sont collés des *secteurs d'étain* offrant un

léger relief et sur lesquels appuient des balais en fil de laiton *b* portés par deux conducteurs diamétraux. Ces conducteurs font entre eux et avec l'horizontale un angle d'environ 60° (fig. 655).

Deux peignes métalliques en fer à cheval *M* et *M'* embrassent les deux disques aux extrémités de leur diamètre horizontal. Ils communiquent avec deux tiges métalliques terminées par des boules de

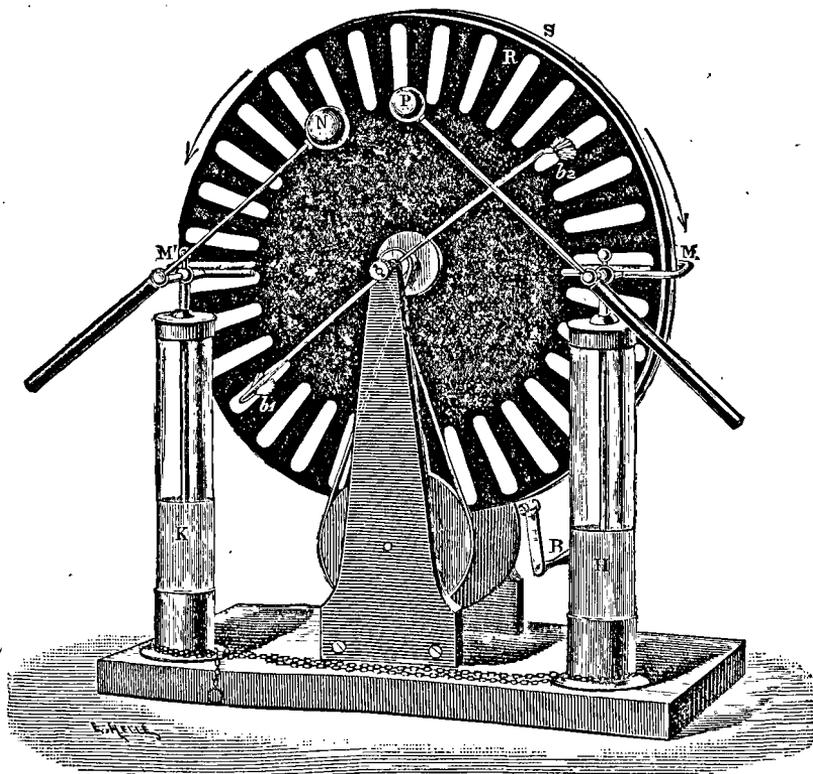


Fig. 655.

décharge *P* et *N* qu'on peut écarter ou rapprocher à volonté l'une de l'autre.

Pour amorcer la machine, il suffit de faire tourner les disques en maintenant en contact les deux boules jusqu'à ce qu'on entende un bruissement caractéristique. Si l'on éloigne alors les boules, des étincelles jaillissent entre elles.

Le signe des pôles se reconnaît aux lueurs violacées (677) que l'on voit sortir des pointes des peignes dans l'obscurité. Au peigne *M* qui communique avec le pôle positif et d'où s'écoule du fluide négatif, on

voit des *points brillants*; du fluide positif s'écoule en *aigrettes* du peigne M' qui communique avec le pôle négatif.

La figure 656 représente une machine de Wimshurst dont les plateaux R et S seraient transparents. Cela permet de montrer les cordons C et C' enroulés *en sens inverse* sur les poulies, ainsi que les balais b_3 et b_4 qui frottent sur le plateau postérieur S.

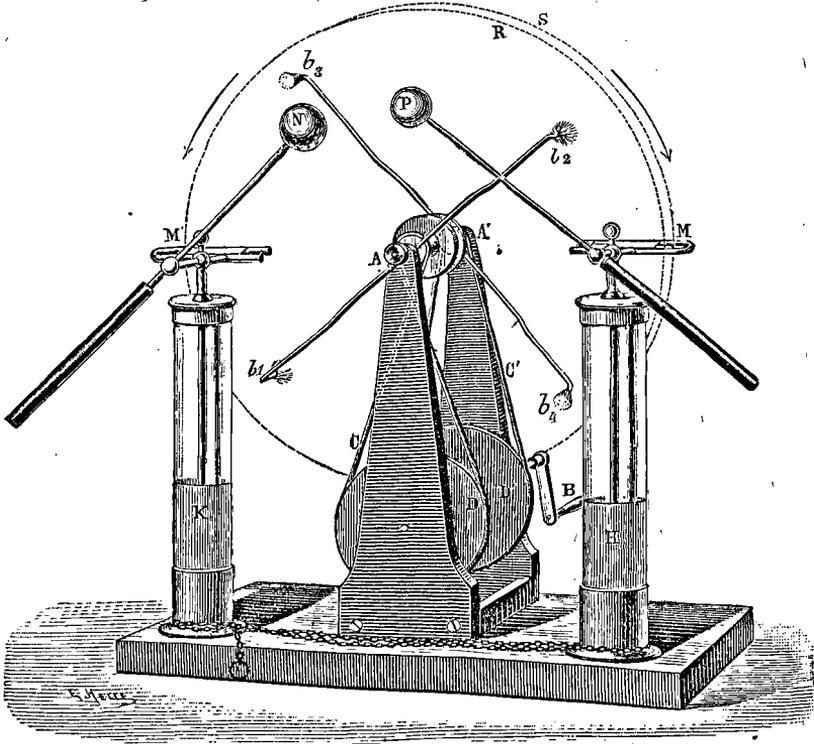


Fig. 656.

Potentiel maximum. — La longueur de l'étincelle ne pouvant pas dépasser la distance des deux peignes, la différence de potentiel maximum est celle qui correspond à cette distance.

Débit. — Le débit se mesure par le *nombre des étincelles* qui jaillissent en un temps donné entre les boules quand elles sont à une distance déterminée. Le débit est proportionnel à la vitesse de rotation.

Quantité d'électricité des décharges. — Il suffit de répéter ici

textuellement ce qui a été dit sur le même sujet à propos de la machine de Holtz.

Théorie du fonctionnement. — Pour la commodité de la figure, nous supposons que les disques sont remplacés par deux cylindres tournant en sens inverse l'un en dedans de l'autre, et nous représenterons une coupe perpendiculaire à l'axe (fig. 657). Les balais b_1 b_2 appuient sur les secteurs d'étain du cylindre intérieur, et les balais b_3 b_4 sur les secteurs du cylindre extérieur.

Imaginons qu'un des secteurs m du cylindre intérieur a gardé une petite charge négative ; en tournant vers la gauche, cette charge va passer devant

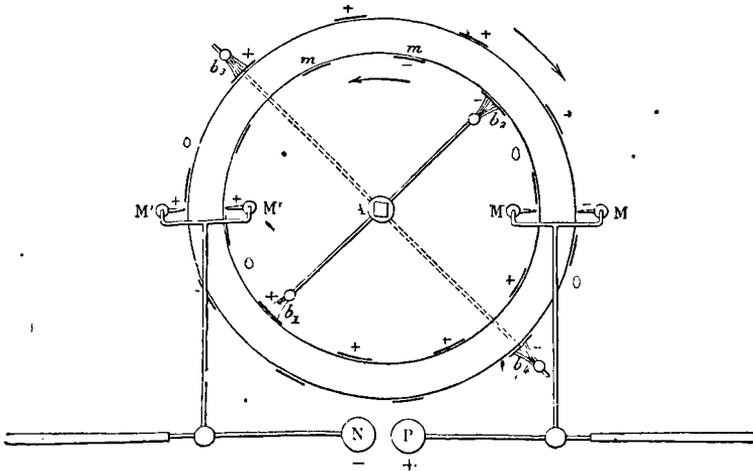


Fig. 657.

le balai b_3 , agir sur lui par influence et en tirer de l'électricité positive que portent vers la droite les secteurs qui touchent successivement b_3 . Cette électricité positive arrivant en regard du balai b_2 , agit sur lui par influence, et le secteur qui est en contact avec b_2 se charge négativement. En même temps, les secteurs qui touchent b_1 se chargent positivement, et de l'électricité positive est transportée de gauche à droite par les secteurs qui touchent successivement b_1 . La charge induite de b_2 est accompagnée d'une charge contraire de l'extrémité b_4 du même conducteur.

Les électricités amenées devant les peignes sont neutralisées d'une part par l'électricité positive qu'elles soutirent par influence du peigne M' , et d'autre part par l'électricité négative qui s'écoule de même du peigne M . Dans le trajet de M en b_4 , les secteurs extérieurs sont neutres ; dans le trajet de M' en b_1 , ce sont les secteurs intérieurs. On voit sur la figure qu'après avoir perdu leurs charges en passant entre les peignes, les secteurs prennent plus loin des électricités contraires par l'action des balais.

Les électricités positive et négative développées dans les conducteurs P et N qui prolongent les peignes se recombinaient à travers les boucles de

décharge. Si l'on écarte ces boules, on obtient des étincelles qui jaillissent par intermittences.

Source mécanique de l'énergie électrique. — Dans la machine de Ramsden, le travail converti en énergie électrique n'est qu'une faible portion du travail consommé, car le frottement des coussins et du disque dépense *en pure perte* la majeure partie du travail.

Dans une machine de Holtz, le plateau de verre mobile est en partie chargé d'électricité positive qu'il porte à un peigne déjà chargé positivement, et en partie d'électricité négative qu'il porte à un peigne déjà négatif. Les répulsions qui s'exercent entre ces électricités de même nature tendent à faire tourner le plateau en sens inverse de sa rotation normale; il faut dépenser du travail pour vaincre ces répulsions. On sent bien en effet qu'il faut *un effort plus grand* pour faire tourner une machine de Holtz quand elle fonctionne que quand elle ne fonctionne pas.

Quand on fait tourner une machine de Wimshurst, on sent encore qu'il faut un effort plus grand pour faire mouvoir les disques lorsque la machine produit de l'électricité que lorsqu'elle n'en produit pas; ici encore, l'énergie électrique a sa source dans le *travail mécanique qu'il faut dépenser pour vaincre l'attraction mutuelle des organes chargés d'électricités contraires*.

818. Réversibilité des machines à influence. — Si l'on réunit aux pôles d'une forte machine à influence en activité les pôles d'une machine plus petite (débarrassée de ses courroies pour être plus mobile), le disque de cette dernière est entraîné et se met à tourner: il obéit aux réactions que les électricités de ses peignes exercent sur les électricités qu'ils versent sur lui. Les collecteurs de la première machine se déchargent à mesure qu'ils font tourner la deuxième. On peut dire que si la première machine convertit du travail en énergie électrique, la seconde convertit de l'énergie électrique en travail et peut servir de moteur.

Nous étudierons plus loin les effets des décharges des machines électrostatiques (833).

ÉLECTROPHORE

819. L'électrophore est une machine électrique à influence composée de deux disques horizontaux superposés: 1° un disque d'ébonite

ou un *gâteau de résine* S bien plan, coulé dans un moule conducteur; 2° un plateau de bois C recouvert d'une feuille d'étain et soutenu en son centre par une tige isolante. Le diamètre du plateau est un peu plus petit que celui du gâteau (fig. 658).

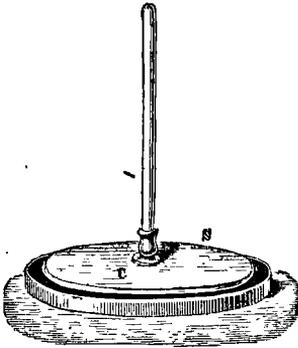


Fig. 658.

Fonctionnement. — On charge le gâteau de résine d'électricité négative en le battant avec une peau de chat, et sur la résine électrisée on pose le plateau métallique. Par suite de l'interposition d'une très mince couche d'air entre la résine et l'étain, l'électricité négative de la résine n'est pas transmise par contact, mais elle décompose *par influence* l'électricité neutre du plateau en électricité positive attirée sur la surface inférieure et en électricité négative repoussée sur la surface supérieure.

Si le plateau était alors soulevé, il reviendrait à l'état neutre, car ses deux électricités soustraites à l'influence se recombineraient.

Avant de soulever le plateau, on le touche avec le doigt (fig. 659). L'électricité négative s'écoule dans le sol, et il ne reste sur le plateau

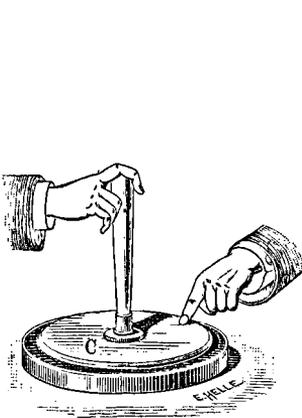


Fig. 659.

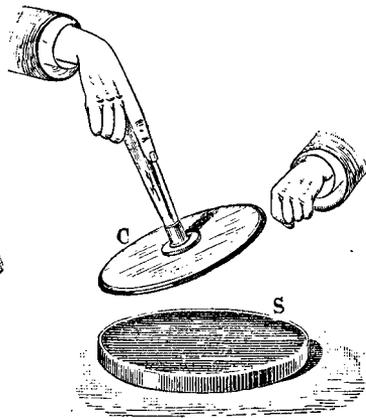


Fig. 660.

que l'électricité positive retenue par la charge négative de la résine. Le doigt étant enlevé et le plateau étant ensuite soulevé par sa tige isolante, son électricité positive cesse de subir une attraction, elle se

répartit librement sur les deux faces et peut exercer une influence sur un conducteur. On en tire en effet une vive étincelle avec le doigt (fig. 660). Comme on peut le constater avec un électroscope, à mesure qu'on soulève le plateau, son potentiel s'est élevé à partir de la valeur zéro (potentiel du sol), qu'il avait au moment où il a été touché avec le doigt, et il a acquis une valeur v après avoir été soulevé.

La résine a gardé son *électricité*; son rôle s'est borné à décomposer par influence l'électricité neutre du plateau. En replaçant le plateau sur le gâteau de résine, *en le touchant avec le doigt, puis en le soulevant* avec la tige isolante, on peut en tirer une nouvelle étincelle; on recommencera tant que la résine sera chargée. Par un temps sec, la résine reste aisément chargée pendant plusieurs jours ⁽¹⁾.

Comme toute machine électrique, l'électrophore pourrait fournir les deux *éлектриités*. En effet, si au lieu de toucher le plateau avec le doigt quand on vient de le poser sur la résine, on le mettait en communication avec un conducteur, ce conducteur se chargerait d'électricité négative; en mettant ensuite le plateau en communication avec un autre conducteur quand il a été soulevé, ce second conducteur se chargerait d'électricité positive.

Source mécanique de l'énergie électrique de l'électrophore. — Dans l'électrophore, une quantité d'électricité, une fois produite sur la résine, agit *par influence*, sans perte ni gain. Elle n'est donc pas la source de l'énergie électrique des étincelles tirées du plateau.

Quand on soulève le plateau qui a été posé sur la résine et mis en communication avec le sol, outre le travail nécessaire pour élever son poids, on dépense un travail mécanique pour *vaincre les forces attractives qui s'exercent entre les électricités contraires de la résine et du plateau*. Ce dernier travail est appliqué à élever la charge électrique positive du plateau à un potentiel v supérieur à celui du sol et se transforme en énergie potentielle; cette énergie disparaît dans la décharge, lorsque l'électricité retombe du potentiel v au potentiel du sol. Quand on redescend le plateau déchargé, le travail de la pesanteur est seul restitué.

En répétant les mêmes opérations, on développe à chaque fois une

(1) La résine reste surtout chargée si elle a été coulée dans un moule conducteur communiquant avec le sol. En effet, l'électricité négative de la résine a agi par influence sur l'électricité neutre du moule, a repoussé l'électricité négative dans le sol et attiré l'électricité positive qui adhère à la face inférieure du gâteau. Cette électricité retient l'électricité négative de la face supérieure.

charge électrique, et elle est portée au potentiel v par la fraction du travail mécanique qui disparaît dans le déplacement du plateau.

Comme source d'électricité, en raison des opérations multiples qu'exige son maniement, l'électrophore est une machine très imparfaite. Toutefois, c'est en cherchant à réaliser mécaniquement les opérations de son fonctionnement qu'on est arrivé graduellement aux puissantes machines à influence actuellement employées.

CONDENSATEURS

820. *Un condensateur est un système de deux surfaces conductrices parallèles ou armatures, séparées par une mince couche isolante (air, ébonite, verre, mica, soufre, paraffine, etc.).*

L'une des armatures, le **collecteur A**, est mise en communication avec l'un des pôles d'une source électrique de potentiel constant; l'autre armature, le **condenseur B**, est relié au sol. L'électricité du collecteur agit *par influence* sur le condenseur, et y *développe une charge contraire à la sienne*. Les électricités contraires des deux armatures exercent l'une sur l'autre une forte attraction qui les accumule sur les surfaces parallèles en regard. Dans ces conditions, la *capacité* du collecteur augmente (**805**), et le collecteur reçoit de la source, en présence du condenseur, une charge beaucoup plus forte que s'il était seul.

821. Théorie. — Condensateur à plateaux. — Pour suivre dans ses détails le phénomène de la condensation, il est commode d'employer un condensateur à armatures mobiles formé de deux plateaux métalliques séparés par un intervalle isolant ⁽¹⁾ (fig. 661). Chacun des deux plateaux porte sur sa surface externe un petit pendule à fil de lin conducteur.

Charge du collecteur seul. — Le condenseur étant éloigné, réunissons le collecteur au pôle positif d'une source électrique S dont le

(1) En intercalant dans cet intervalle une lame de verre I, on évite qu'une étincelle éclate aussi facilement entre les deux plateaux (**823**).

pôle négatif va au sol. Le collecteur prend le potentiel v du pôle positif; quand il est chargé à refus, son pendule a ne monte plus; sa

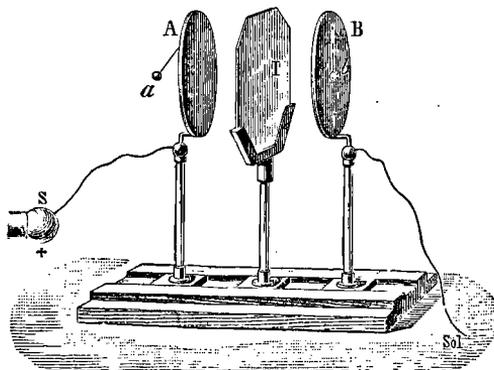


Fig. 661.

charge est alors $q = cv$, c représente la capacité du collecteur soustrait à toute influence.

Charge du collecteur avec condensation. — Supprimons la communication du collecteur avec la source S , et approchons le condensateur relié au sol; le condensateur se charge par influence d'électricité négative, dont la présence fait diminuer le potentiel du collecteur (805); en effet, le pendule a s'abaisse et les feuilles d'un électroscope en communication lointaine avec le collecteur se rapprocheraient. La diminution du potentiel du collecteur correspond à un accroissement de sa capacité, puisque sa charge n'a pas varié: W étant le potentiel actuel, c' la nouvelle capacité⁽¹⁾,

$$q = c'W.$$

Si le collecteur est alors de nouveau réuni à la source, il reçoit une nouvelle charge qui le ramène au potentiel v de la source; le pendule a remonte à la même hauteur que dans la charge primitive en l'absence du condensateur. La charge actuelle est $q' = c'v$; elle est supérieure à q , puisque c' est supérieur à c .

Écartement des plateaux. — Les deux plateaux renferment à ce moment de grandes quantités d'électricités, car si l'on supprime les

(1) Si le condensateur n'est pas relié au sol, son action a encore pour effet d'accroître la capacité du collecteur (805), mais dans une proportion beaucoup moindre.

communications avec la source et avec le sol, et que l'on écarte les deux plateaux de manière à ce qu'ils ne s'influencent plus : 1° le collecteur reprend sa capacité première c , et la charge positive $q' = cv'$ élève le potentiel à une valeur v' bien supérieure à v : le pendule a diverge en effet très fortement ; 2° sur le condenseur, une charge négative considérable se distribue sur les deux faces et porte son potentiel à une valeur négative élevée en valeur absolue, car le pendule b diverge fortement.

Les charges du collecteur et du condenseur sont de signes contraires, car un bâton de résine attire a et repousse b .

Égalité des charges des deux plateaux. — Nous venons de voir qu'après la condensation le condenseur était chargé ; cependant, lorsque les plateaux sont encore rapprochés, le pendule du condenseur ne diverge pas, alors même que la communication avec le sol vient d'être supprimée. Cela prouve que les charges du collecteur et du condenseur neutralisent leurs effets sur un point quelconque de l'armature extérieure ; comme ces charges ne peuvent être que parallèles et très voisines, elles doivent être *sensiblement égales* si les plateaux sont très minces.

Dans le cas où le condenseur *entoure* complètement le collecteur, la surface interne du condenseur est, d'après le théorème de Faraday, couverte d'une charge négative *exactement égale* à la charge positive du collecteur. Les deux couches intérieures du condensateur fermé sont alors rigoureusement sans action à l'extérieur, l'armature externe formant écran (783).

Comme les deux couches intérieures d'un condensateur fermé ont une distribution indépendante de toute électricité extérieure (784), la densité électrique doit être uniforme sur deux armatures sphériques concentriques ; elle est également uniforme sur deux grandes armatures planes et parallèles électrisées.

La divergence du pendule a du collecteur indique que la charge du collecteur n'est pas entièrement neutralisée par la charge contraire du condenseur. On appelle *électricité libre* la partie de la charge du collecteur qui agit à l'extérieur et repousse le pendule.

Force condensante. — On appelle *force condensante* le rapport $\frac{q'}{q}$ des charges du collecteur avec et sans condensation.

D'après les relations $q' = c'v = cv'$ et $q = cv$,

$$\frac{q'}{q} = \frac{c'}{c} = \frac{v'}{v}.$$

Capacité. — Le condensateur est au potentiel du sol, c'est-à-dire au potentiel zéro.

c'v est la charge du collecteur pour une différence de potentiel *v* entre ses armatures. La capacité *c'* du collecteur est sa charge pour une différence de potentiel entre ses armatures égale à l'unité.

Si le collecteur est mis en communication avec l'un des pôles d'une machine électrique au potentiel v_1 , et le condensateur avec l'autre pôle au potentiel v_2 , les deux armatures prendront les mêmes potentiels que les deux pôles de la source électrique; leur différence de potentiel sera $v_1 - v_2$, et la charge $c'(v_1 - v_2)$.

Mesure de la capacité. — Le condensateur communiquant avec le sol, on détermine la capacité *c'* du collecteur chargé en le mettant en communication lointaine avec un conducteur de capacité connue à l'état neutre (803), par exemple avec une sphère de rayon *r*.

Écrivons que la charge du collecteur se répartit sur le collecteur et sur la sphère proportionnellement à leurs capacités;

l'équation $c'v = (c' + r)v_1$ donnera $\frac{c'}{r}$ par la mesure de $\frac{v}{v_1}$.

Le collecteur du condensateur constitue un réservoir d'électricité de grande capacité qui peut servir de source sensiblement constante dans beaucoup de circonstances.

Conditions qui font varier la capacité. — Si la surface du collecteur varie seule, tandis que l'épaisseur et la nature de la lame isolante ne changent pas, la capacité du collecteur est *proportionnelle à sa surface*. Toutes choses égales d'ailleurs, pour une épaisseur uniforme de la lame isolante, la capacité du collecteur *varie en raison inverse de cette épaisseur*⁽¹⁾, d'où il résulte que la charge par unité de surface peut être considérable, même avec une faible différence de potentiel des armatures, si l'épaisseur est très petite (828).

822. Charge d'un condensateur. — On charge un condensateur en mettant ses deux armatures en communication avec les deux collecteurs d'une source d'électricité, pile ou machine électrique.

La durée de la charge d'un condensateur avec une machine élec-

(1) La capacité d'un condensateur à lame isolante, d'épaisseur uniforme, varie en raison inverse de l'épaisseur; on démontre, et nous l'admettons, que dans le cas d'une lame d'air elle est représentée par $\frac{S}{e}$, la surface des armatures en regard étant *S* et leur distance *e*.

trique croît avec la capacité du collecteur et varie en raison inverse du débit de la machine.

823. Rôle de la lame isolante. — La couche isolante ne joue pas dans un condensateur un rôle passif. En effet, un condensateur à armatures mobiles et à lame d'air ayant été chargé pendant que le condenseur était relié au sol, si l'on vient à glisser entre les deux armatures une lame de *verre* ou d'*ébonite*, le pendule du collecteur tombe, ce qui montre que le potentiel du collecteur a diminué ou que *sa capacité a augmenté*. Le pendule remonte si on enlève la feuille isolante.

La capacité d'un condensateur à lame de verre peut être égale à cinq ou six fois la capacité d'un condensateur semblable à lame d'air, ou encore il a la même capacité qu'un condensateur à air dont la lame d'air est cinq ou six fois plus mince.

D'après l'équation $q' = c'(v_1 - v_2)$, la charge augmente proportionnellement à la différence de potentiel sur les deux armatures. L'attraction des deux électricités en regard peut devenir assez forte pour qu'une décharge ait lieu directement à travers la lame isolante; aussi l'épaisseur de la lame isolante doit-elle augmenter avec la différence de potentiel. Toutefois, à épaisseur égale, les isolants solides offrent à l'étincelle une plus grande résistance que l'air, ce qui permet d'établir sans décharge entre les deux armatures d'un condensateur à isolant solide une différence de potentiel notablement plus grande qu'avec l'air.

Pour un condensateur à isolant solide, c' est donc plus grand que pour un condensateur à lame d'air de même épaisseur, $v_1 - v_2$ peut aussi être augmenté; pour ces deux raisons, la charge $c'(v_1 - v_2)$ sera susceptible d'être considérablement accrue.

Les condensateurs usuels sont des condensateurs où la lame isolante est en verre, ou en mica, ou en papier paraffiné.

824. Pouvoir inducteur spécifique. — Le pouvoir inducteur spécifique d'un isolant est le nombre K par lequel on doit multiplier la capacité d'un condensateur à lame d'air pour obtenir la capacité d'un condensateur où l'air serait remplacé par *la même épaisseur* de l'isolant.

c' étant la capacité d'un condensateur à lame d'air, $c'K$ est la capacité d'un condensateur à lame isolante de même épaisseur. Si $c'v$ est la charge d'un condensateur à lame d'air, $c'Kv$ est la charge du

condensateur à lame isolante de même épaisseur, pour une même différence v de potentiel des armatures.

DÉCHARGE D'UN CONDENSATEUR

825. Décharge par contacts successifs. — L'expérience de la décharge par contacts successifs se fait ordinairement avec un large carreau de verre V sur les deux faces duquel ont été collées deux feuilles d'étain E jusqu'à une distance du bord égale à la largeur de la main (fig. 662). Un fil de lin portant une balle de sureau a été collé par son extrémité supérieure sur chaque face du carreau. Ce condensateur venant d'être chargé à la façon ordinaire et les armatures étant isolées, le pendule du collecteur diverge, le pendule du condensateur reste vertical. On touche le collecteur : son électricité libre s'écoule et son pendule retombe; la partie de l'électricité négative qui était neutralisée par cette électricité écoulée devient libre à son tour et le pendule du condensateur s'élève; ce pendule retombe quand on touche le condensateur et l'autre diverge de nouveau. En touchant alternativement les deux armatures, on peut finir par décharger complètement le carreau électrique.

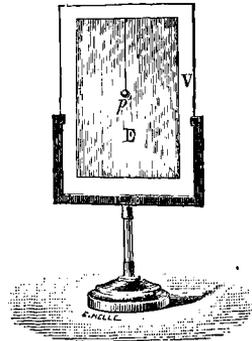


Fig. 662.

826. Décharge rapide d'un condensateur. — Une décharge rapide a lieu en établissant une communication conductrice entre les deux armatures. Si l'on touche avec une main l'une des armatures et avec l'autre main l'autre armature, les électricités se réunissent à travers le corps de l'opérateur qui ressent une secousse parfois très forte. On évite la décharge à travers le corps en réunissant les armatures par un excitateur.

Un *excitateur* est formé de deux arcs en laiton munis de manches isolants, réunis par une charnière qui permet de les écarter plus ou moins; ils portent chacun une boule à leur extrémité (fig. 663). On touche l'une des armatures du condensateur avec l'une des boules et on approche l'autre boule de l'autre armature.

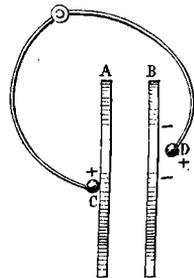


Fig. 663.

Avant le contact⁽¹⁾, à une distance invariable pour une même charge, une vive étincelle jaillit avec un bruit clair. Cette étincelle accompagne l'égalisation de potentiel des deux armatures et le transport d'électricité positive de l'armature au potentiel le plus élevé vers l'autre.

Étincelles résiduelles. — Un condensateur à lame isolante solide n'est pas ramené à l'état neutre par une seule décharge, même après que l'on a eu soin d'établir un instant le contact des deux boules de l'excitateur avec les deux armatures. En réunissant de nouveau après quelque temps les armatures par l'excitateur, on obtient une deuxième étincelle plus faible, puis après quelque temps encore on en obtient une troisième... Ces étincelles sont dites *résiduelles*.

827. L'électricité se porte sur la lame isolante. — Les électricités contraires d'un condensateur s'appliquent sur la lame isolante. Un condensateur à lame de verre et à plateaux mobiles étant chargé et les plateaux étant d'abord en contact avec la lame de verre, si l'on vient à éloigner les deux plateaux, leurs pendules ne divergent que faiblement. On touche alors avec la main pour les décharger les deux plateaux écartés, puis on rétablit leur contact avec la lame de verre. En réunissant à ce moment les deux plateaux par l'excitateur, on obtient une vive étincelle. Les électricités adhéraient donc en grande partie au verre.

Cette expérience donne l'explication des étincelles résiduelles, en admettant que non seulement les électricités se portent sur la lame isolante, mais qu'elles pénètrent jusqu'à une certaine profondeur. La mauvaise conductibilité du verre ne les laisse pas se mouvoir assez vivement pour se réunir complètement dans une première décharge.

(1) On se rend compte d'après la décharge par contacts successifs de la façon dont les électricités peuvent acquérir des densités assez grandes sur la boule de l'excitateur et sur l'armature, pour donner lieu à une pression électrostatique suffisante et à une étincelle. L'électricité négative attirée sur le condensateur par l'influence de la boule D rend libre de l'électricité du collecteur qui vient sur D, accroît l'action sur l'électricité négative du condensateur, ce qui laisse libre une nouvelle charge positive, et ainsi de suite.

La production de l'étincelle diminue la résistance de l'air par l'élévation de sa température et par le transport de particules métalliques entre les deux surfaces conductrices. L'air traversé par l'étincelle joue le rôle de conducteur avant que le contact ait été complètement établi et facilite la réunion des électricités.

ÉLECTROSCOPE CONDENSATEUR

828. Définition. — C'est un électroscope à feuilles d'or dont la boule est remplacée par un disque métallique sur lequel s'applique un second disque semblable soutenu par un manche isolant. Les deux faces en regard des deux disques sont *séparément* recouvertes d'une couche de vernis à la gomme laque: les deux couches de vernis forment la lame isolante d'un condensateur ayant les disques pour armatures.

Usage. — L'électroscope d'un condensateur sert à mettre en évidence et à comparer des *potentiels très faibles dus à des sources continues* telles que des éléments de pile. On met en contact la face

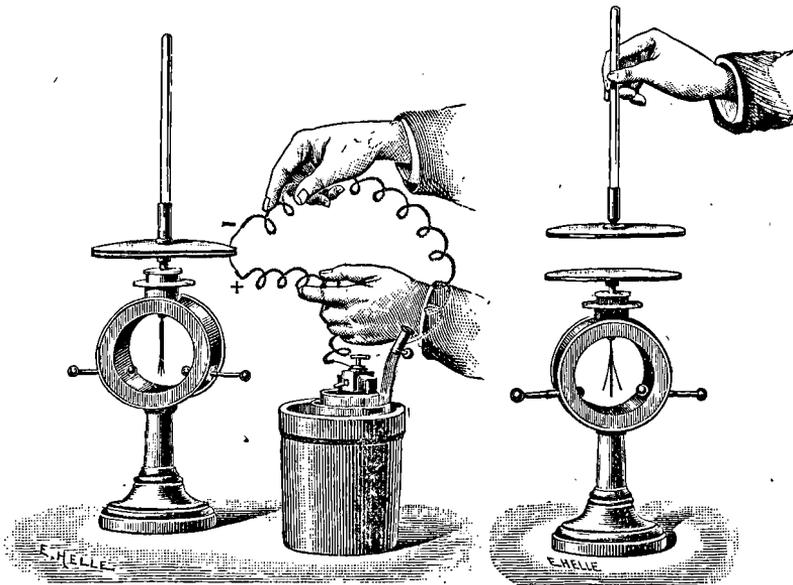


Fig. 664.

Fig. 665.

inférieure du disque inférieur avec l'un des pôles de la source à étudier, tandis que la face supérieure du disque supérieur est mise en communication avec l'autre pôle⁽¹⁾ (fig. 664). Il y a condensation ;

(1) Ou avec le sol si le deuxième pôle est lui-même relié au sol.

on soulève alors le disque supérieur (fig. 665)⁽¹⁾ ; la charge du disque inférieur devient libre et se répand sur toute la surface du disque, de la tige et des feuilles. Une source qui n'aurait donné à un électroscope ordinaire qu'un écartement inappréciable des feuilles d'or, détermine, après la condensation, une divergence des feuilles mesurable.

On reconnaît la nature de l'électricité du disque inférieur comme sur un électroscope ordinaire.

En mettant le disque supérieur en contact avec le bouton d'un électroscope ordinaire, on constate qu'il est chargé et que sa charge est de signe contraire à celle du disque inférieur.

Explication. — Désignons par c la capacité du disque inférieur soustrait à l'influence du disque supérieur, et par q la charge qu'il prendrait en le faisant communiquer avec une source de potentiel v ,

$$q = cv;$$

s'il y a condensation, la capacité du disque inférieur devient c' , et sa charge est $q' = c'v$, avec la source de potentiel v .

Quand on a soulevé le disque supérieur, le disque inférieur reprend sa capacité c et sa charge élève son potentiel à v' en se répartissant librement, d'après l'égalité $c'v = cv'$

$$\text{d'où } v' = \frac{c'}{c} v.$$

La force condensante $\frac{c'}{c}$ de l'électromètre condensateur est considérable à cause de l'extrême minceur du vernis isolant.

BOUTEILLE DE LEYDE

829. La bouteille de Leyde est la forme la plus vulgaire des condensateurs (fig. 666). C'est une bouteille en verre mince à goulot étroit. Son bouchon est traversé par une tige de métal qui se termine en haut par un bouton et plonge en bas dans des *feuilles de clinquant*

(1) Comme les électricités contraires se portent sur la lame isolante, il est nécessaire de vernir chacun des deux disques; si, par exemple, le plateau supérieur était seul verni, on emporterait avec lui en le soulevant les électricités condensées, et le plateau inférieur resterait sans charge.

dont la bouteille est remplie (fig. 667). A l'extérieur, sur le fond et sur le pourtour, la bouteille est couverte d'une *feuille d'étain* jusqu'à une certaine distance du goulot. La partie supérieure de la bouteille non recouverte d'étain est vernie à la gomme laque.

Une *jarre* est une bouteille à large goulot (fig. 668) tapissée d'étain à l'intérieur comme à l'extérieur. La tige qui

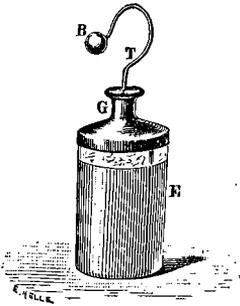


Fig. 666.

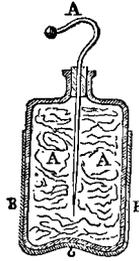


Fig. 667.

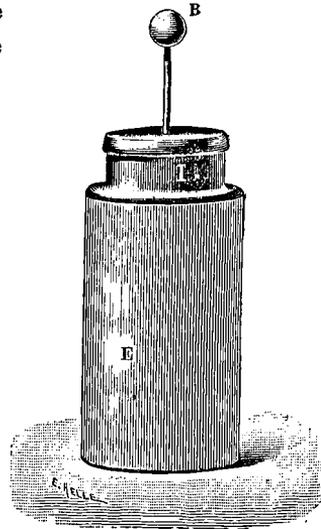


Fig. 668.

traverse le bouchon est droite et se termine par une chaîne qui repose sur l'étain intérieur.

Charge d'une bouteille de Leyde. — Pour charger une bouteille, on met l'armature interne en communication avec l'un des

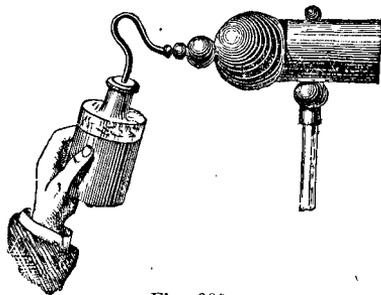


Fig. 669.

collecteurs d'une machine électrique et l'armature externe avec l'autre collecteur⁽¹⁾ (fig. 669). La lame isolante se charge sur ses deux faces d'électricités contraires qui tendent à se réunir par leur attraction

(1) Ou le sol, si ce collecteur est relié au sol.

mutuelle. Si la pression électrostatique devient trop forte, la paroi de verre est percée et la bouteille hors d'usage.

Comme dans tout condensateur dont les armatures sont parallèles et rapprochées, la capacité est proportionnelle à la surface et en raison inverse de l'épaisseur de la lame isolante.

Une bouteille de Leyde différant peu d'un condensateur fermé, les charges des deux armatures sont égales et sans action à l'extérieur.

Décharge par contacts successifs. — Une bouteille de Leyde se prête aussi bien qu'un condensateur à plateaux à diverses expériences sur la décharge par contacts successifs et sur la charge résiduelle

La tige et la panse peuvent porter chacune un pendule. La bouteille étant chargée et placée sur un gâteau isolant, le pendule de la tige se dresse et celui de la panse retombe quand on touche la panse; le pendule de la panse s'élève à son tour et l'autre retombe quand on touche la tige.

Le *carillon de Franklin* est une forme de la décharge par contacts successifs. La tige porte un timbre et la panse communique avec un autre timbre disposé à la même hauteur que le premier. Une balle métallique isolée oscille entre les deux timbres; attirée par le premier qui la charge et la repousse après contact, elle vient toucher le second qui la décharge.

Décharge rapide. — On touche la panse B avec l'une des branches C d'un excitateur, et on approche l'autre branche C' de la tige

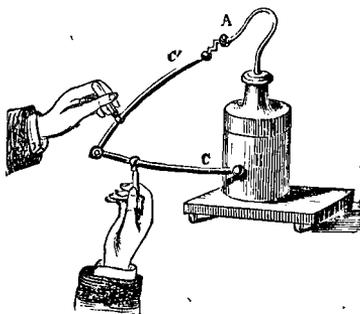


Fig. 670.

A jusqu'au contact (fig. 670). Une étincelle jaillit avant le contact. On obtient des étincelles résiduelles.

Bouteille à armatures mobiles (fig. 671). — L'armature intérieure D est un vase conique en métal qui entre dans un gobelet en verre S; celui-ci est reçu par un vase métallique C constituant l'armature extérieure. Après avoir chargé le condensateur ainsi formé, on le pose sur un gâteau isolant, et on enlève à la main successivement le

vase intérieur, puis le gobelet en verre ; on décharge les deux vases métalliques en les touchant. En remontant la bouteille, on obtient avec

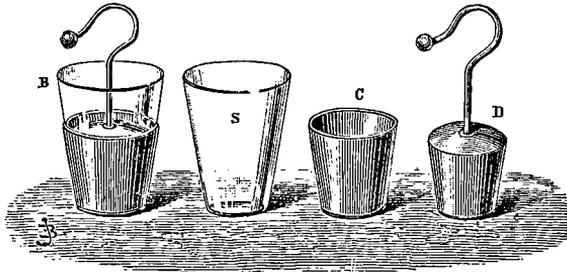


Fig. 671.

l'excitateur une étincelle presque aussi forte que si les deux armatures n'avaient pas été déchargées. Cela prouve bien que *les électricités adhèrent à la lame isolante*.

830. Batterie. — Au lieu d'une bouteille de Leyde de grande dimension qui serait incommode, on emploie une *batterie électrique*, formée d'un certain nombre de jarres. Les armatures internes, réunies entre elles par des tiges de métal, convergent vers une boule centrale que surmonte un anneau. Les jarres sont disposées dans une caisse de bois dont le fond, revêtu d'une feuille d'étain, relie les panses des bouteilles à deux poignées métalliques fixées aux parois de la caisse. Les

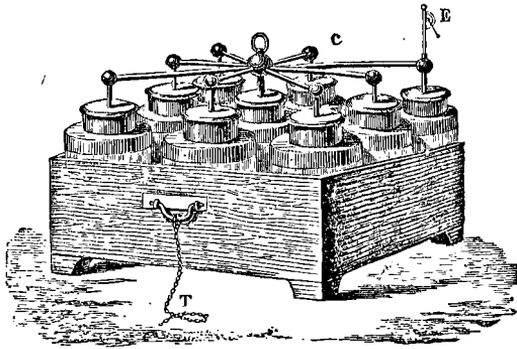


Fig. 672.

armatures internes n'en forment qu'une ; il en est de même des armatures externes. Une machine à influence permet de charger rapidement une batterie ; on relie l'anneau du collecteur à l'un des pôles et une des poignées extérieures à l'autre pôle et au sol. Un électroscope à cadran E placé sur l'armature interne fait connaître à tout instant l'excès de potentiel de l'armature interne sur le sol (fig. 672) ; il est ainsi aisé de se mettre en garde contre la rupture qui a lieu si

l'attraction des électricités contraires qui imprègnent les deux faces d'une lame isolante devient trop forte.

Une batterie est composée d'armatures internes qui n'exercent pas d'influence les unes sur les autres, parce qu'elles sont enveloppées par des armatures externes qui servent d'écrans ; pour cette raison, sa capacité est égale à *la somme* des capacités des bouteilles ; si les bouteilles sont de même verre et de même épaisseur, la capacité est proportionnelle à la surface totale des armatures. Avec n bouteilles identiques, de capacité c , la capacité totale sera nc ; une charge au potentiel v exigera une quantité d'électricité ncv . Plus les jarres sont grandes et nombreuses, plus il faut de temps pour charger la batterie.

Condensateurs de grande capacité. — Les condensateurs industriels sont formés de feuilles d'étain alternant avec des feuilles de mica ou de papier paraffiné (fig. 673) ; les feuilles d'étain d'ordre pair

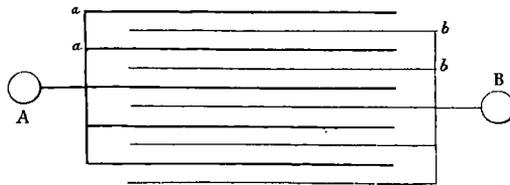


Fig. 673.

a communiquent ensemble d'un côté en A et forment l'une des armatures ; les feuilles d'ordre *b* débordent de l'autre côté, et sont réunies pour former l'autre armature qui aboutit en B. Cette disposition permet de réaliser *une très grande capacité sous un petit volume*.

831. Énergie d'un condensateur. — Si l'on réunit par un conducteur les deux armatures d'un condensateur chargé, il y a décharge, c'est-à-dire égalisation des potentiels des deux armatures. Cette décharge donne lieu dans les corps qu'elle traverse à diverses manifestations d'énergie. Un condensateur a donc acquis par la charge une *énergie potentielle* qui disparaît par la décharge.

Cette énergie potentielle est égale à la somme des travaux qu'elle effectue en s'annulant.

L'énergie d'un condensateur est égale à la somme des énergies de ses deux armatures (812).

Désignons par v le potentiel du collecteur, par c sa capacité, l'énergie du collecteur est $\frac{1}{2} Qv = \frac{1}{2} cv^2$, puisque $Q = cv$; le potentiel du condensateur étant nul, le terme relatif à son énergie est nul.

La charge d'une batterie est $Q = nc$, et par suite son énergie

$$\frac{1}{2} Qv = \frac{1}{2} nc v^2.$$

832. Condensateurs en cascade (fig. 674). — Dans ce mode d'association, on réunit l'armature interne i_1 de la première à l'un des pôles d'une source S , l'armature externe e_1 de la première à l'armature interne i_2 de la deuxième, l'armature externe e_2 de la deuxième à l'armature interne i_3 de la troisième, l'armature externe de la n^e au sol et au deuxième pôle de la source. Supposons toutes les bouteilles identiques, de capacité c .

Par la charge, une quantité d'électricité q , au potentiel v , occupe l'armature interne de la première; elle induit (782) deux charges $-q$ et $+q$ sur e_1 et i_2 (e_1 et i_2 sont au même potentiel v_1); en passant sur i_2 , q induit $-q$ et $+q$ sur e_2 et i_3 (e_2 et i_3 sont au même potentiel v_2); q passant sur i_3 induit $-q$ et $+q$ sur e_3 et i_4 ...

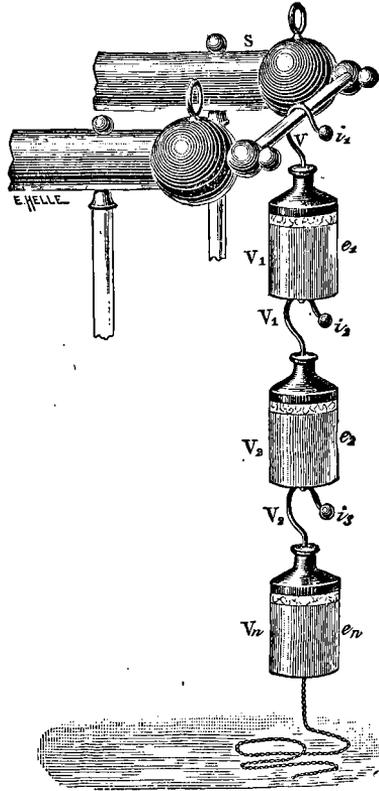


Fig. 674.

$v - v_1$ est la différence de potentiel entre i_1 et e_1
 $v_1 - v_2$ — — — — — entre i_2 et e_2
 $v_2 - v_3$ — — — — — entre i_3 et e_3 .

Les charges des n bouteilles successives seront :

$$(a) \left\{ \begin{array}{l} q = c (v - v_1) \\ q = c (v_1 - v_2) \\ q = c (v_2 - v_3) \\ \dots\dots\dots \\ q = c (v_{n-1} - v_n). \end{array} \right.$$

D'après les équations (a), en raison de l'égalité des charges et de l'égalité des capacités, les différences $v - v_1, v_1 - v_2, \dots$ sont égales entre elles. Cette

disposition des bouteilles s'appelle *disposition en cascade* parce qu'il y a chute de potentiel d'une bouteille à la suivante.

$v_n = 0$ puisque la dernière armature communique avec le sol.

$$v = \underbrace{v - v_1} + \underbrace{v_1 - v_2} + \underbrace{v_2 - v_3} \dots + \underbrace{v_{n-1} - v_n}.$$

La différence de potentiel v étant répartie sur n épaisseurs de verre, nous pouvons faire supporter à ce système une différence de potentiel n fois plus forte qu'à une batterie.

Ajoutons les équations (a) :

$$nq = cv \quad \text{ou} \quad q = \frac{c}{n} v$$

La seule armature qui donne un terme pour l'énergie du système est la première :

$$\frac{1}{2} qv = \frac{1}{2} \frac{c}{n} v^2$$

Les autres armatures ne produisent aucun travail à la décharge ; en effet, e_1 et i_2 forment un conducteur soumis à l'influence dont la charge totale est nulle, de même e_2 et $i_3 \dots$: les termes qui correspondent à leurs énergies sont nuls ; la dernière armature ne donne rien parce que son potentiel est nul.

EFFETS DES DÉCHARGES ÉLECTRIQUES

L'énergie dépensée dans la charge des conducteurs électrisés et des condensateurs se manifeste dans la décharge par divers effets : *effets lumineux, effets calorifiques, effets chimiques, effets mécaniques, effets physiologiques.*

833. Effets lumineux. — L'*étincelle électrique* est un phénomène lumineux qui accompagne le passage de l'électricité à travers un isolant entre deux conducteurs offrant une différence de potentiel suffisante. Si l'on approche le doigt ou un conducteur arrondi communiquant avec le sol du cylindre d'une machine électrique en activité, on en fait jaillir des étincelles de plusieurs centimètres de longueur.

Distance explosive. — La longueur de l'étincelle ou la distance explosive croît avec la *différence de potentiel* des deux conducteurs entre lesquels elle éclate. La distance explosive se mesure avec un micromètre à étincelles, appareil formé de deux sphères métalliques portées par des pieds isolants et dont la distance peut être variée et mesurée. Tant qu'elle est petite, la distance explosive est proportion-

nelle à la différence de potentiel des deux boules. Elle croît ensuite plus vite que la différence de potentiel.

Apparences de l'étincelle. — Si elle est courte et produite entre des conducteurs de grande capacité, l'étincelle a la forme d'un trait rectiligne épais (fig. 643) ; le trait devient étroit, sinueux et ramifié si la distance augmente et si la capacité des conducteurs diminue (fig. 644). Dans tous les cas, *quelle que soit la capacité des conducteurs entre lesquels l'étincelle éclate, une même distance explosive correspond toujours à la même différence de potentiel.*

L'électricité qui se perd par une pointe offre dans l'obscurité une lueur violacée ; comme nous l'avons vu à propos de la machine de Holtz (816), cette lueur change de forme avec le signe de l'électricité qui s'écoule. Ces lueurs prennent le nom d'*effluves* quand elles s'étaient, ce qui a lieu dans les gaz raréfiés ou quelquefois à la pression ordinaire entre de larges surfaces isolantes.

La durée d'une étincelle est excessivement courte. Pendant le temps que jaillit une étincelle d'une machine de Wimshurst en activité, les secteurs d'étain semblent immobiles.

Tubes étincelants. — On obtient un grand nombre d'étincelles par une seule décharge en multipliant les solutions de continuité du conducteur traversé. Les tubes étincelants sont des tubes de verre à l'intérieur desquels sont collés en spirale de petits losanges d'étain dont les pointes sont très rapprochées et en regard (fig. 675). Le tube est terminé à ses deux extrémités par deux pièces métalliques A et B que l'on relie aux deux pôles d'une machine électrique ou aux deux armatures d'un condensateur. Des étincelles éclatent entre les intervalles successifs des losanges en donnant la sensation d'une ligne lumineuse continue. L'expérience se fait dans l'obscurité.

Étincelle dans un gaz raréfié. — La distance explosive est notablement *plus longue dans l'air raréfié* que dans l'air, en outre on n'obtient plus alors une étincelle, mais une effluve.

L'*œuf électrique*, qui sert à l'étude de l'étincelle dans le vide est un globe ovoïde de verre, porté sur un pied de cuivre et traversé à ses extrémités par deux tiges métalliques que terminent des boules ; l'une des tiges est mobile dans une boîte à cuir. Après avoir fait le vide dans l'œuf



Fig. 675

électrique, si l'on dirige une décharge par les deux tiges, une gerbe violacée apparaît entre les deux boules intérieures (fig. 676).

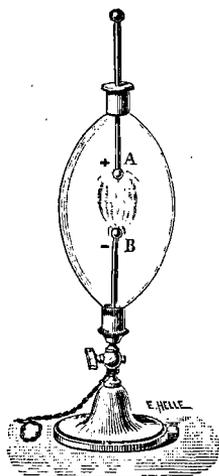


Fig. 676.

Les gaz offrent une résistance minimum au passage de l'électricité pour une pression de quelques millimètres de mercure. Au-dessous de cette pression, la résistance augmente très vite. L'étincelle ne passe plus quand la raréfaction est très grande. Le meilleur isolant est un vide parfait.

Couleur de l'étincelle. — L'effluve prend diverses couleurs dans les gaz raréfiés : elle est violette dans l'azote, rouge sombre dans l'hydrogène, verte dans l'acide carbonique. L'effluve, examinée au microscope, offre les bandes caractéristiques des gaz. Dans l'air, à la pression ordinaire, l'éclat et la couleur de l'étincelle dépendent des particules arrachées aux conducteurs et portées à l'incandescence par la décharge.

834. Effets calorifiques. — Inflammation. — L'étincelle qui accompagne une décharge est capable de produire l'inflammation de corps combustibles. On verse dans une capsule métallique communiquant avec le sol de l'éther ou de l'alcool légèrement chauffé et on approche du liquide le bouton d'une bouteille de Leyde tenue à la main : le mélange d'air et de vapeur de la surface s'enflamme. Citons encore l'inflammation du coton poudre et l'inflammation de la poudre. Pour cette dernière, il convient de retarder la décharge en intercalant un médiocre conducteur tel qu'un *cordon mouillé*, car à travers un conducteur métallique la décharge serait si brusque qu'elle ne ferait que disperser la poudre sans l'enflammer.

L'étincelle sert aussi à enflammer des mélanges gazeux tels qu'un



Fig. 677.

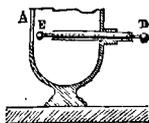


Fig. 678.

mélange d'hydrogène et d'oxygène. C'est ainsi qu'on réalise habituellement la *synthèse de l'eau dans l'eudiomètre*. Le *pistolet de Volta* est une autre forme de la même expérience. Un vase métallique A contenant un mélange d'air et de gaz d'éclairage, porte latéralement une tubu-

lure dans laquelle est mastiqué un tube de verre (fig. 677); ce tube est traversé par une tige métallique D qui se termine en E à une petite distance de la paroi opposée (fig. 678). On enflamme le mélange gazeux en faisant jaillir une étincelle électrique dans l'intervalle de la tige et de la paroi. Le vif dégagement de chaleur qui accompagne la production de vapeur d'eau donne lieu à une grande expansion de gaz et à une projection du bouchon B qui ferme le vase.

Échauffement des conducteurs. — Dans son passage à travers les conducteurs qu'elle parcourt la décharge dégage de la chaleur. La chaleur dégagée *ne se distribue pas également dans les divers conducteurs*, mais *proportionnellement à la résistance* qu'ils offrent au passage de l'électricité; un conducteur de petite section qui n'offre à la décharge qu'un passage insuffisant s'échauffe plus qu'un gros fil à travers lequel la circulation est plus libre.

Si le circuit de décharge, au lieu d'être unique, offre *plusieurs chemins* à l'électricité qui s'écoule entre les deux armatures, la route suivie n'est pas toujours celle qui paraît la plus conductrice et on peut voir dans certains cas l'électricité franchir un intervalle d'air au lieu de suivre un fil métallique. Les phénomènes de *self induction*, en électricité dynamique, font connaître la cause de ces préférences souvent observées dans la chute de la foudre (1036) et au premier abord, inattendues.

Excitateur universel. — Cet appareil, destiné à diriger la décharge d'une batterie dans diverses substances, comprend deux tiges métalliques A et B, mobiles autour de charnières et supportées par des pieds isolants (fig. 679). A leurs extrémités en regard, ces tiges sont terminées par des boules, et par leurs extrémités opposées elles sont reliées, au moyen de tringles

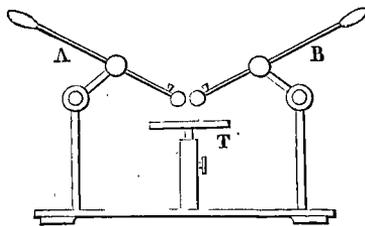


Fig. 679.

ou de chaînes, aux armatures du condensateur. Une tablette T peut servir à recevoir les corps sur lesquels on veut opérer.

Un fil métallique fin *db*, tendu entre les deux boules, peut être fondu par la décharge. On laisse dans le circuit un intervalle d'air à travers lequel on effectue la décharge avec un excitateur à manches de verre (fig. 680).

Expérience du portrait de Franklin. — Cette expérience a pour objet la volatilisation d'une feuille d'or très mince. Les tiges de l'excitateur sont en contact avec deux feuilles d'étain sur les bords

desquelles est appliquée la feuille d'or. Un carton mince découpé représentant le portrait de Franklin, est posé sur la feuille d'or et recouvert par un tissu de soie blanche. Pour assurer le contact, le

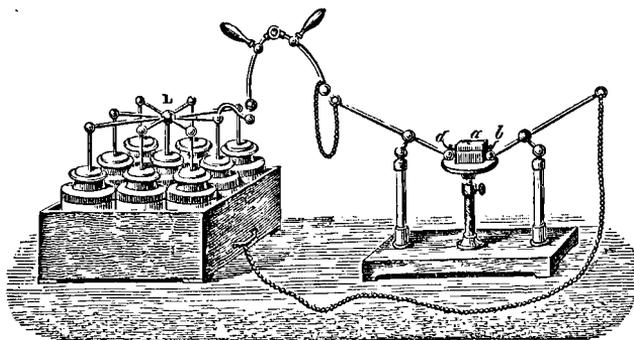


Fig. 680.

tout est fortement pressé entre des feuilles de carton et deux planchettes. En raison de la résistance électrique relativement plus forte de la très mince feuille d'or qui sépare les deux feuilles d'étain, la plus

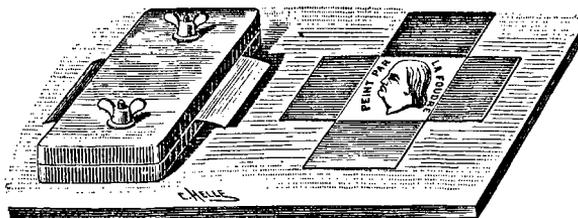


Fig. 681.

grande partie de la chaleur développée par la décharge d'une batterie s'y dégage, la chaleur développée dans le reste du circuit de la décharge est négligeable, les particules de la feuille d'or volatilisées sont projetées, traversent les vides des découpures et impriment le portrait sur la soie blanche en s'y condensant (fig. 681).

{ 835. **Mesure de l'énergie d'une décharge.** — Lorsque les branches de l'excitateur et les conducteurs employés pour les décharges des batteries sont des tiges métalliques de forte section, l'échauffement des conducteurs est insignifiant, l'énergie de la décharge se dépense dans l'étincelle qui est vive et bruyante ; mais si un fil suffisamment fin est intercalé dans un circuit dont les autres parties sont des conducteurs de gros diamètre, c'est dans ce fil que se dégage la presque totalité de la chaleur de la décharge. L'étincelle

ne prend alors elle-même qu'une faible partie de la chaleur totale, et l'échauffement du fil permet de calculer avec une exactitude suffisante l'énergie de la décharge.

Thermomètre à air (fig. 682). — L'échauffement d'une fine spirale de fil de platine se mesure au moyen d'un thermomètre à air dans le réservoir R duquel la spirale *f* est tendue. Les deux tubulures A et B auxquelles est

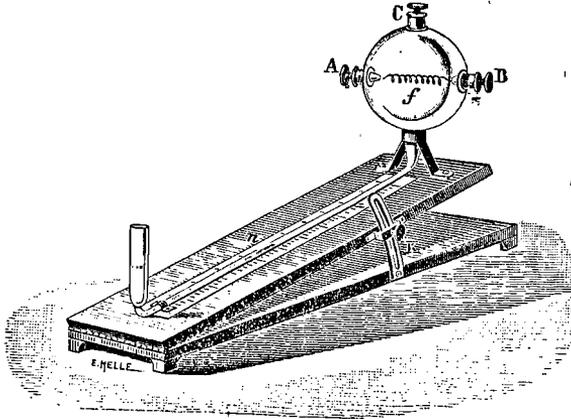


Fig. 682.

assujettie la spirale sont munies de bornes destinées à recevoir les conducteurs de la batterie qui sert à produire la décharge. L'air dilaté par l'échauffement du fil pousse une colonne d'un liquide coloré dans un tube thermométrique incliné. D'après l'échauffement de l'air intérieur, on détermine le nombre *W* de calories dégagées, on en déduit l'énergie de la décharge *JW* (*J* est le nombre 4,17, équivalent mécanique de la calorie en joules).

On vérifie que l'énergie de la décharge est proportionnelle au carré de la quantité d'électricité de la décharge, et en raison inverse de la capacité de la batterie (ou du nombre des bouteilles si elles sont identiques), conformément

à l'expression théorique (811) $JW = \frac{q^2}{2c}$.

Bouteille micrométrique. — On compare les quantités d'électricité des décharges à l'aide d'une bouteille micrométrique (bouteille de Lane). C'est une bouteille dont l'armature externe communique avec une petite sphère qu'une vis micrométrique permet d'approcher à volonté du bouton de l'armature intérieure (fig. 683).

La batterie est posée sur un support isolant; son collecteur commun avec l'un des pôles de la source, son armature extérieure est reliée au bouton de la bouteille micrométrique. L'armature externe de

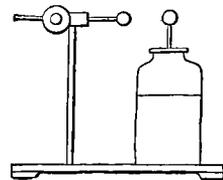


Fig. 683.

celle-ci communique avec le deuxième pôle de la source. La batterie et la bouteille de Lane sont ainsi associées en cascade (832). L'électricité de même nom que la charge du collecteur est repoussée dans la bouteille micrométrique, et une étincelle éclate entre les deux boules de celle-ci quand la distance qui les sépare est la distance explosive correspondant à leur différence de potentiel.

Le nombre des étincelles de la bouteille micrométrique mesure la quantité d'électricité qui passe sur le collecteur de la batterie.

La bouteille micrométrique peut être employée pour mesurer le débit d'une machine électrique⁽¹⁾

836. Effets chimiques. — L'aigrette et l'effluve électriques transforment l'oxygène en *ozone* dont on reconnaît l'odeur quand on fait fonctionner une machine à influence.

Par l'effet calorifique d'une série d'étincelles on décompose le gaz ammoniac et on double son volume. Une semblable décomposition a lieu pour d'autres gaz composés.

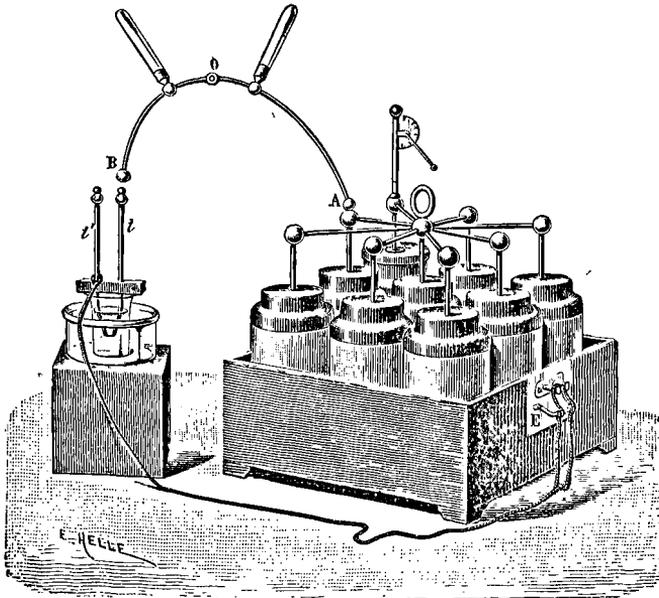


Fig. 684.

(1) Pour de très petites charges, l'électroscope à feuilles d'or (fig. 629) peut fonctionner comme une bouteille micrométrique. Le bouton de l'électroscope est réuni à la source; une des feuilles est attirée par un bouton *a* qui communique avec le sol et se décharge; chacune des décharges correspond à une même charge de l'électroscope.

L'électricité des décharges produit les effets d'*électrolyse* du courant de la pile (939), mais avec une bien moindre énergie.

837. Effets mécaniques. — Les effets mécaniques proviennent des obstacles apportés au passage de l'électricité et se produisent surtout quand la décharge rencontre des corps mauvais conducteurs. Il faut rapporter à un vif ébranlement produit sur l'air le bruit qui accompagne une étincelle ; citons encore la projection latérale des fragments fondus lors de la fusion d'un fin fil de fer par la décharge d'une batterie.

Si l'on fait passer la décharge d'une batterie dans un fil de fer très

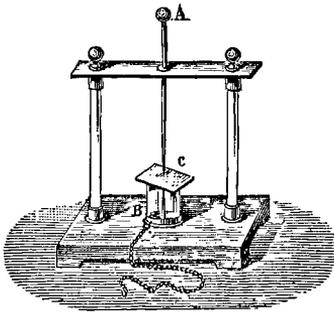


Fig. 685.

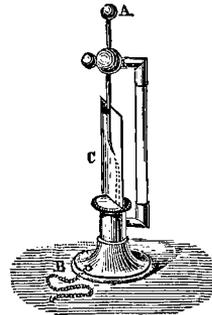


Fig. 686.

fin de 1 centimètre de longueur tendu entre les extrémités des tiges *t* et *t'* d'un excitateur et plongé dans un vase de verre rempli d'eau, le fil est rompu, l'ébranlement de l'eau se transmet au vase et le brise (fig. 684).

Si l'on fait passer une décharge entre deux pointes métalliques qui comprennent une lame de verre (fig. 685), une feuille de carton (fig. 686), le verre et le carton sont percés.

838. Effets physiologiques. — Une faible étincelle fait éprouver une sensation de légère piqûre quand elle éclate entre un corps électrisé et la peau. Une forte étincelle donne lieu à une commotion.

Commotion par une décharge de condensateur. — Si l'on touche avec une main la panse et avec l'autre main le bouton d'une bouteille de Leyde chargée, la décharge a lieu en raison de la bonne conductibilité du corps humain et communique une secousse au poignet, au coude, à l'épaule ; elle peut même produire un fort ébranlement dans la poitrine.

En formant un cercle de personnes qui se tiennent la main, une

commotion se fait sentir à toute la chaîne au moment où, la première tenant la panse, la dernière vient à toucher le bouton d'une bouteille de Leyde.

L'effet physiologique dépend de l'énergie électrique de la décharge, c'est-à-dire de la chute de potentiel et de la masse électrique. On peut impunément tirer des étincelles de 20 centimètres d'une machine électrique de faible débit, tandis qu'une étincelle d'un centimètre provenant d'une batterie fortement chargée est dangereuse.

La commotion d'une bonne batterie est foudroyante pour un pigeon.

Électrisation sur un tabouret isolant. — Quand une personne placée sur un tabouret isolant est mise en communication avec l'un des collecteurs d'une machine électrique, elle s'électrise comme lui et prend le même potentiel électrique; l'électricité s'écoule sous forme d'aigrettes faisant dresser les cheveux et le duvet de la peau (*bain statique*).

On localise l'écoulement en approchant une pointe métallique reliée au sol. La pointe subit une décomposition par influence, l'électricité qui s'en échappe passe à l'air environnant qui est repoussé et produit sur les régions voisines du corps une impression de *souffle* (*vent électrique*, fig. 640).

Lorsque la pointe est mousse, il s'en échappe des *aigrettes* qui déterminent sur la peau une sensation de picotement.

Les aigrettes font place à une série d'étincelles si l'on approche une boule. En promenant sur les vêtements une boule de métal ou de bois reliée au sol, on obtient une succession rapide d'étincelles courtes qui rougissent la peau et donnent lieu à une sensation de chaleur (*friction électrique*).

Applications. — 1° Une sphère conductrice de 50 centimètres de rayon est électrisée au potentiel 200. On lui fait partager sa charge avec le collecteur d'une bouteille de Leyde (condenseur au sol) de capacité inconnue. Le potentiel tombe à 20. Quelle est la capacité c de la bouteille de Leyde?

2° Un condensateur de capacité 10 est porté au potentiel 30. Quelle est sa charge, quel travail a-t-on dépensé pour le charger?

3° Soit un condensateur de capacité 10 000 chargé au potentiel 14; on le décharge partiellement, le potentiel tombe à 5. Quelle est la chaleur produite par la décharge si toute l'énergie est convertie en chaleur?

4° Une bouteille de Leyde partage sa charge avec deux autres de même capacité. Quelle sera l'énergie de la charge d'une bouteille après ce partage?

5° Soit un condensateur dont la capacité est 8000; on le décharge à travers un fil métallique dont la capacité calorifique est égale à 0,0006; ce fil est porté de 10° à 510° . Quelle était la différence de potentiel v des armatures avant la décharge, en supposant que toute la chaleur de la charge s'est dégagée dans le fil?

6° Quatre bouteilles de Leyde ont chacune 3 décimètres carrés de surface, 2^{mm} , 5 d'épaisseur de verre. Quelle est la capacité de la batterie qu'on formerait avec ces bouteilles? Pouvoir inducteur du verre, 3.

7° Six bouteilles de Leyde, disposées en batterie, présentent chacune une surface de 450 centimètres carrés. Le verre est épais de 2 millimètres et a un pouvoir inducteur égal à 3. Quelle charge peut-on donner à la batterie avec une source dont les deux collecteurs ont une différence de potentiel égale à 300?

8° On construit un condensateur avec des feuilles d'étain et du papier paraffiné de $\frac{1}{3}$ de millimètre d'épaisseur; le papier paraffiné ayant un pouvoir inducteur spécifique égal à 2. Quelle surface S devra-t-on donner au condensateur pour que sa capacité soit égale à celle d'une sphère de 1500 mètres de rayon?

9° Quelle est la densité électrique à la surface d'une sphère de 5 centimètres de rayon si le potentiel de la sphère est de 20 000 volts?

10° On forme une batterie de 6 bouteilles de Leyde; chacune des bouteilles présente une surface de 450 centimètres carrés, le verre a une épaisseur de 2 millimètres et un pouvoir inducteur spécifique égal à 3. Quel sera en microfarads la capacité de la batterie et quelle sera sa charge en coulombs avec une source dont les deux collecteurs ont une différence de potentiel égale à 300 en unités électrostatiques?

11° Quel est le rayon d'une sphère dont la capacité est de 1 microfarad?

12° La capacité d'un conducteur est $\frac{1}{100}$ de microfarad : quel potentiel en volts faut-il lui donner pour que son énergie soit équivalente à 1 calorie?

13° Un condensateur de 10 microfarads est chargé sous une différence de potentiel de 500 volts. Quelle est son énergie?

14° Un condensateur dont la capacité est d'un microfarad est mis en communication par l'une de ses armatures avec le sol et par l'autre avec une machine de Ramsden au potentiel de 9000 volts. On décharge le condensateur à travers un fil métallique ayant une longueur de deux mètres, un diamètre de $\frac{1}{5}$ de millimètre, une densité 7 et une chaleur spécifique 0,09. Quelle sera l'élévation θ de température du fil en admettant que toute l'énergie de la décharge s'est transformée en chaleur dans le fil?

15° Une machine électrique fait 8 tours par seconde. Il lui faut 20 tours pour établir une différence de potentiel de 10 000 volts entre les deux armatures d'une batterie dont la capacité est 1 microfarad. Quel est le travail converti en énergie électrique en une seconde par cette machine?

ÉLECTRICITÉ ATMOSPHÉRIQUE

839. L'atmosphère est un champ électrique. — Un conducteur isolé et à l'état neutre, placé dans l'atmosphère par un temps serein, s'électrise négativement du côté du ciel, et positivement du côté du sol. Son potentiel est positif, supérieur à celui du sol. L'atmosphère est donc un champ électrique puisqu'un conducteur y subit une influence électrique; ce champ peut être considéré comme produit par des *masses positives* situées à une grande hauteur.

(840. Potentiel en un point de l'atmosphère. — On peut définir le potentiel en un point de l'atmosphère le potentiel d'une petite sphère isolée placée en ce point (806). Si l'on reliait cette sphère à un électroscope pour déterminer son potentiel, le système conducteur formé par la sphère et l'électroscope prendrait un potentiel *intermédiaire* entre les potentiels de l'air à

ses deux extrémités (806), mais ce ne serait pas le potentiel au point de l'air où se trouve le centre de la sphère.

841. Recherche du potentiel en un point. — 1° *Par un conducteur en*

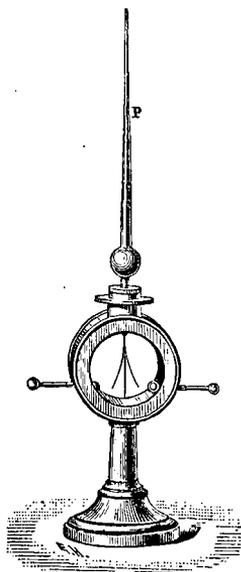


Fig. 687.

pointe. — En remplaçant la sphère de l'électroscope à l'état neutre par une pointe effilée (fig. 687), on obtient le potentiel de l'air à l'extrémité même de la pointe. En effet, l'électricité positive de l'atmosphère agit sur le conducteur, et, s'il y a une différence de potentiel entre la pointe et l'air qui l'entoure, cette différence donne lieu à une décomposition électrique. De là un écoulement d'électricité par la pointe, qui s'arrête quand l'équilibre est établi (1). A ce moment, la divergence des feuilles de l'électroscope ne varie plus et mesure le *potentiel du conducteur* qui est égal à celui de la pointe et à celui de l'air qui est en contact avec la pointe.

2° *Par un écoulement d'eau.* — Comme on ne peut réaliser une pointe parfaite, il y a toujours, au moment où la divergence des feuilles de l'électroscope ne varie plus, une petite différence de potentiel entre la pointe et l'air qui la baigne. Pour cette raison, on préfère employer un vase rempli d'eau, isolé et laissant écouler par un tube très mince un filet d'eau qui se divise en gouttelettes (fig. 688).

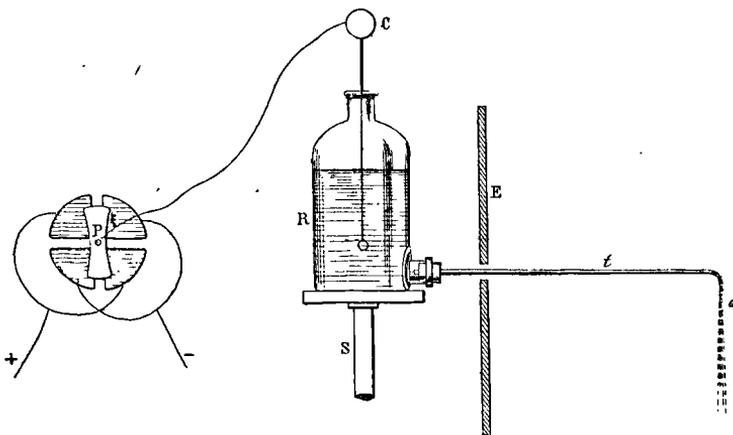


Fig. 688.

(1) L'écoulement d'électricité ne cesse que lorsque le conducteur relié à la pointe a pris le potentiel de la pointe; cela ne pourra avoir lieu si le conducteur communique avec le sol et un flux d'électricité, très faible mais continu, parcourt alors le conducteur.

Soit v le potentiel de l'air au point a où une première goutte se sépare de la veine, et soit v' le potentiel de la masse d'eau. Supposons $v' > v$; en vertu de cette différence de potentiel et de la décomposition électrique qui en résulte, il y aura mouvement d'électricité positive vers l'extérieur, et les gouttes emporteront de l'électricité positive en se détachant, ce qui diminuera le potentiel de la masse d'eau. Le potentiel du liquide restera constant quand il sera devenu égal à v , et la déviation de l'électroscope qui lui est relié par le conducteur C ne variera plus : elle fera connaître le potentiel en a .

Le potentiel de l'air est positif; lorsque le temps est serein, il croît à peu près proportionnellement à l'altitude. Par définition, le potentiel du sol est nul.)

ÉLECTRICITÉ DES ORAGES

842. Assimilation des nuages orageux à des conducteurs électrisés. — Les orages sont des phénomènes électriques : les nuages orageux se comportent comme des conducteurs électrisés; les éclairs sont des traits de feu identiques aux étincelles des machines électriques, le tonnerre est le bruit dû à la violente secousse de l'air que déterminent les éclairs.

Électrisation d'un conducteur par l'influence d'un nuage orageux. — L'électrisation des nuages orageux est démontrée par l'influence qu'ils exercent sur les conducteurs.

Pour réaliser une expérience proposée par Franklin, Dalibard en 1752 éleva sur un support isolant une barre de fer de 13 mètres de hauteur, terminée en pointe. En passant au-dessus de la pointe, un nuage orageux attira l'électricité de nom contraire qui s'écoula et repoussa l'électricité de même nom à la partie inférieure de la barre. En effet, en approchant de cette extrémité inférieure une tige de cuivre communiquant avec le sol, on put en tirer des étincelles.

Formation des nuages électrisés positifs et négatifs. — L'atmosphère se comporte comme si ses régions supérieures renfermaient des masses électriques positives (839).

Pour cette raison, les particules d'eau qui forment un nuage par la condensation de la vapeur d'eau atmosphérique s'électrisent par influence, négativement à la partie supérieure, positivement à la partie inférieure (774). Ce nuage restera chargé négativement s'il est mis un instant en communication avec le sol (775), soit par contact avec le flanc d'une montagne, soit par une résolution partielle en pluie.

Ce nuage négatif électrise positivement par influence un autre nuage qui vient à communiquer momentanément avec le sol.

843. Éclairs. — On conçoit que des étincelles ou des éclairs puissent jaillir entre deux nuages chargés d'électricités à des potentiels différents et suffisamment rapprochés, ou entre un nuage électrisé et le sol.

La *durée* de l'éclair est extrêmement courte. Sa *longueur* peut être très grande, car l'éclair est souvent formé d'une suite de traits lumineux éclatant entre des lambeaux de nuages et reproduit le ruban de feu de l'expérience du tube étincelant (833).

Tantôt l'éclair est un *sillon éblouissant*, nettement limité sur ses bords et éclairant vivement l'atmosphère et le sol, tantôt il rappelle les étincelles en zig-zag qui éclatent entre les pôles éloignés des fortes machines électriques, tantôt c'est une *lueur diffuse* illuminant subitement le ciel et due à une décharge masquée par des nuages ou produite au-dessous de l'horizon.

844. Tonnerre. — L'éclair et le tonnerre sont *simultanés*, mais le fracas du tonnerre suit toujours la lumière de l'éclair. La lumière de l'éclair franchit en effet en un temps inappréciable l'intervalle qui nous sépare des nuages (603), tandis que le bruit de la décharge met trois secondes à parcourir un kilomètre (532) et ne nous parvient le plus souvent qu'après quelques secondes.

Quand une décharge éclate entre plusieurs nuages consécutifs, plusieurs détonations ont lieu à la fois, mais nous les percevons successivement, car elles nous arrivent de points d'explosion inégalement distants. De là les *redondances* du tonnerre. Les échos produisent aussi des *roulements*, habituels dans les pays de montagnes.

845. Foudre. — Une *décharge* entre deux nuages ou entre un nuage électrisé et le sol s'appelle la foudre. Quand une décharge jaillit entre un nuage et le sol, on dit que la *foudre tombe*. Elle frappe de préférence les points les plus saillants du sol, car c'est en ces points que s'accumule l'électricité contraire attirée par l'influence du nuage orageux. Les sommets des montagnes, les édifices élevés, les cimes des arbres sont les points les plus exposés.

Effets de la foudre. — Ce sont les effets des décharges des batteries, mais beaucoup plus puissants : 1° *Effets mécaniques*, spécialement sur les corps mauvais conducteurs : toitures enlevées, maisons

écroulées, arbres brisés; 2° *Effets calorifiques* : incendies allumés, métaux fondus et volatilisés. *Commotions* qui renversent les êtres animés, les brûlent et parfois les frappent instantanément de mort⁽¹⁾.

PARATONNERRES

846. Paratonnerre à tige. — *Principe de la construction.* — Si l'on présente au collecteur d'une machine électrique en activité une pointe métallique tenue à la main, il ne jaillit pas d'étincelle : l'électricité contraire, attirée par le collecteur, s'écoule par la pointe et neutralise sans bruit l'électricité du collecteur (fig. 639). L'électricité de même nom est repoussée dans le sol par le corps de l'opérateur qui n'éprouve aucune commotion. On conçoit d'après cela le mode d'action d'un paratonnerre.

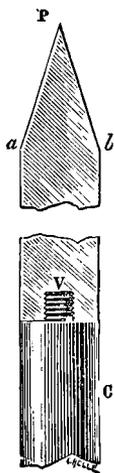


Fig. 689.

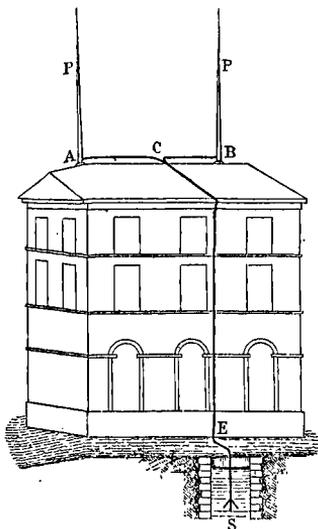


Fig. 690.

(1) Une commotion peut se produire sur un être vivant sans qu'il soit directement frappé. C'est le phénomène du *choc en retour*. Imaginons un nuage chargé positivement et voisin du sol en certains points; il décompose par influence de l'électricité neutre d'un corps A reposant sur le sol, attire de l'électricité négative, et repousse une quantité égale d'électricité positive dans le sol. Si le nuage vient à se décharger en un point éloigné, l'électricité négative accumulée sur le corps A en face du nuage retourne au sol et détermine un courant brusque dont la commotion peut amener la mort.

Description. — Un paratonnerre est une longue tige de fer de 5 à 10 mètres terminée à sa partie supérieure par un cône de platine P ou de cuivre doré à sa surface (pour éviter l'oxydation), et installée verticalement sur le faite de l'édifice à préserver (fig. 689). La partie inférieure du paratonnerre se continue par un conducteur en fer CE ininterrompu qui suit le toit et les murs de l'édifice pour se rendre dans un puits S où il se ramifie en plusieurs branches (fig. 690). Ce conducteur est relié sur son trajet aux principales pièces métalliques de l'édifice, de sorte que l'électricité développée dans ces pièces par l'influence du nuage orageux ne détermine pas de décharges latérales avec le conducteur du paratonnerre, mais va s'écouler elle-même par la pointe. Si l'édifice porte plusieurs paratonnerres P et P', ils sont reliés entre eux par des tiges métalliques AC, CB.

La communication avec le sol doit être établie avec le plus grand soin, sinon le paratonnerre devient dangereux.

Effets d'un paratonnerre. — Un paratonnerre *prévient* les décharges brusques en neutralisant sans bruit l'électricité du nuage; l'écoulement par la pointe se manifeste par une aigrette lumineuse visible dans l'obscurité.

Le paratonnerre exerce, en outre, un effet *préservatif* si la foudre éclate, car la décharge frappera de préférence la tige du paratonnerre qui est le point de l'édifice le plus voisin du nuage, le meilleur conducteur et le plus électrisé.

On admet que la surface garantie à la base du paratonnerre est un cercle dont le rayon est double de la hauteur de la tige; on calcule d'après cette règle l'écartement de deux paratonnerres.

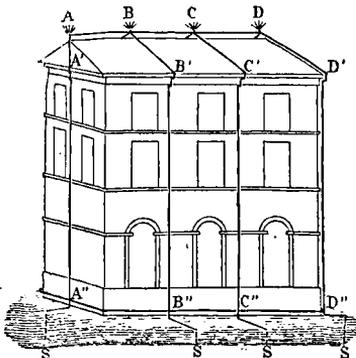


Fig. 691.

847. Paratonnerre à réseau (Paratonnerre Melsens).

Principe de la construction. — Un conducteur entouré par une enceinte métallique reliée au sol ne subit aucune influence des corps électrisés extérieurs (784); une telle enceinte serait le meilleur paratonnerre. Il n'est même pas nécessaire que l'enceinte métallique soit continue, un réseau à larges mailles suffit (fig. 632).

Description. — D'après cela, on enveloppe la surface extérieure de l'édifice de câbles métalliques AA'A", BB'B"..... reliés entre eux de manière à former un *réseau* (fig. 691). Ces conducteurs sont mis au moyen de puits en communication avec une nappe aquifère souterraine. Les points saillants de l'édifice A,B,C,D sont armés de pointes multiples de petite longueur, reliées au réseau métallique. Ces pointes laissent s'échapper sous forme d'aigrettes l'électricité développée sur l'édifice par l'influence des nuages orageux, et préviennent les accumulations de charges qui produisent les coups de foudre.

MAGNÉTISME

AIMANTS

848. Certains échantillons d'un oxyde de fer naturel de formule Fe^3O^4 ont la propriété permanente d'attirer le fer. Ce sont des *aimants naturels* (pierres d'aimant).

La cause de cette propriété est appelée **magnétisme** ⁽¹⁾.

Les *aimants artificiels* sont des barreaux d'acier trempé auxquels on communique la même propriété permanente d'attirer le fer.

Substances magnétiques. — Le fer n'est pas la seule substance attirable par l'aimant ou *magnétique*; après lui viennent le *nickel*, le *cobalt*, puis à un degré bien moindre, le manganèse, le chrome, etc. Une substance non magnétique, comme le cuivre, n'est pas attirable par l'aimant.

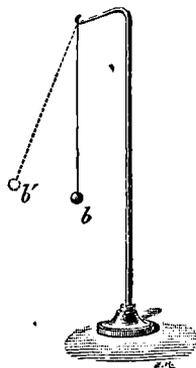


Fig. 692.

Pendule magnétique. — Pour mettre en évidence les attractions magnétiques on peut employer une petite balle de fer *b* suspendue à l'extrémité d'un fil flexible (fig. 692). A l'approche d'un aimant, ce pendule est dévié de la verticale en *b'*. L'attraction par l'aimant augmente quand sa distance à la balle de fer diminue; le pendule

peut être entraîné jusqu'au contact et adhérer à l'aimant.

(1) Du nom de Magnésie, ville d'Asie Mineure, aux environs de laquelle les Grecs trouvaient la pierre d'aimant.

L'attraction a lieu dans le vide comme dans l'air; elle se produit aussi à travers les substances non magnétiques, telles que le papier, le bois, le verre, le cuivre, le zinc, l'eau ⁽¹⁾, etc.

849. Pôles magnétiques. — En présentant successivement au pendule les différentes parties d'un aimant, on reconnaît que deux régions opposées appelées *pôles* exercent une action plus forte. Entre

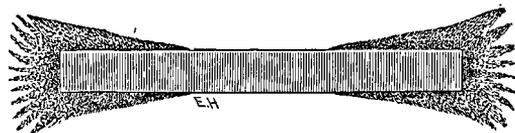


Fig. 693.

les deux se trouve une *région moyenne* sans action appréciable ou *neutre*. Sur un aimant d'acier ayant la forme d'un cylindre allongé, les points d'action maximum sont voisins des extrémités de l'axe géométrique du cylindre.

L'existence des pôles et de la région moyenne est encore rendue visible en roulant un aimant dans la *limaille de fer* : elle adhère en forme de houppes autour de deux centres voisins des extrémités vers lesquels se dirige l'attraction, elle ne s'attache pas à la région moyenne (fig. 693).

850. Orientation d'un barreau aimanté par la Terre. —

Quand on suspend en son milieu un barreau aimanté à un fil sans torsion, à l'aide d'un petit étrier de papier, de façon qu'il ne puisse se déplacer que dans un plan horizontal, le barreau se dirige à peu près du nord au sud.

On se sert souvent d'*aiguilles aimantées* ou lames d'acier taillées en losange très allongé et reposant par un petit godet ou *chape* en agate sur un pivot vertical très aigu (fig. 694); le point de suspension est choisi de telle façon que l'aiguille reste horizontale. Avec cette forme de losange

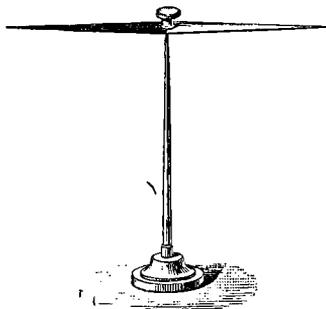


Fig. 694.

(1) Si l'on interpose une plaque de fer suffisamment épaisse entre le pendule et l'aimant, le pendule n'est plus attiré, le fer se comporte comme un *écran magnétique*.

allongé la ligne des pôles coïncide sensiblement avec la ligne des pointes.

851. Distinction des pôles. — Si, après avoir noirci l'extrémité qui se dirige vers le nord, on déränge l'aimant de sa position d'équilibre et même si on le retourne, on voit que c'est toujours l'extrémité noircie qui revient au nord. On appelle *pôle nord* cette extrémité, l'autre extrémité est le *pôle sud*. Bien que les deux pôles attirent également la limaille, ils ne sont pas identiques puisqu'ils prennent des directions opposées.

852. Actions réciproques des pôles de deux aimants. —

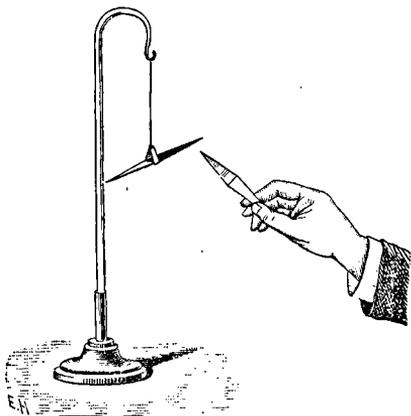


Fig. 695.

De l'extrémité nord d'un aimant suspendu à un fil de soie (fig. 695), ou d'une aiguille mobile sur un pivot, approchons le pôle nord d'une autre aiguille aimantée : les deux pôles nord se repoussent vivement, les deux pôles sud mis en regard se repoussent également, mais un pôle nord attire un pôle sud. Donc, *les pôles de même nom se repoussent et les pôles de noms contraires s'attirent.*

853. Aimants brisés. — On pourrait s'attendre à obtenir un aimant à un seul pôle en brisant un barreau aimanté ; or les deux

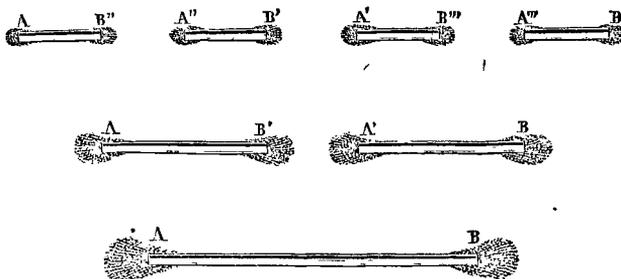


Fig. 696.

fragments plongés dans la limaille se comportent comme deux aimants complets offrant chacun deux pôles et une région neutre. *Les pôles*

voisins sont de noms contraires. Chacun des deux fragments peut être à son tour subdivisé par la rupture en deux nouveaux aimants (fig. 596). En rapprochant les fragments ainsi séparés et en mettant en contact les pôles de noms contraires, on forme une chaîne dont les pôles intermédiaires se réunissent, et l'aimant primitif est reproduit.

854. Hypothèse sur la constitution des aimants. — En s'appuyant sur l'expérience précédente, on peut considérer un aimant rectiligne de très petite section comme formé d'une infinité de *petits*

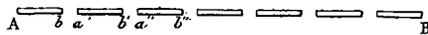


Fig. 697.

aimants particulières $Ab, a'b', a''b''$... dont les pôles nord sont dirigés vers l'extrémité nord et les pôles sud vers l'extrémité sud (fig. 697). Les pôles intermédiaires se neutralisent, et les extrémités polaires exercent seules une action extérieure. L'aimant agit donc comme s'il était réduit aux deux pôles extrêmes.

L'étude de l'action de la Terre sur un aimant nous permettra d'étendre l'hypothèse précédente à un aimant quelconque.

855. Lois des actions magnétiques. — L'étude des actions mutuelles des pôles magnétiques présente quelque difficulté parce que l'on ne peut étudier *isolément* l'action de deux pôles; toutefois, en mettant en présence deux tiges d'acier aimantées, de grande longueur et de très petite section, ayant deux extrémités très voisines et les deux autres très éloignées, Coulomb a pu ne tenir compte que de l'action des deux pôles voisins et constater que l'action mutuelle de deux pôles varie *en raison inverse du carré de leur distance*.

Deux pôles d'aimant, agissant successivement sur un même pôle, à la même distance, sont dits *égaux s'ils exercent une même action*. On appelle pôle double un pôle exerçant une action double, pôle triple un pôle exerçant une action triple. L'action étant, *par définition*, proportionnelle aux quantités de magnétisme ou aux masses magnétiques, l'action mutuelle de deux masses magnétiques μ et μ' , distantes de d , sera représentée par

$$F = K \frac{\mu\mu'}{d^2};$$

F est exprimé en dynes, d en centimètres.

856. Unité de magnétisme. — Si l'on prend pour *unité de magnétisme* une quantité qui exercerait *dans l'air* sur une quantité égale placée à un centimètre de distance une force égale à une dyne,

$$K = 1, \text{ et } F = \frac{\mu\mu'}{d^2};$$

μ et μ' sont dans cette dernière relation exprimés en unités de magnétisme.

Supposons un pôle nord et un pôle sud exerçant séparément, à la même distance, une action de même grandeur sur un même pôle; leur action est nulle si on les réunit en un même point. On est par là amené à attribuer les signes + et — aux masses magnétiques nord et sud. On convient de donner le signe + aux masses magnétiques nord. Si les masses sont de même signe, la force est répulsive, et F positif; la force F est négative pour une attraction.

D'une façon générale, des masses électriques réunies s'ajoutent. En effet, quand on réunit deux pôles μ et μ' en un même point, on reconnaît que l'action qu'ils exercent sur un autre pôle est proportionnelle à $\mu + \mu'$ si les deux pôles sont de même nom, et à $\mu - \mu'$ s'ils sont de noms contraires.

ACTION DE LA TERRE SUR UN AIMANT

857. L'action de la Terre sur un aimant est seulement directrice. — Un barreau d'une substance quelconque non magnétique, suspendu par son centre de gravité, reste en équilibre dans toutes les positions qu'on lui donne, car son poids est équilibré par la résistance du point de suspension. Un barreau aimanté suspendu par son centre de gravité est également soustrait à l'action de la pesanteur, mais il *s'oriente*, ce qui prouve qu'il est soumis à d'autres forces que son poids. On attribue ces forces à une action magnétique spéciale de la Terre.

D'après un théorème de mécanique (29), les forces qui agissent sur un corps, quelle que soit leur origine, peuvent toujours être remplacées par un *couple* et une *force isolée* indépendante du couple. Ici, *le couple existe seul* et la force indépendante du couple est nulle. Nous allons voir, en effet, que la force isolée n'a ni composante horizontale, ni composante verticale.

La force isolée n'a pas de composante verticale. — En effet, un barreau d'acier placé sur l'un des plateaux d'une balance fait équilibre à une même tare *avant* et *après* son aimantation. Or, en raison du mode de suspension des plateaux (122), les deux composantes verti-

cales du couple n'ont pas d'effet sur le plateau d'une balance parce qu'elles sont égales et contraires; une force indépendante du couple aurait pu seule donner une composante verticale.

La force isolée n'a pas de composante horizontale. — Un barreau aimanté NS posé sur un disque de liège L qui flotte sur l'eau, s'oriente et prend la direction commune des deux forces du couple (fig. 698), mais *il ne subit pas de translation*, comme cela aurait lieu si une force horizontale, indépendante du couple, agissait constamment sur l'aiguille.

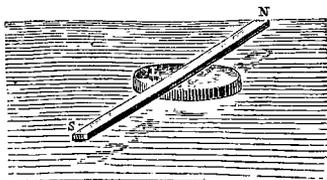


Fig. 698.

Couple directeur. — Un barreau aimanté, librement suspendu par son centre de gravité et par conséquent soustrait à l'action de la pesanteur, est soumis à l'action de deux forces égales, parallèles et dirigées en sens contraire, dont l'ensemble constitue le *couple terrestre*. Le barreau se tient en équilibre lorsque les deux forces parallèles du couple sont en prolongement l'une de l'autre sur la ligne de leurs points d'application (24).

(858. **Égalité des masses magnétiques nord et sud dans un aimant.** **Position des pôles.** — Il résulte des expériences fondamentales du magnétisme : attraction d'un pendule magnétique, attraction et adhérence de la limaille de fer, qu'un barreau aimanté possède des *masses magnétiques libres*, c'est-à-dire agissant à l'extérieur.

D'autre part, en l'absence de toute masse magnétique agissante au voisinage d'un aimant, l'action terrestre ne peut provenir que de *centres magnétiques éloignés*.

Un centre ou pôle magnétique éloigné n'exerce sur les masses magnétiques libres de l'extrémité nord d'un barreau que des actions parallèles, appliquées à ces masses, proportionnelles aux masses (855), et représentées par $f = T\mu$, $f' = T\mu'$... La résultante de ces forces leur sera parallèle, égale à $f + f' + f''$... ou $T\Sigma\mu$, et appliquée en un point N, *centre des forces parallèles* (25) (fig. 699). Ce point est fixe, car quand on déplace l'aimant, les forces parallèles ne changent ni de grandeur ni de point d'application. C'est ce point précis que nous appellerons le *pôle nord* ⁽¹⁾.

De même, les forces parallèles appliquées aux masses de l'extrémité sud ont une résultante égale à leur somme $T\Sigma\mu_1$, et cette résultante est appliquée en un point S qui sera le **pôle sud**. Les deux résultantes en N et en S sont

(1) Un pôle ainsi défini joue le même rôle que le centre de gravité d'un corps pesant.

égales puisqu'elles forment un couple; donc $\Sigma\mu = \Sigma\mu_1$. De ce que l'action de la Terre sur un aimant se réduit à un couple, il résulte donc que, dans un aimant, il y a autant de magnétisme nord que de magnétisme sud. $\Sigma\mu$ est la masse magnétique de chacun des pôles.

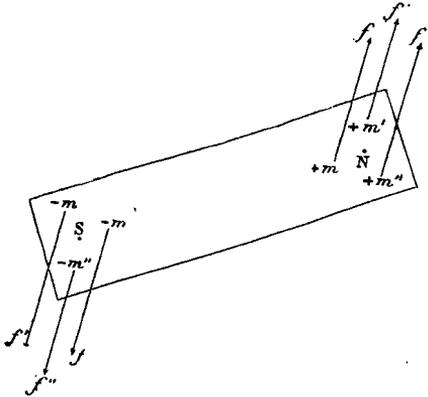


Fig. 699.

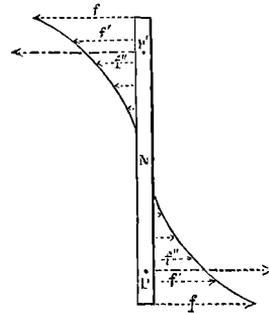


Fig. 700.

En attribuant les signes + et - aux masses magnétiques nord et sud d'un aimant, on pourra dire que, dans un aimant quelconque, la *somme des masses magnétiques est nulle*.

Supposons que la Terre soit assimilable à un aimant et présente un deuxième centre magnétique; les directions des deux forces du nouveau couple dues à ce deuxième centre sont parallèles, et, comme les points d'application de ces forces ne dépendent pas de leur direction, elles seront appliquées aux mêmes points N et S. En composant d'une part les deux forces appliquées en N, et d'autre part les deux forces respectivement égales et parallèles appliquées en S, on aura en définitive deux résultantes égales et parallèles appliquées aux pôles et formant encore un couple (1).

Définition précise des pôles. — Nous préciserons la signification du mot pôle en appelant *pôles* les *points d'application des forces du couple terrestre* ou du couple exercé sur l'aimant par des centres magnétiques éloignés.

La ligne qui joint les deux pôles est appelée *axe magnétique*.

(Par rapport à des centres magnétiques éloignés, un aimant se comporte comme s'il consistait en deux masses magnétiques égales, l'une de magnétisme nord, concentrée en son pôle nord, l'autre de magnétisme sud, concentrée en son pôle sud.)

(1) Si l'on peut déterminer en chaque point de chacune des extrémités du barreau la valeur des forces f , f' , f'' exercées par un centre magnétique éloigné, la résultante, égale à la somme de toutes les actions, est mesurée par la surface de la courbe formée par les extrémités des ordonnées représentatives des forces. Le point d'application de la résultante, qui est le pôle, se trouve au pied de l'ordonnée du *centre de gravité* de cette surface (fig. 700).

La définition qui vient d'être donnée des pôles n'a de précision que s'il s'agit d'actions exercées sur un aimant par des masses magnétiques éloignées. Les actions d'une masse magnétique M située à une distance finie ont deux résultantes appliquées en des *points spéciaux* dont la position varie avec la position de la masse M .

859. Hypothèse sur la constitution d'un aimant quelconque. — Nous supposons qu'un aimant quelconque est constitué par un faisceau d'aimants de très petite section. L'assimilation d'un aimant à un faisceau de filets magnétiques est d'accord avec l'égalité des masses libres nord et sud. Les extrémités des *filets magnétiques* composants forment à l'extrémité nord un certain nombre de masses magnétiques nord $+\Sigma\mu$, non neutralisées ou libres; il y a à l'extrémité sud des masses magnétiques $-\Sigma\mu$, égales aux précédentes (fig. 697).

Si les filets magnétiques restaient parallèles, les extrémités des filets ou les masses magnétiques libres occuperaient les *deux bases transversales* du barreau, et les pôles eux-mêmes se trouveraient sur ces bases. Les filets élémentaires ne doivent pas rester parallèles entre eux, car les pôles sont toujours à une certaine distance des extrémités.)

AIMANTATION PAR INFLUENCE

860. Champ magnétique. — On appelle *champ magnétique* d'un aimant ou d'un système d'aimants *la portion de l'espace dans laquelle agissent les forces magnétiques* qu'ils exercent. Comme ces forces décroissent très vite quand la distance augmente (855), un champ magnétique est pratiquement limité.

861. Aimantation du fer doux. — Une substance magnétique placée dans un champ magnétique *devient un aimant*. Ainsi un morceau de fer pur ou *fer doux*, placé à une petite distance d'un



Fig. 701.

aimant, sur son prolongement, attire *immédiatement* la limaille à ses extrémités, c'est-à-dire devient un aimant offrant une région moyenne et deux pôles (fig. 701). En approchant une petite aiguille aimantée, on reconnaît que le fer doux offre des pôles en a et b , et que les pôles en regard b et A sont de noms contraires et s'attirent. Le fer doux $a b$

pourra agir sur un autre barreau de fer doux placé à sa suite qui s'aimantera comme lui et dans le même sens, mais moins fortement.

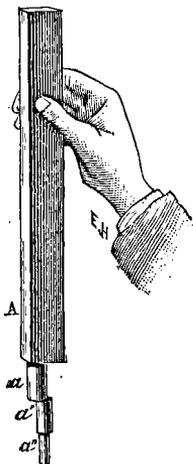


Fig. 702.

Si les barreaux approchés sont en fer pur, leur aimantation par influence se produit instantanément, mais elle cesse aussi dès qu'on éloigne l'aimant AB, sans que *ab* garde rien de ses propriétés attractives.

Dans l'attraction d'une substance magnétique par un aimant, l'attraction ne s'exerce qu'entre deux aimants puisque la substance magnétique s'aimante au moment de son attraction.

L'aimantation par influence d'un barreau *a* augmente quand la distance diminue, et si l'attraction des deux pôles en regard sur A et *a* est supérieure au poids du fer *a*, celui-ci *reste suspendu* au barreau A. On suspendra de même à *a* un autre barreau plus petit *a'*, et ainsi de suite en formant une chaîne magnétique (fig. 702).

862. Aimantation de l'acier. — Un barreau d'acier placé en prolongement de l'aimant AB s'aimante moins rapidement et moins énergiquement que le fer doux, mais il conserve une portion notable de son magnétisme après que l'influence a cessé. Son *magnétisme rémanent* est considérable.

Force coercitive. — Les variations dans le degré d'aimantation des diverses variétés de fer sont attribuées à une résistance des molécules à l'orientation, appelée *force coercitive*. Très faible dans le fer doux, la force coercitive est beaucoup plus forte dans le fer combiné avec quelques corps étrangers tels que le carbone, le chrome en faibles proportions. La force coercitive de l'acier (fer et carbone) devient maximum quand il a été chauffé au rouge vif et *trempe* soit par un refroidissement brusque, soit par une compression énergique pendant le refroidissement.

MÉTHODES D'AIMANTATION

863. Les aimants industriels sont en acier trempé. Un barreau d'acier soumis à l'influence magnétique d'un aimant, ou simplement

à l'action de la Terre, prend une faible aimantation ; les molécules s'aimantent par influence, leurs axes magnétiques s'orientent parallèlement à la force magnétique. L'aimantation permanente est accrue si pendant l'influence le barreau est soumis à des chocs, à des vibrations, à des *frictions*. Les anciennes méthodes d'aimantation par les aimants sont des méthodes de friction.

Aimantation par la simple touche (fig. 703). — La simple touche consiste à frotter un barreau d'acier A'B' avec un pôle d'aimant B

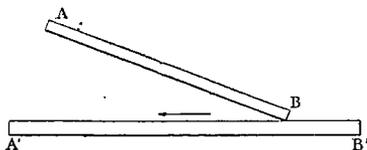


Fig. 703.

(par exemple un pôle sud) d'une extrémité à l'autre, *toujours dans le même sens*. Ce pôle sud détermine un pôle nord à l'extrémité dont il s'éloigne à la fin de chaque friction.

Aimantation par la touche séparée (fig. 704). — Au milieu du barreau à aimanter on applique les pôles opposés de deux barreaux et on les écarte *simultanément*, l'un dans un sens, l'autre en sens contraire jusqu'aux extrémités ; là, on enlève les deux barreaux, on les reporte au milieu et on les écarte de nouveau en effectuant toujours le déplacement *dans le même sens* pour chaque barreau. Un pôle A développe un pôle contraire à l'extrémité qui se trouve en contact avec lui à la fin de chaque friction.

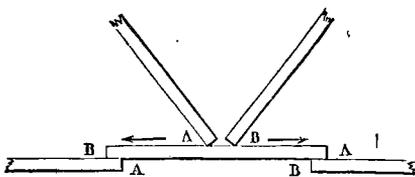


Fig. 704.

Les aimants mobiles sont inclinés d'environ 30° sur le barreau à



Fig. 705.

aimanter, et on augmente leur effet en faisant reposer pendant l'aimantation les extrémités du barreau à aimanter sur des pôles fixes respectivement contraires à ceux qu'on va développer.

Après un certain nombre de frictions avec de forts aimants, le magnétisme ne croît plus.

Quand l'aimantation par friction est mal faite, un barreau peut présenter plus de deux pôles. On appelle *points conséquents* ces pôles supplémentaires. Dans un barreau présentant des points conséquents, deux pôles consécutifs sont toujours de signes contraires (fig. 705).

864. Aimantation par les courants. — Les courants électriques produisent des champs magnétiques et servent à former des aimants très réguliers et très puissants. Nous étudierons en électricité dynamique ce procédé d'aimantation (995).

865. Aimantation maximum et aimantation permanente. — Un certain nombre de frictions avec de forts aimants ou électro-aimants donnent à un barreau d'acier son aimantation *maximum*. Après l'aimantation, le magnétisme du barreau diminue progressivement jusqu'à un état permanent. A cet état, le barreau est dit aimanté à *saturation*. Un acier conserve une fraction d'autant plus grande de son aimantation maximum qu'il a été plus fortement trempé.

Variations de l'aimantation avec la température. — L'aimantation d'un aimant diminue quand la température s'élève, mais reprend sa valeur par le refroidissement. Cependant, à une température très élevée, l'aimant perd entièrement son aimantation.

Le fer doux au rouge cesse aussi d'être attiré par un aimant.

Faisceaux magnétiques. — L'observation ayant fait voir que l'aimantation ne pénètre qu'à une petite profondeur, on obtient des aimants puissants en formant des faisceaux de lames d'acier qu'on aimante séparément et qu'on superpose ensuite. Les pôles de même nom sont engagés ensemble dans une pièce de fer doux qui s'aimante par influence et constitue le pôle correspondant du faisceau. Souvent on courbe les lames pour donner au faisceau la forme d'un fer à cheval.

DIAMAGNÉTISME

(**866. Substances paramagnétiques et diamagnétiques.** — Tous les corps sont sensibles à l'action des aimants *puissants*. Certains corps comme

le fer, sont attirés et dits magnétiques ou *paramagnétiques*, d'autres, comme le bismuth, sont repoussés et dits *diamagnétiques*.

Un pôle attire une boule de fer parce qu'il y fait naître deux pôles et qu'un pôle de nom contraire apparaît à la partie la plus voisine. Une balle de bismuth est repoussée, comme si le pôle de l'aimant faisait naître dans la partie voisine du bismuth un pôle de même nom qui est repoussé.

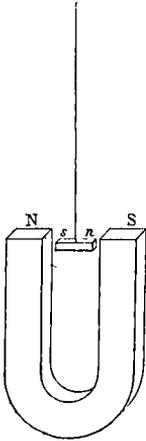


Fig. 706.

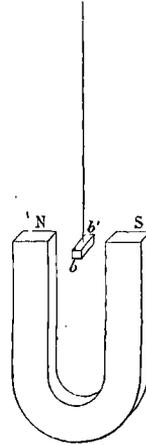


Fig. 707.

Les corps magnétiques et diamagnétiques se reconnaissent à un autre caractère. Un petit barreau magnétique suspendu horizontalement en son milieu entre les deux pôles d'un fort aimant en fer à cheval prend la direction de la ligne des pôles (fig. 706); chaque pôle de l'aimant fait en effet naître dans la partie voisine du barreau un pôle de nom contraire, et il y a attraction de N sur s et de S sur n, ce qui explique la déviation axiale. Un petit barreau de bismuth suspendu de même horizontalement en son milieu s'oriente perpendiculairement à la ligne des pôles (fig. 707), car lorsque le bismuth s'écarte de cette direction, le pôle dont il s'approche fait naître dans la partie voisine du bismuth un pôle de même nom qu'il repousse.)

MAGNÉTISME TERRESTRE

867. Direction d'un barreau aimanté par le couple terrestre. — Nous avons vu qu'un barreau aimanté librement suspendu par son centre de gravité et par conséquent soustrait à l'effet de la

pesanteur, est soumis à l'action de deux forces égales, parallèles et dirigées en sens contraire, dont l'ensemble constitue le *couple terrestre* (857). La force du couple varie en intensité et en direction aux différents points du globe; en un même lieu, elle se modifie lentement avec le temps. Dans une région de petite étendue, cette force est constante: en d'autres termes, en un lieu donné, *le champ magnétique terrestre est uniforme* (881).

Dans nos régions, un barreau aimanté librement suspendu par son centre de gravité s'écarte peu de la direction nord-sud, mais il n'est pas horizontal, son extrémité *nord* plonge au-dessous de l'horizontale.

868. Méridien magnétique. — *Le plan vertical mené au point M de suspension d'un barreau, par la verticale du lieu et par la direction NF (fig. 709) de la force du couple terrestre, se nomme le méridien magnétique du lieu. C'est le plan vertical qui passe par l'axe magnétique d'un aimant librement suspendu.*

869. Déclinaison. — En un lieu déterminé, l'angle dièdre de la partie nord du méridien magnétique et de la partie nord du méridien astronomique ⁽¹⁾ se nomme *la déclinaison*.

L'angle des parties nord des méridiennes magnétique et astronomique est l'angle plan du dièdre et mesure la déclinaison. Les *méridiennes* sont des horizontales menées dans le méridien magnétique et dans le méridien astronomique.

870. Inclinaison. — On appelle *inclinaison* l'angle que fait dans le méridien magnétique la direction de la force qui agit sur l'extrémité nord avec l'horizontale menée dans la partie nord du méridien magnétique, ou l'angle que fait avec cette horizontale la direction nord de l'axe magnétique d'une aiguille aimantée.

Les angles de déclinaison et d'inclinaison font connaître la direction de la force magnétique terrestre en un lieu donné.

(871. Décomposition de la force magnétique terrestre (fig. 708). — Soit N le pôle nord d'une aiguille aimantée librement suspendue, et soit F celle des deux forces du couple terrestre qui agit sur ce pôle.

(1) Les *pôles géographiques* sont les deux points de la surface du globe que rencontre l'axe terrestre, c'est-à-dire la ligne autour de laquelle la Terre exécute sa rotation diurne. Le *méridien géographique* ou astronomique d'un lieu est un plan passant par l'axe terrestre et par la verticale du lieu. Le Soleil traverse ce méridien à midi.

Le plan vertical VNF mené par la force F est le *méridien magnétique*; l'horizontale NH tracée dans ce plan est la composante horizontale de la force F dans le méridien magnétique; la verticale NV est la composante verticale de la force F dans le même plan; l'angle FNH est l'angle i d'inclinaison.

$$\begin{aligned} NH &= NF \cos i \\ NV &= NF \sin i \end{aligned}$$

Dans le plan horizontal qui passe par N, décomposons la force F en deux autres NX et NY rectangulaires entre elles; θ désignant l'angle XNH,

$$\begin{aligned} NX &= NH \cos \theta \\ NY &= NH \sin \theta \end{aligned}$$

La force NF est ainsi décomposée en trois composantes rectangulaires entre elles NV, NX et NY.

$$\begin{aligned} NV &= NF \sin i \\ NX &= NF \cos i \cos \theta \\ NY &= NF \cos i \sin \theta. \end{aligned}$$

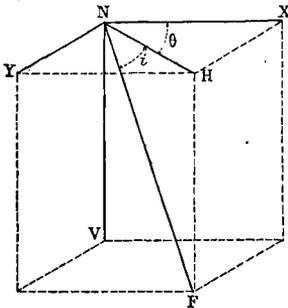


Fig. 708.

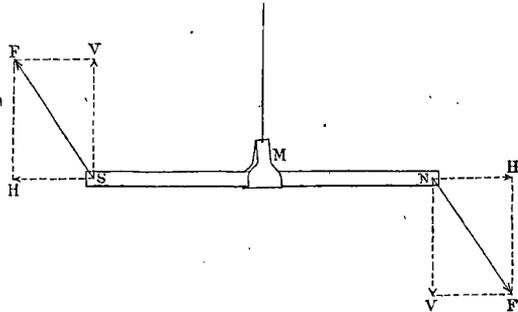


Fig. 709.

Dans le méridien magnétique, la force NF peut donc se décomposer en deux composantes : une horizontale NH et une verticale NV (fig. 709).

Si l'aiguille est complètement libre, elle se dirige suivant NF.

Si l'aiguille n'est mobile que dans un plan horizontal, comme l'est une aiguille de déclinaison, elle est en équilibre quand elle a pris la direction NH.

Si l'aiguille tourne dans un axe horizontal et n'est mobile que dans un plan vertical, elle sera dirigée suivant NF lorsque ce plan sera le plan du méridien magnétique (fig. 716). Dans le cas où le plan vertical de l'aiguille fait un angle θ avec le méridien magnétique, NY étant la direction de l'axe de rotation, le pôle N est soumis seulement à l'action des composantes NX et NV, et l'aiguille se dirige suivant leur résultante R (fig. 710).

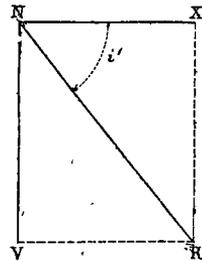


Fig. 710.

Désignons par i' l'angle RNX

$$\operatorname{tg} i' = \frac{NV}{NX} = \frac{NF \sin i}{NF \cos i \cos \theta} = \frac{\operatorname{tg} i}{\operatorname{csc} \theta}$$

Si $\theta = 90^\circ$ $i' = 90^\circ$; l'aiguille aimantée se tient donc verticale dans un plan perpendiculaire au méridien magnétique.

Oscillations d'un barreau aimanté. — Une aiguille aimantée écartée de sa position d'équilibre y revient par une série d'oscillations. Lorsque l'angle d'écart est petit, les oscillations sont *isochrones* comme celles d'un pendule pesant.

Voici comment on peut s'en rendre compte. Considérons en particulier une aiguille de déclinaison mobile autour d'un axe vertical qui se projette en O.

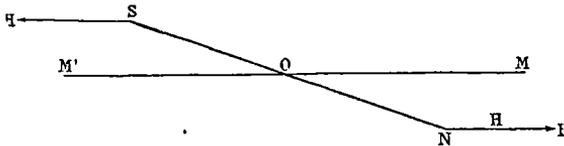


Fig. 711.

Elle est soumise à deux forces égales et parallèles NH et SH appliquées à ses deux pôles (fig. 711). Le couple de ces deux forces peut être remplacé par un couple de même moment (28) situé dans le même plan, ayant un bras de levier moitié moindre et une force double 2NH, l'une des forces étant appliquée en N et l'autre en O (fig. 712). La force appliquée en O n'aura pas d'effet appréciable⁽¹⁾, l'autre force agira seule sur le barreau

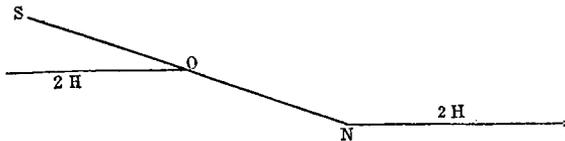


Fig. 712.

pour le ramener dans le méridien magnétique. Cette dernière force, *la composante horizontale de la force du couple terrestre*, constante en grandeur et en direction, comme l'est le poids d'un pendule pesant, donnera au barreau aimanté, écarté du méridien magnétique, le mouvement oscillatoire d'un pendule écarté de la verticale.

La durée de l'oscillation du barreau aimanté variera donc en raison inverse de la racine carrée (114,4⁰) de la composante horizontale de la force du couple terrestre. Désignons par H et H' cette composante horizontale en deux lieux différents, représentons par t et t' les durées correspondantes de l'oscillation du barreau

$$\left. \begin{aligned} t^2 &= \frac{H'}{H} \\ t'^2 &= \frac{H}{H'} \end{aligned} \right\}$$

872. Mesure de la déclinaison. — Une aiguille aimantée soutenue par son centre de gravité s'incline. On l'*équilibre*, c'est-à-dire

(1) Cette force ne pourrait que dévier le barreau de la verticale; or, elle est toujours très faible par rapport au poids du barreau.

on ramène la ligne des pôles à l'horizontalité par un contre-poids appliqué à une distance convenable du point de suspension.

Dans une **boussole de déclinaison**, une aiguille équilibrée, en forme de losange allongé, est *mobile dans un plan horizontal*. Son axe de figure ou la grande diagonale du losange se meut en regard

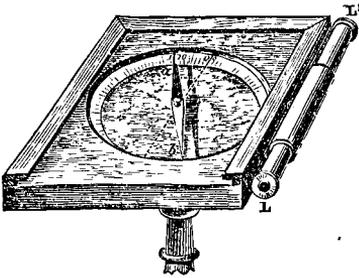


Fig. 713.

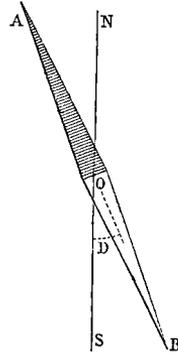


Fig. 714.

d'une circonférence divisée sur laquelle est marquée la trace du méridien astronomique.

Dans l'un des modèles les plus simples de la boussole de déclinaison (fig. 713), parallèlement à l'un des bords de la boîte qui contient le cercle divisé et l'aiguille aimantée, est fixée une lunette astronomique LL' dont l'axe optique est parallèle au diamètre $0^{\circ} - 180^{\circ}$ du cercle divisé. On oriente l'axe de cette lunette dans le méridien astronomique du lieu.

Si la ligne des pointes AB coïncidait avec la direction de la parallèle OH à la ligne des pôles menée par le point de suspension, l'angle D de la ligne des pointes et de la trace NS du méridien astronomique serait la déclinaison (fig. 714).

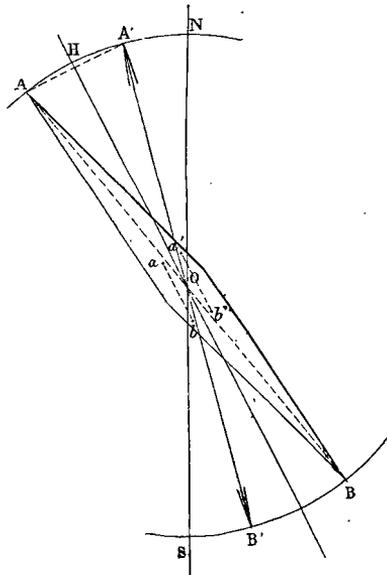


Fig. 715.

Méthode du retournement. — Habituellement, la ligne des pointes OA et la parallèle OH à la ligne des pôles ne coïncident pas et font entre elles un petit angle. On lit d'abord l'angle AON (fig. 715).

On retourne ensuite l'aiguille de manière que la face de l'aiguille qui était au-dessous soit maintenant au-dessus; la ligne des pôles *ab* reprend sa direction après le retournement et vient en *a'b'* à la même distance du point O et dans une position symétrique de *ab*; tous les points de l'aiguille prennent de nouvelles positions, symétriques des précédentes par rapport à la droite OII, menée parallèlement à *ab* par le point O; en particulier, la ligne OA passe en OA' et fait le même angle que précédemment avec OII.

On lit actuellement A'ON. L'angle cherché est HON

$$\text{HON} = \frac{\text{AON} + \text{A'ON}}{2}.$$

873. Mesure de l'inclinaison. — Dans la *boussole d'inclinaison* une aiguille aimantée est mobile dans un plan vertical VV' perpendiculaire à un axe en acier qui passe par son centre de gravité, elle est ainsi soustraite à l'action de la pesanteur.

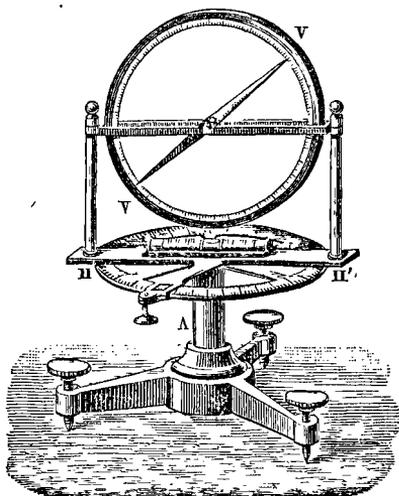


Fig. 716.

L'aiguille se meut en regard d'un cercle vertical divisé. Ce cercle peut tourner autour d'un axe vertical dont le prolongement passe par le centre d'un second cercle divisé IIII' rendu horizontal par trois vis calantes (fig. 716). Une cage en verre protège l'aiguille contre les agitations de l'air.

Si l'on connaît la déclinaison et le diamètre du cercle horizontal dirigé suivant le méridien astronomique du lieu, on oriente le cercle vertical dans un plan faisant avec le méridien astronomique l'angle de déclinaison; l'aiguille est alors mobile dans le méridien magnétique, et son axe magnétique se place dans la direction de la force magnétique terrestre. L'angle de la ligne des pointes avec l'horizontale est lu sur le cercle vertical; on retourne ensuite l'aiguille de

manière que la face antérieure de l'aiguille passe en arrière et inversement, on lit le nouvel angle de la ligne des pointes avec l'horizontale : la moyenne des deux angles lus est l'inclinaison.

Recherche du méridien magnétique. — Habituellement, la boussole d'inclinaison est elle-même appliquée à la recherche du méridien magnétique. Quand le plan d'oscillation de l'aiguille est perpendiculaire au méridien magnétique, l'axe de rotation est dirigé suivant la composante horizontale de la force magnétique. La composante verticale est alors seule efficace et l'aiguille se tient verticalement (871). D'après cela, si l'on oriente le cadre d'oscillation de façon à ce que l'aiguille soit verticale, il suffit ensuite de faire tourner ce cercle de 90° pour qu'il coïncide avec le méridien magnétique.

(874. **Variations de la déclinaison.** — La déclinaison est dite *occidentale* ou *orientale* suivant que la partie nord du méridien magnétique est à l'ouest ou à l'est du méridien astronomique, elle est occidentale en Europe, orientale en Chine. Sur la ligne de *déclinaison nulle*, l'aiguille se dirige exactement du nord au sud. Cette ligne de déclinaison nulle se déplace lentement sur le globe terrestre.

En un lieu déterminé, la déclinaison éprouve des variations *séculaires*. A Paris, l'aiguille aimantée paraît exécuter une oscillation lente à l'est et à l'ouest du méridien géographique. Cette oscillation, d'une durée de plusieurs siècles, aurait une amplitude d'une vingtaine de degrés. La déclinaison était orientale à Paris à la fin du xvi^e siècle, nulle vers le milieu du $xvii^e$ siècle, elle devint ensuite occidentale, atteignit son maximum occidental vers 1815, avec 24° ; elle est encore actuellement occidentale et continue à diminuer. Sa valeur, à Paris, le 1^{er} janvier 1899, était 15° .

La déclinaison éprouve encore des variations *annuelles* et *diurnes*. Enfin, des variations *accidentelles* se produisent pendant les orages, les tremblements de terre, les aurores boréales.)

875. Boussoles. — Quand on connaît la déclinaison aux différents lieux du globe, l'aiguille de déclinaison peut servir d'indicateur de route. De là vient l'usage des boussoles.

Boussole marine. — C'est une aiguille fixée sur une lame circulaire de mica divisée en degrés et reposant sur un pivot. Par une suspension à la Cardan, le pivot reste vertical malgré les oscillations du navire et occupe le centre d'une boîte sur laquelle est marquée une ligne fixe dite *ligne de foi*, dirigée suivant l'axe du navire.

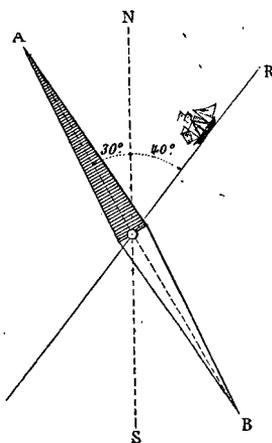


Fig. 717.

Supposons que la route à suivre ait une direction OR (fig. 717) et fasse un angle de 40° à l'est avec la ligne nord-sud NS et que la déclinaison soit de 30° à l'ouest; OA étant la direction de l'aiguille, le gouvernail devra être manœuvré de façon que la direction nord de la ligne de foi fasse un angle de 70° avec l'extrémité nord de l'aiguille.

(876. Variations de l'inclinaison. — L'inclinaison varie aux différents lieux du globe. Elle est nulle au voisinage de l'équateur. La courbe d'inclinaison nulle, dite *équateur magnétique*, coupe deux fois l'équateur géographique. L'inclinaison est égale à 90° en un point assez voisin du pôle nord géographique.

En un lieu déterminé, l'inclinaison éprouve des variations *séculaires*. Elle était de 75° à Paris en 1671; depuis, elle diminue; sa valeur le 1^{er} janvier 1899 était de 65° .

L'inclinaison présente des variations *annuelles* et *diurnes* et en outre des perturbations *accidentelles* dues aux mêmes causes que les variations de la déclinaison.

877. Intensité de la force magnétique terrestre. — L'intensité magnétique T en un point du globe est la force qui agit en ce point sur l'unité de magnétisme.

Désignons par H la composante horizontale de l'intensité, par i l'inclinaison, $H = T \cos i$. La valeur de H à Paris, le 1^{er} janvier 1899, était $H = 0,196$, d'où $\frac{H}{\cos i} = 0,466$ pour la force totale T.

Le pôle d'une aiguille aimantée de masse magnétique μ est sollicité à Paris par une force égale à $\frac{\mu \cdot 0,196}{\cos 65^\circ}$ dynes)

878. Aimant terrestre. — Une petite aiguille mobile horizontalement sur un pivot, placée au-dessus d'un barreau aimanté un peu énergique, s'oriente suivant l'axe du barreau (fig. 718) de telle façon que les pôles de noms contraires soient tournés les uns vers les autres. L'aiguille rapprochée des extrémités du barreau s'incline vers les centres d'attraction.

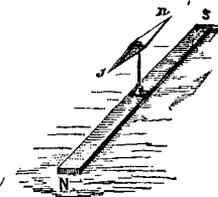


Fig. 718.

Cette expérience complétée par les résultats relatifs à l'orientation d'un barreau aimanté aux différents lieux du globe permet de concevoir un aimant passant par le centre du globe, dirigé à peu près du nord au sud et produisant les apparences que nous observons.

L'un des pôles de cet aimant terrestre est situé dans l'hémisphère boréal, l'autre appartient à l'hémisphère austral.

(On peut se représenter d'une façon approchée les variations de la déclinaison et de l'inclinaison en imaginant à l'intérieur du globe un axe magnétique AB (dirigé suivant l'aimant terrestre) peu incliné sur l'axe géographique NS, et en traçant sur la sphère terrestre des méridiens et des parallèles par

rapport à cet axe (fig. 719). Un grand cercle mené en un point du globe par l'axe AB est le méridien magnétique du lieu.

La déclinaison en un point P est l'angle $\alpha P c$ du méridien magnétique ABP et du méridien géographique NSP. Un méridien magnétique forme une ligne d'égale déclinaison. La déclinaison est nulle dans le méridien magnétique NSB qui contient à la fois l'axe magnétique et l'axe géographique : l'aiguille aimantée s'y dirige constamment du nord au sud.

Les parallèles magnétiques sont les lignes d'égale inclinaison. L'équateur magnétique EOE' réunit les points où l'inclinaison est nulle, une aiguille aimantée soutenue par son centre de gravité s'y tient horizontale; l'inclinaison est égale à 90° aux pôles magnétiques A et B, points où l'axe magnétique perce le globe; ces points sont peu éloignés des pôles géographiques; l'aiguille aimantée s'y tient verticale. De l'équateur aux pôles magnétiques, l'inclinaison croît de 0° à 90° .)

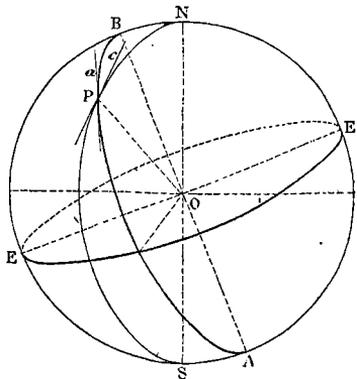


Fig. 719.

Dans l'hypothèse de l'aimant terrestre, il est naturel d'appeler pôle boréal le pôle de cet aimant qui se trouve dans l'hémisphère boréal et pôle austral celui de l'hémisphère austral. Les pôles qui s'attirent étant des pôles contraires, le pôle nord d'un aimant, attiré par le pôle boréal de l'aimant terrestre, sera de la nature du pôle austral; c'est pour cette raison que le nom de *pôle austral* est souvent donné au pôle nord d'un aimant, et le nom de *pôle boréal* au pôle sud.

879. Moment magnétique d'un aimant. — On appelle *moment magnétique* d'un aimant le produit μL de la masse magnétique μ de chacun de ses pôles par la distance L qui les sépare.

Dans un champ magnétique uniforme, tel que le champ magnétique terrestre, le moment du couple exercé sur un aimant mobile horizontalement autour d'un axe vertical est $L\mu H$ lorsque l'aimant est perpendiculaire à la force magnétique; en effet, la force qui s'exerce sur chacun des pôles est μH , et la distance des deux forces est L . Le moment de ce couple reste le même quand L et μ changent tous les deux, pourvu que le produit $L\mu$ ne varie pas.

Applications. — 1° Quelle est la force qui s'exerce entre deux pôles de masses magnétiques 32 et 40 à une distance de 10 centimètres?

2° Un pôle magnétique de masse 90 attire un autre pôle situé à 2 centimètres avec une force égale au poids d'un gramme. Quelle est la masse du deuxième pôle?

3° Quel est le nombre d'unités magnétiques d'un pôle qui est poussé par une force de 9 dynes quand on le place dans un champ magnétique d'intensité 0,18?

4° Un aimant dont les pôles valent 300 unités est placé dans un champ magnétique uniforme où l'intensité est 0,466. Quelles sont les forces qui agissent sur ces pôles?

5° En un lieu où la composante horizontale de l'intensité magnétique est 0,196, quelle est la force du couple directeur qui agit sur une aiguille de déclinaison dont les masses magnétiques sont égales à 100, lorsque l'axe magnétique de cette aiguille fait un angle de 30° avec le méridien magnétique?

6° Une aiguille de déclinaison fait 50 oscillations par minute en un lieu où l'angle d'inclinaison est 65° , et 47 oscillations par minute en un lieu où l'angle d'inclinaison est 70° . Comparer les valeurs T et T' de la force magnétique aux deux stations.

7° L'angle d'inclinaison étant de 65° , et la force qui agit sur l'un des pôles d'une aiguille aimantée étant égale à 0,465 dynes, quel poids faut-il appliquer à 2 centimètres de l'aiguille soutenue en son milieu pour la rendre horizontale, la distance des pôles étant 10 centimètres?

8° Quel est angle avec l'horizontale de l'aiguille d'une boussole d'inclinaison, lorsque le plan vertical dans lequel elle est mobile fait un angle de 30° avec le méridien magnétique?

FLUX MAGNÉTIQUE

880. Lignes de force. — Nous avons appelé *champ magnétique* (860) l'espace dans lequel un système magnétique exerce son influence.

Un pôle magnétique situé en un point d'un champ magnétique éprouve de la part des masses magnétiques de ce champ une action résultante qui le pousse dans une direction déterminée⁽¹⁾. Si le pôle magnétique peut se déplacer dans la direction de la force qui agit à chaque instant sur lui, la trajectoire qu'il suit se nomme *ligne de force*. La tangente en chaque point d'une ligne de force est la direction de la force en ce point.

La direction de la force en un point est la direction d'une aiguille aimantée très courte suspendue par son centre de gravité. En effet, des forces magnétiques égales et contraires sont appliquées aux deux pôles de cet aimant, et son *axe magnétique prend la direction de la ligne de force* au point où il se trouve.

(1) En chaque point d'un champ magnétique, la résultante magnétique des actions exercées sur une masse magnétique peut être calculée d'après la loi de Coulomb, si l'on connaît la position et la grandeur des masses agissantes.

Considérons par exemple un aimant droit de petite section. Les deux pôles d'une petite aiguille aimantée placée en P sont soumis à deux forces F égales et contraires suivant lesquelles elle se dirige. Chacune de ces forces est la résultante des deux actions f et f' exercées par les pôles N et S (fig. 720).

En chaque point de l'espace, il passe une ligne de force; les lignes de force ne se coupent pas, car en un point les forces magnétiques ont une résultante déterminée, et une aiguille aimantée ne peut y prendre qu'une position d'équilibre.

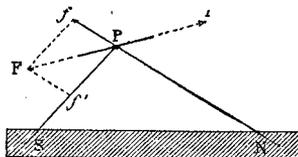


Fig. 720.

Une particule de limaille de fer, libre dans un champ magnétique, devient par influence un aimant dont les deux pôles sont très voisins. Son axe magnétique est sa plus grande dimension (888) : il se dirige suivant la ligne de force.

881. Champ magnétique uniforme. — Un champ magnétique dans lequel la *force magnétique reste constante en grandeur et en direction* est dit uniforme. Dans un champ magnétique uniforme, les lignes de force sont des *droites parallèles*.

Sur notre globe, une aiguille aimantée se dirige, bien que nous ne voyions à proximité ni aimant ni fer; l'aiguille se trouve dans un champ magnétique puisqu'elle est soumise à une action; ce champ, appelé *champ magnétique terrestre*, est uniforme dans une portion restreinte de l'espace.

882. Spectres magnétiques. — Les spectres magnétiques donnent le moyen de révéler les lignes de force d'un champ magnétique. On pose sur un aimant une feuille de carton lisse sur laquelle on sème avec un tamis de fine limaille de fer; si l'on fait sauter les grains de limaille par de légères secousses, ils se distribuent en trainées figurant des courbes régulières qui convergent vers les pôles; ces

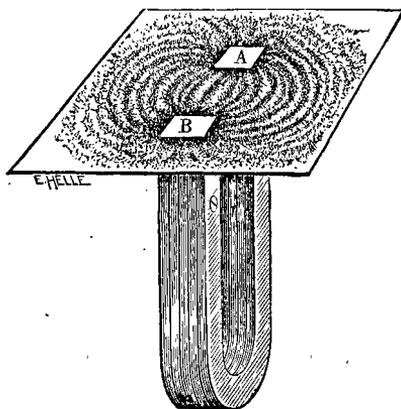


Fig. 721.

courbes forment le *spectre magnétique* de l'aimant (fig. 721).

Chaque particule de limaille s'est orientée de telle façon que sa plus grande dimension soit tangente à la ligne de force. Les particules s'attirent par leurs pôles voisins qui sont contraires et forment des chaînes continues qui dessinent les lignes de force.

Dans un champ magnétique, l'orientation des filaments de limaille suivant les lignes de force figure matériellement la distribution et le trajet de ces lignes.

EXEMPLES DE SPECTRES MAGNÉTIQUES

883. Aimant droit. — Formons le spectre magnétique ou le tracé des lignes de force dans un plan passant par les deux pôles

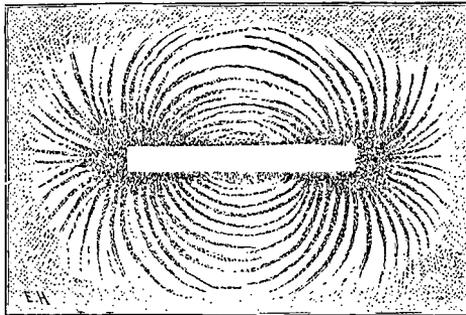


Fig. 722.

(fig. 722). Les lignes de force *semblent partir d'une extrémité de l'aimant*, et, après s'être épanouies dans diverses directions, *retourner à l'autre pôle*.

Courbes magnétiques fermées. — On convient de prendre pour *sens d'une ligne de force* en un point, la direction suivant laquelle tendrait à se mouvoir une masse magnétique *nord* placée en ce point.

D'après cette convention, les lignes de force vont, à l'extérieur de l'aimant, du pôle nord au pôle sud ; par analogie avec ce qui se passe pour les solénoïdes (975), *on a admis* que toutes ces lignes se continuent à l'intérieur de l'aimant, suivent la direction de l'axe, du pôle

sud au pôle nord, et forment ainsi dans l'espace des *courbes fermées*.

Le chemin suivi par les lignes de force est appelé **circuit magnétique**.

Pôle d'un aimant. — En saupoudrant de limaille de fer un carton appliqué normalement à l'axe magnétique sur le pôle d'un aimant droit, on voit les lignes de force *rayonner* dans tous les sens autour du pôle ; elles seront, d'après la convention qui vient d'être faite, divergentes autour d'un pôle nord, convergentes pour un pôle sud.

Aimant en fer à cheval. — Les chaînes de limaille vont d'un pôle à l'autre ; plus les pôles sont rapprochés, plus les lignes de force sont resserrées entre ces pôles, et plus elles sont rares à l'extérieur (fig. 721).

Système de deux pôles magnétiques voisins. — 1° **Pôles de même nom** (fig. 723). — La force est très faible dans l'espace compris entre les deux pôles, puisque les actions exercées sur une masse

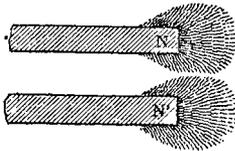


Fig. 723.

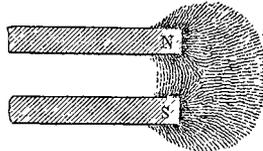


Fig. 724.

magnétique nord par les deux pôles contraires ont des directions opposées et se retranchent ; les traînées de limaille y sont rares. A l'extérieur, les forces s'ajoutent : les traînées de limaille se resserrent là où la force magnétique est la plus grande.

2° **Pôles de noms contraires.** — Les forces exercées sur une masse magnétique comprise entre les deux pôles s'ajoutent car elles sont de même sens. Entre les deux pôles les lignes de force sont nombreuses et serrées (fig. 724).

20 FLUX DE FORCE MAGNÉTIQUE

884. Nombre des lignes de force. — Le nombre des lignes de force que l'on pourrait considérer dans un champ magnétique est

théoriquement infini. Dans les spectres magnétiques, les lignes de force dessinées par la limaille sont d'autant plus serrées que la force est plus grande, c'est-à-dire au voisinage des pôles. Elles sont espacées là où la force est faible.

Cette apparence a donné l'idée de représenter par un certain nombre de lignes de force l'intensité de la force en un point d'un champ magnétique. Cette représentation résulte d'une convention que nous allons exposer.

885. Flux de force d'un pôle magnétique. — Autour d'un pôle magnétique de magnétisme m , on convient de mener $4\pi m$ lignes de force, ou rayons issus du pôle (4π autour d'un pôle de magnétisme égal à l'unité). Ces rayons forment ce que l'on nomme le nombre de lignes de force ou le *flux de force* issu du pôle. Ce flux $4\pi m$ se propage à l'infini en divergeant du pôle, si le pôle est nord (fig. 725); en convergeant vers le pôle, si c'est un pôle sud.

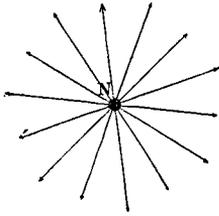


Fig. 725.

886. Relation entre le flux de force et la force magnétique. — Si l'on décrit autour d'un pôle comme centre une sphère de rayon 1; comme la surface de cette sphère est égale à 4π , chaque centimètre carré de sa surface reçoit normalement m lignes de force; or m est aussi la valeur de la force exercée par la masse m sur une masse magnétique $+1$ qui serait à 1 centimètre du pôle.

L'unité de surface d'une sphère de rayon r et de surface $4\pi r^2$, ayant le pôle m pour centre, reçoit de ce pôle un flux de force égal à

$$\frac{4\pi m}{4\pi r^2} = \frac{m}{r^2}.$$

Or cette expression du flux représente encore la valeur de la force exercée par la masse m sur une masse magnétique $+1$ qui serait à la distance r du pôle.

On démontre que, dans un champ magnétique dû à des masses magnétiques quelconques, la somme des flux de force qui émanent des différents centres magnétiques et qui rencontrent une surface de 1 centimètre carré menée en un point P perpendiculairement à la direction de la force résultante, est encore égale à la force magnétique résultante sur une masse magnétique $+1$ située en ce point P.

(**Démonstration** (fig. 726). — Le flux total qui émane d'un pôle magnétique M de magnétisme m étant $4\pi m$, le flux compris dans un cône d'ouverture ω issu de M est $m\omega$.

En un point P imaginons une masse + 1, et menons une surface plane PA d'un centimètre carré et normale à la résultante; joignons son contour au

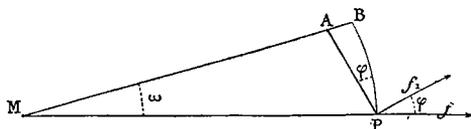


Fig. 726.

point M; nous formons un tube conique d'ouverture ω qui découpe une surface PB ou σ sur la sphère de centre M et de rayon r qui passe en P. Désignons par φ l'angle de cette surface sphérique et du plan PA.

$$\sigma = r^2 \omega = 1. \cos \varphi \quad (\text{dans le triangle rectangle PAB, } PB = PA \cos \varphi)$$

$$mr^2 \omega = m \cos \varphi.$$

$$\text{d'où } m\omega = \frac{m}{r^2} \cos \varphi.$$

$m\omega$ est le flux de force issu de M qui rencontre la surface PA; $f_1 = \frac{m}{r^2} \cos \varphi$ est la composante suivant la normale à cette surface de la force f exercée par la masse m sur une masse + 1 en P.

Ces préliminaires étant établis, considérons en P la résultante F de toutes les actions exercées sur une masse + 1 par les différentes masses magnétiques m, m', \dots du champ; appelons $\varphi, \varphi', \varphi''$ les angles avec F des différentes forces $\frac{m}{r^2}, \frac{m'}{r'^2}, \dots$

$$F = \frac{m}{r^2} \cos \varphi + \frac{m'}{r'^2} \cos \varphi' + \dots$$

$$\text{D'autre part } \frac{m}{r^2} \cos \varphi = m\omega$$

$$\frac{m'}{r'^2} \cos \varphi' = m'\omega'$$

$$\text{Par conséquent } F = m\omega + m'\omega' \dots$$

Ce qui démontre le théorème énoncé.)

Il résulte donc de notre convention (885) que si l'intensité magnétique en un point vaut n dynes, un centimètre carré mené en ce point perpendiculairement à la force résultante intercepte un flux de force total égal à n .

Champ magnétique uniforme. — Dans un champ magnétique uniforme, la force est constante en grandeur et en direction. En tout

point du champ, une surface d'un centimètre carré menée normalement à la direction de la force reçoit un flux *constant* dont la valeur est égale à la force. Les lignes de force d'un champ magnétique uniforme sont donc *également espacées*.

Le flux qui traverse une surface S normale à la direction de la force a pour expression le produit de la force par la surface.

Un champ magnétique peut être considéré comme *un espace dans lequel se propage un flux de force*, dû aux aimants qui constituent le champ. Dans un champ uniforme, le flux est constant en grandeur et en direction,

887. Perméabilité magnétique. — Un flux magnétique circule sans perte, quels que soient les milieux qu'il rencontre, et choisit la route qui lui offre le moins de résistance. Les lignes de force d'un champ magnétique sont modifiées dans leur distribution par l'introduction dans le champ d'une substance magnétique.

Une substance magnétique se comporte comme si elle offrait au flux de force un passage plus facile que l'air, et les lignes de force convergent vers cette substance magnétique.

Le fer est la substance qui modifie le plus le spectre magnétique primitif, car c'est le fer qui offre le chemin le plus facile.

On appelle *coefficient de perméabilité magnétique* le rapport du nombre de lignes de force qui traversent la section d'un barreau magnétique au nombre qui traversait auparavant une égale section d'air occupant la même position⁽¹⁾. *L'intensité d'aimantation* est caractérisée par le flux de force qui traverse un centimètre carré de la section de l'aimant.

Anneau fermé. — Un anneau fermé peut être aimanté de façon à ne pas présenter de pôles et à ne pas agir sur des masses magnétiques extérieures; toutefois, il peut être considéré comme parcouru par un flux magnétique qui reste constamment à *l'intérieur*; le circuit magnétique est l'anneau lui-même; si on le brise, chacun des fragments offre des pôles à ses extrémités.

Pôle d'aimant et fer doux. — La présence d'un morceau de fer doux dans le voisinage du pôle d'un aimant augmente le nombre des lignes de force dans l'espace qui le sépare du pôle et,

(1) Le coefficient de perméabilité de l'air est égal à l'unité; les corps diamagnétiques ont une perméabilité légèrement inférieure à celle de l'air.

d'autant plus, que la distance du pôle au fer doux est plus petite (fig. 727). Les lignes de force qui sortaient du pôle en rayonnant se dirigent pour la plupart vers le fer. Toutes les substances magné-



Fig. 727.

tiques, libres de s'orienter, s'aimantent de façon à diriger leur plus grande dimension suivant les lignes de force, ce qui diminue le trajet des lignes de force à travers les substances non magnétiques.

Cylindre creux de fer doux entre deux pôles contraires. — Les lignes de force qui vont d'un pôle à l'autre traversent pour la plupart la masse du cylindre et se rendent à l'autre pôle (fig. 728).

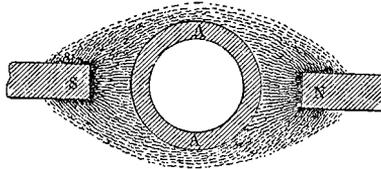


Fig. 728.

Quand l'épaisseur du cylindre est suffisante, il n'y a pas de ligne de force dans sa cavité; le cylindre constitue un *écran* magnétique, et une petite aiguille aimantée intérieure est soustraite aux actions des masses magnétiques extérieures.

888. Conservation des aimants. — L'aimantation d'un barreau aimanté abandonné à lui-même va en s'affaiblissant. Dans un aimant, chacun des filets magnétiques, et, dans un faisceau, cha-

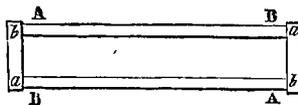


Fig. 729.

cune des lames subit des filets voisins ou des lames voisines une influence qui tend à produire une aimantation contraire. Cette *désaimantation* est favorisée par les chocs, les vibrations et les variations brusques de température; toutefois, elle n'a pas lieu si les

chaînes magnétiques sont *fermées* et ne présentent pas de magnétisme libre, en d'autres termes, si aucune ligne de force ne s'échappe à l'extérieur. On réalise à peu près cette condition en conservant dans une boîte les barreaux aimantés AB, placés parallèlement deux

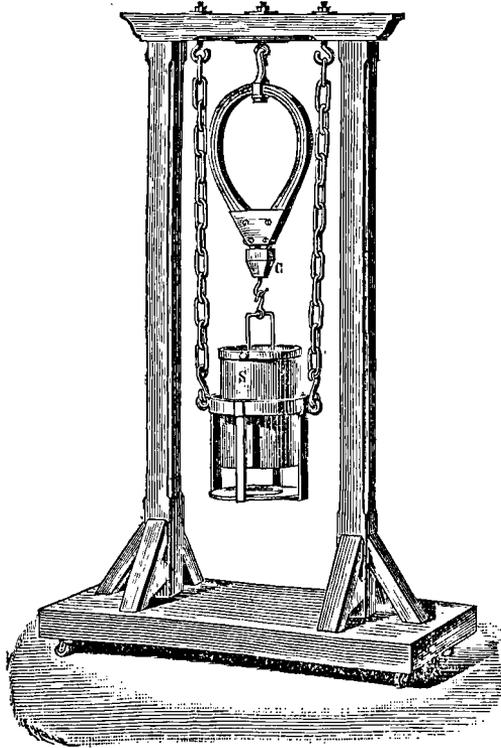


Fig. 730.

à deux, les pôles de noms contraires étant en regard et réunis par des pièces de fer doux *ab* appelées *contacts* (fig. 729). Les contacts s'aimantent par influence et ferment le circuit magnétique, car les lignes de force vont d'un pôle à l'autre en suivant les contacts. Comme un anneau, l'ensemble ainsi constitué n'exerce pas d'action magnétique à l'extérieur.

Dans un aimant en fer à cheval, on réunit aussi les deux pôles par un contact en fer doux C. On y suspend d'ordinaire un seau S dans lequel on place des poids (fig. 730), afin de mesurer la force portante.

889. Relation entre le flux de force et la position d'équilibre d'un aimant. — Dans un champ magnétique, un aimant

s'oriente de telle façon que les lignes de force du champ entrent par le pôle sud et que l'aimant embrasse un flux de force maximum.

C'est le cas d'un aimant placé dans un champ magnétique uniforme tel que le champ magnétique terrestre; son axe magnétique se dirige dans le prolongement des lignes de force et ces lignes traversent normalement sa section de son pôle sud à son pôle nord (aiguille de déclinaison).



ÉLECTRICITÉ DYNAMIQUE

890. L'électricité dynamique a pour objet spécial l'étude des effets du **courant électrique** ⁽¹⁾.

Pour produire un courant électrique, il faut une source ou un générateur d'électricité qui élève une masse électrique à un certain potentiel (808), et lui communique ainsi une *énergie potentielle*, comme une machine hydraulique élève une masse d'eau à un certain niveau d'où elle peut retomber.

Un **générateur d'électricité** présente deux *pôles* ou deux conducteurs à des potentiels différents : un pôle positif où le potentiel est plus élevé, et un pôle négatif où le potentiel est plus bas. Les deux pôles sont réunis par un circuit extérieur qui offre une pente le long de laquelle l'électricité positive descend du pôle positif au pôle négatif.

Parvenue au pôle négatif, l'électricité remonte au pôle positif par l'action élévatrice du générateur, en parcourant son circuit intérieur.

L'élévation de l'électricité à un potentiel plus élevé ne peut avoir lieu *qu'aux dépens d'une énergie particulière* : chimique, calorifique ou mécanique.

Les différents générateurs d'électricité se distinguent par la nature de l'énergie qui sert à entretenir leur fonctionnement.

La chute d'électricité le long du circuit produit le courant électrique; elle est accompagnée de diverses manifestations d'énergie.

L'électricité dynamique s'occupe des *diverses formes que peut prendre l'énergie électrique par l'intermédiaire du courant électrique*.

(1) Certains chapitres de l'électricité statique rentrent par cette définition dans l'électricité dynamique (effets des décharges des condensateurs).

PILE VOLTAÏQUE

La *pile* est une source d'électricité qui transforme de l'énergie chimique en énergie électrique.

891. Description d'un élément de pile. — L'élément de pile de Volta comprend une lame de zinc Z et une lame de cuivre C plongées dans une dissolution étendue d'acide sulfurique (fig. 731). Ces deux métaux sont inégalement attaqués par le liquide. Deux pièces métalliques de même nature fixées, l'une A au cuivre, l'autre B au zinc, constituent les deux pôles.

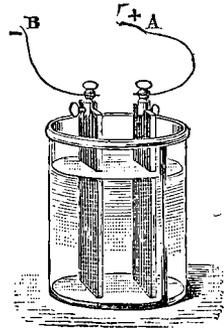


Fig. 731.

Charges électrostatiques aux deux pôles. — Un élément de pile ainsi formé et posé sur un support isolant présente à ses deux pôles

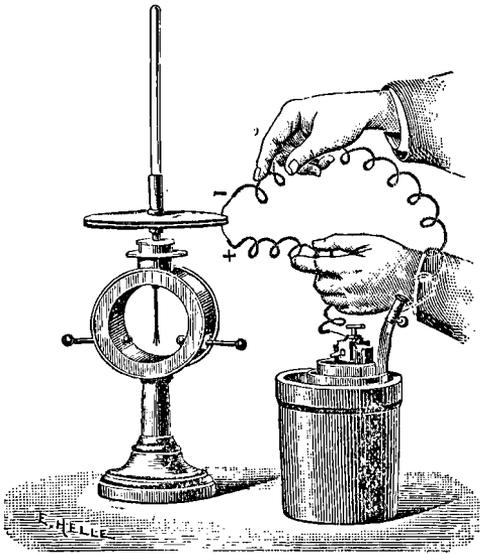


Fig. 732.

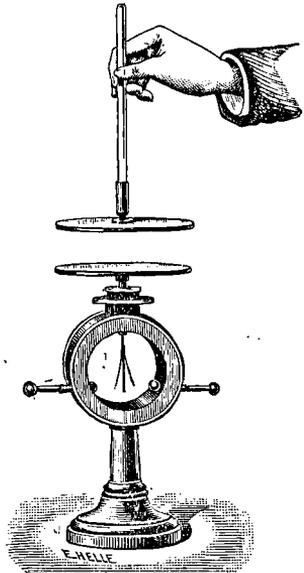


Fig. 733.

des *charges électriques opposées*. Il n'apparaît pas d'étincelle quand on rapproche les deux fils A et B jusqu'au contact ; car les charges des deux pôles sont excessivement faibles, elles sont même trop faibles pour qu'on puisse les constater directement avec un électroscope à feuilles d'or. On les met toutefois en évidence avec un électroscope condensateur (828). A cet effet, on réunit par des fils métalliques isolés les plateaux de l'électroscope aux deux pôles de l'élément de pile (fig. 732), puis on supprime les communications. En soulevant alors le plateau supérieur, on voit les feuilles d'or diverger (fig. 733). Le plateau relié au pôle zinc (métal le plus attaqué par l'eau acidulée) a une charge négative ⁽¹⁾.

Différence de potentiel aux deux pôles. — Si l'on met les deux pôles d'un élément *isolé* en communication par de longs fils respectivement avec deux sphères conductrices ayant un centimètre de rayon,

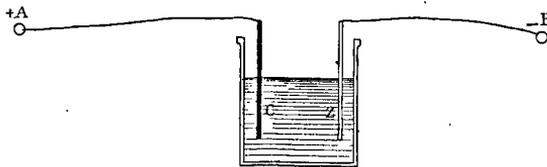


Fig. 734.

la sphère B du pôle zinc est électrisée négativement, la sphère A du pôle cuivre est électrisée positivement (fig. 734), et les charges de ces sphères sont les potentiels des deux pôles (794). Le pôle cuivre a un potentiel positif $+A$, et est appelé pôle positif ; le pôle zinc a un potentiel négatif $-B$, et est appelé pôle négatif.

En plongeant deux autres métaux tels que le fer et le platine dans l'eau acidulée, on forme un autre élément de pile ; le pôle fer, métal le plus attaqué, a un potentiel négatif, le pôle platine a un potentiel positif.

Les deux pôles d'un élément de pile se comportent comme deux conducteurs offrant une différence de potentiel constante.

La différence de potentiel $A + B$ aux deux pôles d'un élément de pile caractérise cet élément, elle ne dépend que de la nature des

(1) Un équilibre électrique s'est établi entre chaque plateau du condensateur et le pôle qui lui est réuni ; les deux plateaux du condensateur présentent la même différence de potentiel que les deux pôles de l'élément. La lame isolante de l'électroscope condensateur étant fort mince, le condensateur a une très grande capacité et, quand on sépare ses plateaux, leur potentiel devient assez grand pour faire diverger les feuilles d'or.

deuxième élément a donc le même potentiel $V + E$, le potentiel du pôle positif du deuxième élément sera $V + 2E$, puisqu'une différence de potentiel E s'établit entre les deux pôles, quel que soit l'état élec-

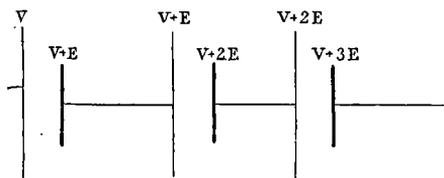


Fig. 736.

trique déjà existant. De même, le potentiel du pôle positif du troisième élément sera $V + 3E$..., le potentiel du pôle positif du n° élément est $V + nE = V'$.

La différence de potentiel aux deux pôles extrêmes de la pile est $V' - V = nE$ ou la somme des différences aux pôles des éléments qui la composent ⁽¹⁾.

Quand ces éléments sont disposés en série, c'est-à-dire les uns à la suite des autres dans le même ordre, on pourrait avec des éléments qui n'offrent séparément qu'une différence de potentiel très petite, s'ils étaient en nombre suffisant, obtenir une pile présentant à ses pôles des potentiels appréciables aux électroscopes ordinaires.

La *valeur absolue* des potentiels aux deux pôles d'une pile change avec le mode d'isolement de la pile.

Quand la pile est isolée et le milieu relié au sol, le pôle positif a un potentiel $\frac{1}{2}nE$, et le pôle négatif un potentiel $-\frac{1}{2}nE$; le milieu a un potentiel nul.

L'extrémité négative communiquant avec le sol et prenant le potentiel zéro, l'autre extrémité prend le potentiel $+nE$ et le milieu le potentiel $\frac{1}{2}nE$.

En somme, la *différence des potentiels aux deux pôles extrêmes d'une pile de n éléments de même constitution sera toujours nE et la différence de potentiel entre deux éléments consécutifs sera E .*

(1) On convient de figurer un élément de pile par deux traits parallèles; le pôle positif est représenté par une ligne courte et grosse, le pôle négatif par une ligne longue et fine.

893. Pôle ayant l'unité de potentiel électrostatique. — En faisant communiquer l'un des pôles, par exemple le pôle positif d'une pile formée de 300 éléments de Volta associés en série, avec le bouton d'un électroscope à feuilles d'or, et l'autre pôle avec le sol, les feuilles prennent un potentiel assez élevé pour diverger notablement. Une sphère d'un rayon d'un centimètre, mise en communication avec le pôle positif de cette pile, présente alors une charge sensiblement égale à l'unité électrostatique ou un potentiel égal à l'unité.

894. Courant électrique. — Quand on réunit les deux fils métalliques qui forment les deux pôles d'une pile (fig. 737 et 738), la pile et le conducteur interpolaire constituent un circuit fermé, et un

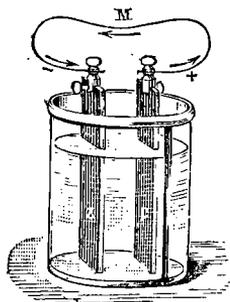


Fig. 737.

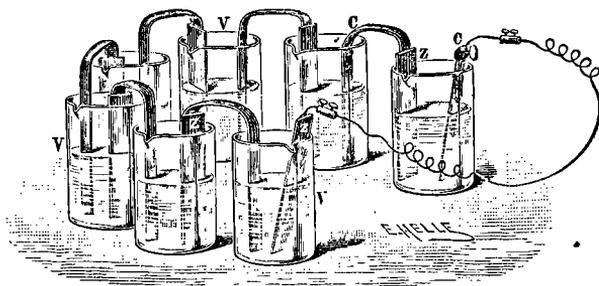


Fig. 738.

équilibre électrique tend à s'y établir : les potentiels des deux pôles tendent à s'égaliser (796). Comme le potentiel du pôle positif est supérieur au potentiel du pôle négatif, l'électricité positive tombe, en suivant le conducteur extérieur, du potentiel du pôle positif au potentiel du pôle négatif. Cette chute d'électricité ne pourrait cesser que si le potentiel devenait constant dans tout le circuit; mais l'égalisation n'a pas lieu; car, par une dépense d'énergie chimique (957), la pile tend à maintenir constante la différence de potentiel de ses deux pôles.

Un mouvement *continu* ou un courant d'électricité positive parcourt donc la pile et le conducteur interpolaire. Le courant dû à cette chute d'électricité est accompagné de manifestations particulières d'énergie, 1° dans les conducteurs traversés par le courant, et 2° à distance.

On devrait aussi parler d'un courant d'électricité négative parcourant le circuit en sens inverse du courant d'électricité positive, mais il suffit d'indiquer le sens de l'un des deux courants puisque l'autre a le sens opposé.

Sens du courant. — On convient d'adopter pour *sens du courant* le sens du déplacement de l'électricité positive : il a lieu du pôle positif au pôle négatif dans le conducteur extérieur aux deux pôles, et du pôle négatif au pôle positif à l'intérieur de la pile.

La différence des potentiels aux deux pôles d'une pile étant la cause du courant qui parcourt les conducteurs interpolaires, on donne à cette différence de potentiel le nom de *force électromotrice*.

Si l'on vient à interrompre le circuit, le courant électrique cesse, et l'équilibre primitif se rétablit dans la pile ouverte avec la différence de potentiel primitive aux deux pôles. Le courant prend de nouveau naissance dès qu'on rétablit la communication.

895. Différentes espèces de piles. — Pile à colonnes de Volta.

— Sur un socle isolant on empile les uns sur les autres en colonne verticale : un disque de cuivre, un disque de drap mouillé d'eau acidulée, un disque de zinc (fig. 739) ; puis un disque de cuivre, un disque de drap, un disque de zinc ; on répète la même succession un certain nombre de fois ; on termine par un disque de zinc auquel on fixe un fil de cuivre : ce fil de cuivre est le pôle négatif. Le premier cuivre forme le pôle positif (fig. 740).

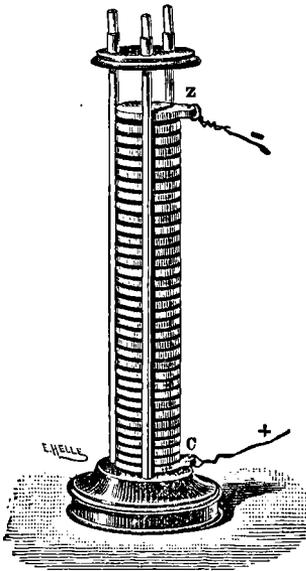


Fig. 740.

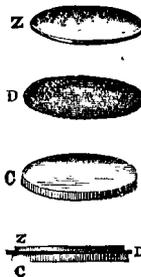


Fig. 739.

Le poids des disques a l'inconvénient d'exprimer le liquide des rondelles de drap et de le faire ruisseler sur la surface extérieure de la colonne, ce qui établit des communications entre les couples. Le courant de cette pile décroît très vite.

La pile à auges était une pile à colonnes couchée horizontalement. Elle consistait en une caisse rectangulaire en bois partagée en auges étroites par des cloisons formées chacune d'une lame de zinc soudée à une lame de cuivre. Les doubles lames se succèdent comme dans la

pile à colonnes. Chaque auge renferme de l'eau acidulée par l'acide sulfurique.

Dans la **pile à tasses** (fig. 738), chaque vase contient de l'eau acidulée et reçoit une lame de zinc et une lame de cuivre séparées par le liquide. Comme les différences de potentiel ne dépendent pas de la grandeur des surfaces, il n'est pas nécessaire que le cuivre et le zinc de deux éléments consécutifs soient en contact sur toute leur étendue, on réunit le cuivre et le zinc de deux éléments voisins par un fil de cuivre. La pile à tasses est le type qui nous a servi plus haut à établir la constitution d'une pile voltaïque.

La **pile de Wollaston** est de même formée de vases séparés. Dans chacun d'eux, la lame de cuivre C est repliée autour du zinc Z dont la sépare une *mince* couche d'eau acidulée (fig. 741).

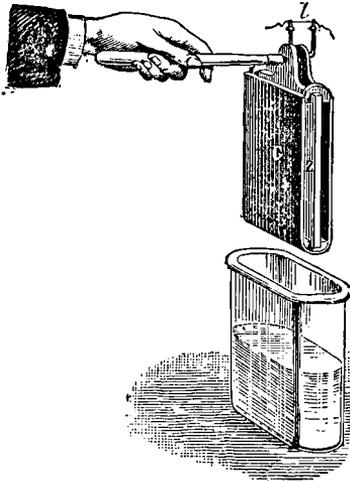


Fig. 741.

Ces divers éléments à un seul liquide donnent un courant qui s'affaiblit rapidement (953). Les éléments les plus constants sont des éléments à deux liquides. Nous ne décrirons pour le moment que l'élément Daniell.

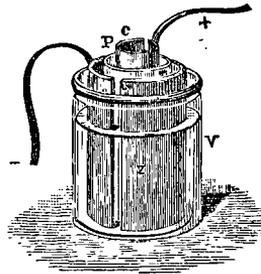


Fig. 742.

Élément Daniell (fig. 742). — Il est formé d'un vase en grès contenant un cylindre de zinc plongé dans de l'eau acidulée par de l'acide sulfurique ou dans du sulfate de zinc. A l'intérieur, un vase poreux renferme un cylindre de cuivre entouré d'une solution saturée de sulfate de cuivre. Le cuivre est le pôle positif, le zinc est le pôle négatif. Le courant de cet élément est très constant.

THÉORIE DE LA FORMATION D'UN ÉLÉMENT DE PILE

896. Un élément de pile est un appareil complexe. Ce sont des phénomènes d'électricité de contact qui ont conduit Volta à sa construction.

Volta démontra que *le contact de deux corps hétérogènes établit une différence de potentiel entre ces deux corps*. Nous avons vu que dans une pile d'éléments associés *en série*, la différence des potentiels aux deux pôles extrêmes est la somme des différences relatives à chacun des éléments (892); de même, la différence des potentiels extrêmes aux deux pôles d'un élément de pile est égale à la somme des différences aux contacts intérieurs successifs; il y a donc lieu d'étudier l'électricité développée au contact de deux corps.

Différence de potentiel au contact de deux métaux. — Deux corps différents, mis en contact, se chargent d'électricités contraires.

On le démontre pour deux métaux avec un électroscope dont la boule est remplacée par un plateau de *zinc* verni à sa surface supérieure; on pose sur ce plateau un plateau de *cuivre* verni à sa surface inférieure. Si l'on vient à établir un instant une communication entre les deux surfaces métalliques par un *fil de cuivre* (fig. 743), le zinc se charge positivement par suite de son contact avec le fil de cuivre, et le cuivre se charge négativement. Un équilibre s'est établi dans lequel le cuivre a pris un potentiel négatif et le zinc un potentiel positif. On éloigne alors le fil de cuivre et on soulève le plateau de ^{cuivre}zinc. On constate que le cuivre s'est chargé d'électricité négative, et le zinc d'électricité positive.

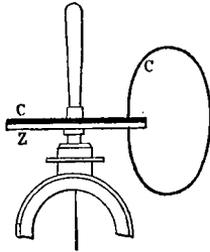


Fig. 743.

Cette différence de potentiel ne dépend que de la nature des corps et de leur température; elle est indépendante de leur forme et de leur surface de contact. Un même corps est susceptible de prendre des charges de signes différents suivant la nature des corps mis en contact avec lui. Ainsi le cuivre est négatif vis-à-vis du zinc, tandis qu'il est positif par rapport à l'argent.

La différence de potentiel qui s'établit au contact de deux corps ne dépend pas de la valeur absolue du potentiel sur chacun d'eux. Quel que soit l'état électrique du cuivre, le zinc prend sur le cuivre le même excès de potentiel.

Classement des métaux d'après leur signe. — Volta a rangé les métaux en une série telle que chaque métal était positif par rapport au suivant et négatif par rapport au précédent. De plus, en faisant usage d'un électroscope gradué, il avait mesuré les différences de potentiel pour les métaux considérés deux à deux.

Représentation symbolique d'une différence de potentiel. — Nous représenterons par le symbole $A|B$ la différence entre le potentiel du métal B et le

potentiel du métal A : cette différence est positive si le potentiel de B est supérieur au potentiel de A. D'après cela, la différence entre le potentiel de A et celui de B sera représentée par $B|A$, elle est égale à la précédente en valeur absolue, mais de signe contraire : on peut donc écrire $B|A = -A|B$.

897. Loi de Volta. — Soit une lame de zinc Z intercalée entre deux fils de cuivre C_1 et C_2 (fig. 744). Quel que soit le potentiel V sur le fil C_1 , le potentiel sur le zinc sera $V + C|Z$, et sur le cuivre C_2 il sera $V + C|Z + Z|C$.

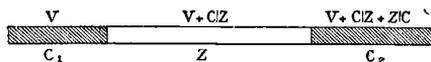


Fig. 744.

ou V puisque $C|Z = -Z|C$. Les deux fils de même nature C_1 et C_2 sont donc au même potentiel que s'ils se touchaient et il ne se produira aucun mouvement d'électricité dans le circuit quand on viendra à les réunir.

C'est un cas particulier d'une *loi expérimentale* due à Volta. Sous sa forme générale, on peut l'énoncer :

Dans l'état d'équilibre électrique, la différence de potentiel de deux métaux A et E réunis par une chaîne de métaux quelconques est la même que si ces deux métaux A et E étaient directement en contact.

Cet énoncé correspond à l'équation symbolique :

$$A|B + B|C + C|D + D|E = A|E.$$

Vérification. — Argent-Cuivre $A|C = 1$
 Cuivre-Fer $C|F = 2$
 Fer-Zinc $F|Z = 9$
 Argent-Zinc $A|Z = 12$

$$A|C + C|F + F|Z = 1 + 2 + 9 = 12 = A|Z.$$

Conséquences de la loi de Volta. — 1° Deux métaux réunis par une soudeure offrent la même différence de potentiel que s'ils se touchaient directement :

$$A|S + S|B = A|B.$$

2° Les extrémités d'une chaîne de métaux ont le même potentiel si elles sont formées du même métal :

$$A|B + B|C + C|D + D|A = A|A = 0.$$

Vérification. — Plomb-Zinc $P|Z = 5$
 Zinc-Fer $Z|F = -9$
 Fer-Étain $F|E = 3$
 Étain-Plomb $E|P = 1$

$$P|Z + Z|F + F|E + E|P = 5 - 9 + 3 + 1 = 0.$$

Quand on vient à fermer cette chaîne, il ne se produit aucun mouvement électrique puisque les extrémités mises en contact ont le même potentiel.

3° Lorsque les extrémités sont formées de deux métaux différents A et D

$$A|B + B|C + C|D = A|D,$$

si l'on vient à réunir les extrémités D et A, l'introduction du contact de D et A fait ajouter D|A à la somme précédente; comme $A|D + D|A = A|A$, on se trouve dans les mêmes conditions que si les deux extrémités étaient formées du même métal. *Il ne se produit donc aucun courant quand on ferme une chaîne de métaux quelconques.*

898. Formation d'un élément de pile par l'interposition d'un liquide. — Dans l'élément de Volta, cuivre, liquide, zinc, cuivre, les deux extrémités polaires sont formées du même métal, elles offrent toutefois une différence de potentiel; cela tient à l'interposition d'un liquide entre deux éléments de la chaîne métallique, le zinc et le cuivre.

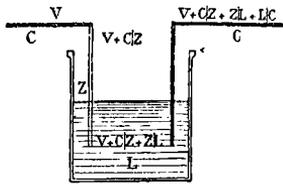


Fig. 745.

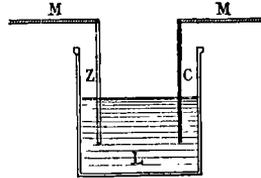


Fig. 746.

Soit V le potentiel du pôle négatif, c'est-à-dire du fil de cuivre qui est relié au zinc et qui forme le pôle négatif (fig. 745), le potentiel du zinc qui touche ce pôle sera $V + C|Z$; la séparation d'électricités contraires n'ayant pas lieu seulement au contact de deux solides, mais aussi au contact d'un solide et d'un liquide : le potentiel du liquide sera $V + C|Z + Z|L$ et le potentiel du cuivre extrême $V + C|Z + Z|L + L|C = V'$.

$$V' - V = C|Z + Z|L + L|C \quad (1)$$

Comme on n'a pas $Z|L + L|C = Z|C$, V' est différent de V .

L'expérience montre que $V' - V$ est ici positif. C'est la somme des trois différences $C|Z + Z|L + L|C$, que nous avons désignée précédemment par E (892).

899. Interprétation des expériences fondamentales de Volta. — Les résultats précédents vont nous permettre d'interpréter les expériences classiques qui ont été présentées par Volta pour expliquer la construction de

(1) La nature du métal des extrémités polaires d'un élément est indifférente; comme à l'ordinaire, nous avons pris du cuivre, mais ce peut être un métal quelconque sans que la différence de potentiel aux deux pôles change. Soit en effet V le potentiel du pôle négatif M (fig. 746), le potentiel du zinc en contact avec ce pôle sera $V + M|Z$,

le potentiel du liquide $V + M|Z + Z|L$,

le potentiel du cuivre $V + M|Z + Z|L + L|C$,

le potentiel du pôle positif $V + M|Z + Z|L + L|C + C|M = V'$

or $M|Z + C|M = -Z|M - M|C = -Z|C = C|Z$

donc $V' = V + C|Z + Z|L + L|C$

ce qui montre bien que le métal M ne joue aucun rôle dans la valeur de la différence de potentiel aux deux pôles.

son élément de pile. Il s'est servi d'un électroscope condensateur à plateaux de cuivre, et d'une *double lame* (fig. 747) formée d'une bande de zinc encastree dans une bande de cuivre.

Première expérience (fig. 748). — Tenant le zinc à la main, il appliquait le cuivre contre le plateau inférieur de l'électroscope condensateur et en même temps il touchait le plateau supérieur.

Le potentiel du zinc est nul ainsi que le potentiel du plateau supérieur; $Z|C$ est le potentiel du cuivre et du plateau inférieur, il est négatif. Si on retire la double lame et si on soulève le plateau supérieur, le plateau inférieur montre une charge négative.

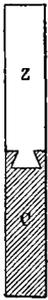


Fig. 747.

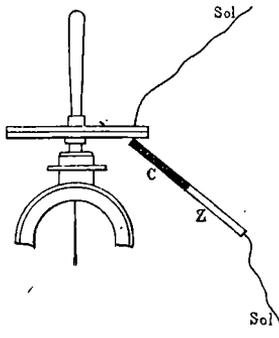


Fig. 748.

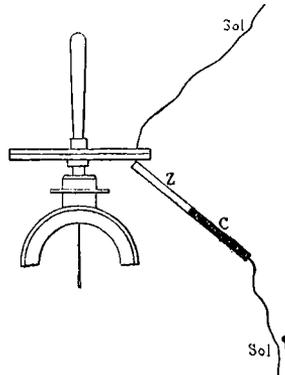


Fig. 749.

Deuxième expérience (fig. 749). — Tenant le cuivre à la main, il appliquait le zinc contre le plateau inférieur et en même temps il touchait le plateau supérieur.

Le potentiel du cuivre tenu à la main est nul; $C|Z$ est le potentiel du zinc, il est positif; le potentiel du cuivre du plateau inférieur est nul, puisque les deux cuivres qui comprennent le zinc doivent avoir le même potentiel, comme si le zinc n'existait pas (897). L'électroscope ne se charge pas.

Troisième expérience — Tenant le cuivre à la main, il appliquait le zinc contre le plateau inférieur, mais en *interposant* une rondelle de drap mouillé, et il touchait encore le plateau supérieur.

Le potentiel du cuivre tenu à la main est nul. $C|Z$ est le potentiel du zinc, $C|Z + Z|L$ le potentiel du liquide, $C|Z + Z|L + L|C$ le potentiel du plateau inférieur du condensateur, potentiel positif comme celui du pôle positif de l'élément de Volta. Le plateau se charge positivement.

EFFETS DU COURANT

900. Le *circuit fermé* constitué par une pile et les conducteurs interpolaires, est le siège de manifestations particulières d'énergie

accompagnant la chute de l'électricité qui tombe d'un potentiel élevé à un potentiel inférieur. Ces effets du courant électrique se divisent en deux groupes : *effets dans les conducteurs traversés par le courant*, et *effets à distance*.

Les effets produits dans les conducteurs eux-mêmes sont des effets *thermiques*, des effets *chimiques*, des effets *physiologiques*.

Les effets produits à distance sont des effets *magnétiques* dus à ce que le courant crée autour de lui un champ magnétique.

901. Comparaison des décharges et des courants de piles.

— Avec des conducteurs portés à des potentiels différents par une machine électrique, nous avons observé précédemment des transmissions très rapides d'électricité que nous avons appelées *décharges*. Les phénomènes des décharges et les phénomènes du courant ne diffèrent que par la durée; ces deux genres de phénomènes se produisent sous l'influence d'une différence de potentiel entre deux conducteurs que l'on réunit. Dans les décharges de condensateurs, le courant électrique est brusque et de courte durée; l'égalisation de potentiel s'établit rapidement. Le mouvement électrique qui a lieu quand on réunit les deux pôles d'une source électrique telle qu'une pile dont les masses électriques se renouvellent au fur et à mesure de la dépense, donne lieu à un *courant continu*.

902. Assimilation hydraulique. — C'est à l'hydraulique qu'est empruntée l'expression de courant électrique, adoptée dès le début de l'étude de l'électricité dynamique pour désigner le mouvement qui se produit dans le circuit d'une pile. L'analogie s'est montrée d'autant plus frappante qu'on a suivi de plus près le mécanisme du courant électrique; aussi, l'assimilation d'un courant électrique à un courant liquide peut nous guider dans l'étude et la mesure des effets du courant électrique.

Les analogies entre l'énergie hydraulique et l'énergie électrique peuvent être précisées par des considérations élémentaires.

La nappe d'eau d'un lac ou d'un étang ne peut mettre en mouvement aucune machine installée à son niveau, elle ne possède par elle-même aucune énergie. Pour la rendre susceptible d'être employée à produire un travail, on l'élève à une certaine hauteur en dépensant un travail mécanique à l'aide d'une pompe; le travail dépensé passe à l'état d'énergie potentielle dont l'eau est dépositaire et qu'elle peut restituer dans sa chute sous forme de travail. L'énergie potentielle

emmagasinée dans l'eau peut être utilisée loin du lac où sont établies les pompes élévatrices, si l'eau s'écoule en pente douce jusqu'à une station éloignée où on la laisse tomber pour faire tourner un moteur. De là, elle peut descendre en pente jusqu'à la nappe de départ où les pompes l'élèvent de nouveau. Le circuit parcouru par le liquide est un circuit fermé.

Revenons à l'électricité. Comme l'eau, l'électricité ne possède par elle-même aucune énergie. En équilibre sur les conducteurs qui nous entourent, elle est dans le même état que l'eau d'un lac en repos. Les machines électriques élèvent cette électricité à un certain niveau (potentiel) comme une pompe élève l'eau ; les machines électriques ne produisent pas plus d'électricité qu'une pompe ne produit de l'eau, mais elles communiquent une énergie potentielle à l'électricité en l'élevant à un certain potentiel. L'électricité élevée à un potentiel supérieur au potentiel commun du sol peut s'écouler en pente douce le long d'un conducteur jusqu'à ce qu'on la laisse tomber en chute brusque pour utiliser son énergie potentielle. L'écoulement de l'électricité constitue le courant électrique, sa chute produit les effets du courant. Quand l'électricité est revenue en pente à son point de départ, la machine électrique l'élève de nouveau. L'électricité a parcouru un circuit fermé.

Un courant liquide établi dans un tuyau T entre deux réservoirs R et R' à niveaux constants et différents (fig. 750) dépend de la *différence des niveaux* h et du *débit*, c'est-à-dire de la quantité de liquide qui traverse en une seconde chaque section du tuyau. Le tuyau dans lequel la circulation a lieu intervient par sa *résistance* à l'écoulement.

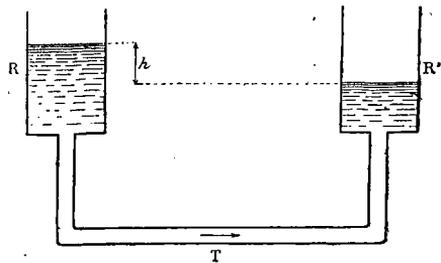


Fig. 750.

Dans l'étude du courant électrique des piles nous aurons de même à considérer : 1° la force électromotrice ou la **différence de potentiel** aux deux pôles de la pile ; 2° le **débit** ou la quantité d'électricité qui traverse par seconde chaque section du circuit ; 3° la **résistance du circuit**.

FORCE ÉLECTROMOTRICE, INTENSITÉ, RÉSISTANCE

MESURE DE LA DIFFÉRENCE DE POTENTIEL D'UN ÉLÉMENT DE PILE

903. La différence de potentiel aux deux pôles d'une pile étant la même quand l'un des pôles est en communication avec le sol ou quand les deux pôles sont isolés (891), on pourrait mettre le pôle négatif d'un élément de pile en communication avec le sol et relier le pôle positif au bouton d'un *électroscope gradué*; l'écart des feuilles d'or ferait connaître le potentiel. Avec un seul élément, les électroscopes ordinaires ne sont pas assez sensibles pour présenter un écart appréciable; mais en s'appuyant sur ce que la différence de potentiel est proportionnelle au nombre des éléments (892), on peut former une pile de plusieurs centaines d'éléments de même constitution associés en série, joindre au sol le pôle négatif et relier le pôle positif au bouton de l'électroscope. On obtient alors une déviation mesurable.

En répétant l'expérience avec une pile formée d'éléments différents des précédents, mais identiques entre eux et pris *en même nombre* que les précédents, on observe une autre déviation de l'électroscope.

Le rapport des forces électromotrices des deux éléments considérés est égal au rapport des charges successives de l'électroscope.

La force électromotrice d'un élément de pile ne dépend que de la nature des métaux et des liquides; elle ne dépend pas de ses dimensions. La concentration des liquides n'a que peu d'influence.

Les mesures de forces électromotrices ou de différences de potentiel se font plus commodément et avec plus de précision en employant des appareils où les forces électriques sont équilibrées par les torsions d'un fil métallique.

904. Emploi de la balance de torsion. — Imaginons deux boules fixes 1 et 2 (fig. 751), de même rayon r , entre lesquelles peut se déplacer une

autre boule P' ayant une charge constante ⁽¹⁾ et portée par une aiguille conductrice qui oscille horizontalement autour d'un fil métallique fin. Si les deux boules sont mises séparément *en communication lointaine* avec deux corps électrisés M et M' , leurs charges sont égales et de même signe lorsque ces deux corps ont le même potentiel; la boule mobile reste alors en équilibre si elle est à égale distance des deux boules fixes.

Lorsque les deux corps électrisés M et M' ont des potentiels différents V et V' , les charges des deux boules fixes sont différentes, égales à Vr et $V'r$, et comme les forces exercées par les deux boules fixes sont proportionnelles à ces charges, la boule mobile est déviée.

D'après la loi de Coulomb (768), les forces électriques sont proportionnelles au produit de la charge constante du système mobile par les charges des boules fixes; ces forces sont encore mesurables pour de très petites valeurs de ces dernières charges si le système de la boule mobile est fortement électrisé.

En tordant le fil métallique pour maintenir la boule mobile à égale distance des deux boules fixes, l'équilibre a lieu lorsque la différence des actions électriques, qui est proportionnelle à $Vr - V'r$, fait équilibre à la torsion du fil métallique. Cette torsion mesure $V - V'$.

Mesure avec une balance à quatre boules fixes. — L'action électrique est doublée si le levier mobile porte à chacune de ses extrémités une

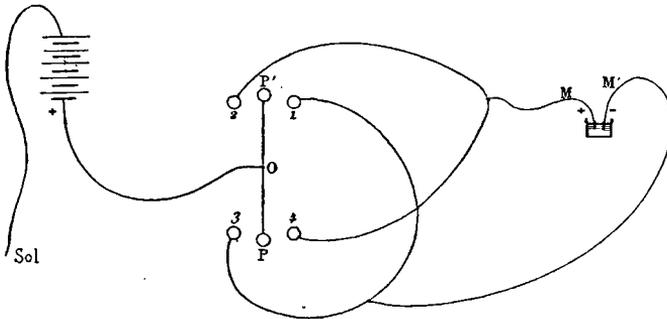


Fig. 751.

boule électrisée, et si deux boules fixes agissent respectivement sur chacune des boules mobiles P et P' . A cet effet, les boules fixes disposées aux quatre sommets d'un rectangle sont reliées 2 à 2 *en diagonale* (2 et 4, 1 et 3) et leurs actions concordent pour dévier le système mobile dans le même sens (fig. 751).

L'électromètre à quadrants fonctionne comme l'appareil précédent et présente sur lui l'avantage d'une sensibilité beaucoup plus grande.)

905. Électromètre à quadrants. — *Description* (fig. 752 et 753). — La partie mobile est une plaque mince d'aluminium P découpée

(1) La boule mobile est chargée par l'un des pôles d'une pile d'un grand nombre d'éléments dont le second pôle va au sol (fig. 751).

suivant deux secteurs d'environ 30° ; elle est soutenue en son milieu

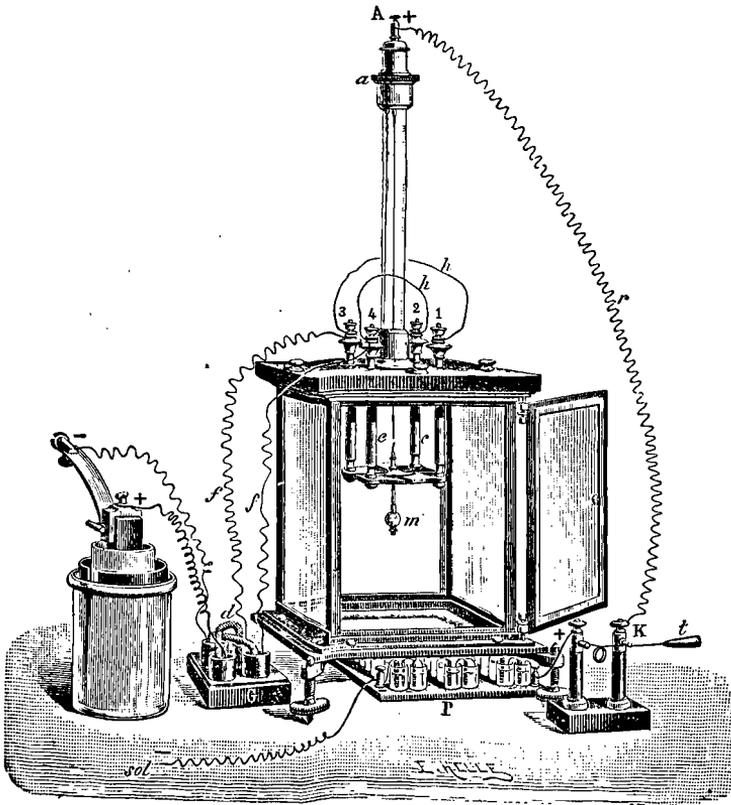


Fig. 752.

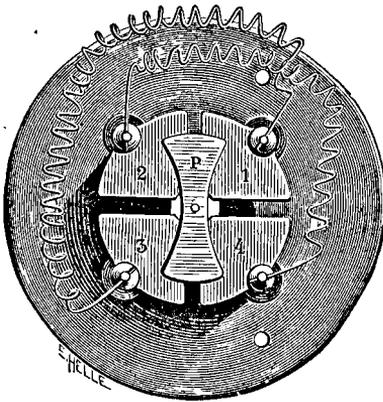


Fig. 753.

par un fil métallique fin et peut tourner horizontalement dans son plan au-dessus d'un système de quatre quadrants d'un même cercle, isolés. Ces quadrants sont fixés au couvercle en ébonite de la cage de l'appareil à l'aide de quatre tiges conductrices *c* par lesquelles on établit une communication en diagonale entre les quadrants opposés par le sommet (1 et 3, 2 et 4).

Par le fil de torsion, la plaque d'aluminium reçoit une charge constante de l'un des pôles d'une pile P dont l'autre pôle va au sol⁽¹⁾. Le fil de torsion est d'abord tourné de telle façon que l'axe de figure de la plaque mobile soit orienté suivant l'une des deux lignes de séparation des quadrants quand les deux paires sont réunies et ont, par conséquent le même potentiel.

Fonctionnement. — Les pôles dont on veut mesurer la différence de potentiel sont reliés séparément par deux fils longs et fins f aux deux paires de quadrants. Désignons par V le potentiel de la plaque chargée positivement, par V_1 et V_2 les potentiels des deux paires de quadrants.

Supposons $V > V_1 > V_2$. La répulsion exercée sur la plaque mobile par les quadrants de potentiel V_1 sera plus grande que la répulsion exercée par les quadrants de potentiel V_2 . La différence des répulsions dévie l'aiguille, et celle-ci se fixe dès que la torsion du fil fait équilibre aux forces électriques. La déviation de la plaque d'aluminium reste très faible si V_1 et V_2 sont peu différents; lorsque ces potentiels sont très petits par rapport au potentiel V de la plaque mobile, la déviation est *proportionnelle à la différence* $V_1 - V_2$ des potentiels des quadrants ou des pôles de la pile.

Pour mesurer avec précision les *petits* écarts angulaires de la plaque mobile, une tige verticale fixée à cette plaque dans le prolongement du fil de torsion porte un petit miroir m qui tourne en même temps que la plaque. Si le miroir est plan, on observe avec une lunette les divisions d'une règle horizontale vue par réflexion (620) dans le miroir et parallèle au miroir quand la plaque n'est pas déviée.

Le plus souvent, le miroir m est concave. L'observateur placé derrière une règle horizontale transparente regarde les déplacements de l'image d'un réticule fin de platine réfléchi sur le miroir (985); les écarts de cette image sont proportionnels aux déviations de la plaque mobile.

(1) La pile de charge est formée d'une centaine de petits éléments zinc, platine et eau, groupés en série (fig. 754) et disposés sur une plaque d'ébonite au-dessous de la cage



Fig. 754.

de l'électromètre (fig. 752). Une tige métallique flexible K permet d'établir ou de suspendre la charge.

Les secteurs possèdent des mouvements de haut en bas et de rotation, ce qui permet de les mettre dans un même plan rigoureusement horizontal. En faisant monter ou descendre la plaque mobile, on modifie la sensibilité.

906. Unité de force électromotrice. — D'après des considérations que nous verrons plus loin (à propos des effets calorifiques du courant), l'unité de force électromotrice adoptée est le **volt**; le volt est un peu supérieur à la différence de potentiel des deux pôles d'un élément de Volta (zinc, cuivre, eau acidulée). La différence de potentiel aux deux pôles d'un élément Daniell (zinc, sulfate de zinc; cuivre, sulfate de cuivre) est égale à 1^{vo}8.

Un volt vaut $\frac{1}{300}$ de l'unité électrostatique de potentiel.

L'électromètre à quadrants permet de composer avec précision des forces électromotrices de $\frac{1}{10}$ et même de $\frac{1}{20}$ de volt. La comparaison des forces électromotrices des éléments usuels dont les différences de potentiel sont comprises entre 0,5 et 2,5 volts se fait en réunissant respectivement aux deux paires de quadrants les deux pôles d'un seul élément de pile.

MESURE DE L'INTENSITÉ D'UN COURANT

La quantité d'électricité qui traverse un circuit ne peut être évaluée que par ses effets; la connaissance de quelques uns de ces effets nous est donc dès maintenant nécessaire.

907. Méthode électrochimique. — Décomposition de l'eau par un courant. — Un conducteur liquide traversé par un courant électrique est décomposé en ses éléments. En plongeant dans l'eau acidulée par de l'acide sulfurique deux plaques de platine reliées respectivement aux pôles d'une pile, on voit se dégager des bulles de gaz sur les deux plaques.

Voltamètre. — La décomposition se fait dans un voltamètre. C'est un vase contenant de l'eau acidulée et dont le fond est traversé par deux fils de communication isolés qui portent les plaques de platine ou *électrodes*. Chaque électrode est couverte par une éprouvette pleine de liquide (fig. 755).

Il se dégage à l'électrode négative (reliée au pôle négatif de la pile) un gaz combustible, brûlant avec une flamme pâle, c'est de l'*hydrogène*. Le gaz dégagé à l'électrode positive a un volume moitié moindre ;

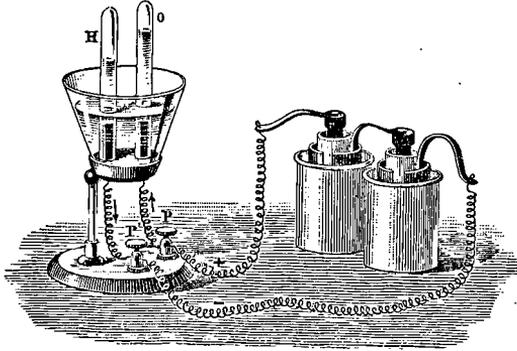


Fig. 755.

il n'est pas combustible, mais rallume une allumette qui présente un point en ignition, c'est de l'*oxygène*. Les deux éléments de l'eau se portent donc *séparément* sur les deux électrodes.

Le sens du courant (qui va dans le voltamètre de l'électrode positive (894) à l'électrode négative) est indiqué par la situation de l'éprouvette dans laquelle le gaz dégagé a un volume double de l'autre.

Voltamètres en série. — Si plusieurs voltamètres se suivent dans un même circuit, la même quantité d'*hydrogène* se dégage dans tous, quelles que soient la forme, la grandeur et la distance des électrodes. Le courant décompose donc la même quantité d'eau en tous les points de son circuit.

Voltamètres parallèles. — La quantité d'électricité qui passe dans

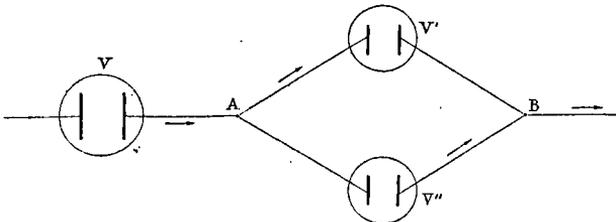


Fig. 756.

un circuit est proportionnelle aux indications d'un voltamètre intercalé dans le circuit, d'après l'expérience suivante :

Bifurquons en A le circuit d'une pile en deux branches exactement semblables qui se réunissent de nouveau en B et intercalons trois voltamètres : l'un en V dans la partie non bifurquée, les deux autres V' et V'', *identiques*, dans les deux branches (fig. 756). Il est clair que la quantité d'électricité qui passe en V' ou V'' est la même, nous admettrons qu'elle est la moitié de celle qui passe en V. Or, le volume d'hydrogène dégagé en V' ou V'' est le même et il est la *moitié* du volume qui est dégagé dans le même temps en V⁽¹⁾.

Par conséquent, *le volume d'hydrogène dégagé dans un voltamètre est proportionnel à la quantité d'électricité qui y passe.*

Intensité. — On appelle intensité la *quantité d'électricité qui passe par seconde* dans chaque section transversale d'un conducteur⁽²⁾, le rapport des intensités de deux courants différents est égal au rapport des volumes d'hydrogène dégagés par ces deux courants dans le même temps.

908. Méthode électromagnétique. — L'introduction d'un liquide dans un circuit a l'inconvénient d'affaiblir dans une très forte proportion l'intensité du courant, et dans certains cas de l'annuler (947); aussi l'emploi du voltamètre pour la mesure des intensités n'est-il pas toujours applicable; la méthode électromagnétique convient à tous les courants.

Action d'un courant sur l'aiguille aimantée. — C'est une action

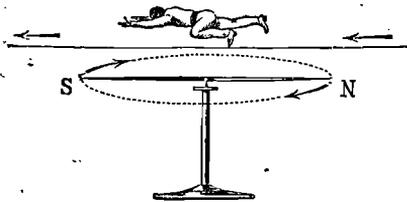


Fig. 757.

exercée par un courant électrique sur une aiguille aimantée extérieure au circuit. Ørsted observa cette action en 1819.

Un conducteur rectiligne horizontal orienté dans le méridien magnétique est tendu au-

dessus d'une aiguille aimantée mobile sur un pivot vertical; il dévie cette aiguille quand il est traversé par un courant (fig. 757). L'aiguille s'écarte du méridien magnétique jusqu'à ce que l'effet du courant soit

(1) Si les deux branches sont différentes, les volumes d'hydrogène dégagés y sont différents, mais leur somme est toujours égale au volume dégagé en V.

(2) La section d'un conducteur traversé par un courant d'intensité I étant S, on appelle *densité* d'un courant le quotient $\frac{I}{S}$, c'est la quantité qui traverse par seconde chaque centimètre carré de la section du conducteur.

équilibré par l'action du couple terrestre qui tend à la ramener et qui croît avec la déviation.

La déviation est d'autant plus grande que le conducteur est plus voisin de l'aiguille et que le courant est plus puissant. Avec un fort courant, suffisamment rapproché, l'aiguille se met en croix avec le conducteur.

Règle d'Ampère. — En appelant, d'après Ampère, *droite et gauche du courant* la droite et la gauche d'un observateur nageant dans le sens du courant ⁽¹⁾, le visage tourné vers l'aiguille (fig. 757), le *pôle nord de l'aimant est dévié à la gauche du courant*.

La règle d'Ampère peut encore être énoncée sous une autre forme : on dirige la *main droite* le long du conducteur traversé par le courant, de façon que le courant positif sorte par les extrémités des doigts, la paume de la main regardant l'aiguille. Le sens du courant est le sens de la main, et sa gauche le *côté du pouce* ; le pôle nord de l'aiguille est dévié du côté où se trouve le pouce.

Multiplicateur. — Un fil conducteur, couvert de soie pour l'isolement, est enroulé un grand nombre de fois dans le même sens sur un cadre orienté dans le méridien magnétique et entourant une aiguille

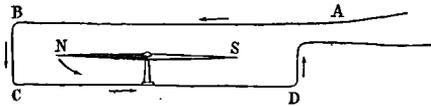


Fig. 758.

aimantée mobile en son centre autour d'un axe vertical. D'après la règle d'Ampère, chacune des portions du courant a sa gauche dirigée du même côté du cadre et toutes les parties du courant tendent à porter le pôle nord *du même côté* (fig. 758). Le cadre sur lequel le fil est enroulé a reçu le nom de *multiplicateur*, parce que l'action du courant augmente avec le nombre des spires.

Galvanomètre. — L'ensemble d'un multiplicateur et d'une aiguille aimantée constitue un galvanomètre. En intercalant le multiplicateur dans un circuit, l'aimant accuse par sa déviation le *passage* d'un courant ; le sens de la déviation fait connaître le *sens* du courant, enfin de la grandeur de la déviation on peut déduire l'*intensité*.

En effet, si l'on se borne à de *très petites déviations* observées par

(1) Le courant entre par les pieds et sort par la tête de l'observateur d'Ampère.

réflexion sur un miroir qui tourne avec l'aiguille aimantée (785), en désignant par $\alpha, \alpha', \alpha'' \dots$ les déviations dues à des courants différents, et par $v, v', v'' \dots$ les volumes d'hydrogène dégagés pendant un même temps dans un voltamètre intercalé aussi dans le circuit, les quotients $\frac{\alpha}{v}, \frac{\alpha'}{v'} \dots$ sont égaux; les déviations sont donc proportionnelles aux quantités d'électricité qui circulent dans un même temps dans le circuit ou proportionnelles aux intensités.

Un galvanomètre, comme un voltamètre, donne une indication constante pour un même courant, quelle que soit sa position dans le circuit, ce qui confirme que l'intensité du courant d'une pile est la même en tous les points du circuit.

909. Unité d'intensité électromagnétique. — On a adopté pour unité d'intensité l'ampère; c'est l'intensité d'un courant qui dégage en une seconde $\frac{1}{96600}$ de gramme d'hydrogène, ou $1^{\text{mmg}}118$ d'argent.

L'évaluation de l'intensité d'un courant avec un voltamètre exige une pesée et une mesure de temps. L'évaluation avec un galvanomètre se fait par une simple lecture, si le galvanomètre est gradué, mais cette graduation nécessite une comparaison avec un voltamètre; à cet effet, on met un voltamètre et le galvanomètre dans le même circuit, et on fait passer le courant pendant un temps connu; on détermine ainsi $\frac{\alpha}{v}$.

910. Unité de quantité d'électricité. — Si la déviation de l'aiguille du galvanomètre ne varie pas pendant le passage du courant, le courant est constant; le volume d'hydrogène dégagé dans un voltamètre intercalé dans le circuit est proportionnel au temps; le débit est proportionnel au temps; la quantité d'électricité qui traverse en t secondes chaque section transversale d'un circuit est exprimée par $Q = It$, où I désigne l'intensité, c'est-à-dire la quantité qui traverse chaque section en une seconde.

L'unité de quantité d'électricité, appelée coulomb, est la quantité qui passe par seconde par chaque section d'un circuit quand l'intensité est un ampère. Un coulomb dégage dans un voltamètre $\frac{1}{96600}$ de gramme d'hydrogène, ou dépose une masse de $1^{\text{mmg}}118$ d'argent. Le coulomb vaut 3 milliards ou $3 \cdot 10^9$ unités électrostatiques de quantité.

911. Débit des machines électrostatiques. — Si l'on intercale un galvanomètre très sensible, à spires bien isolées, entre les deux pôles d'une machine à influence en activité, l'aiguille aimantée est déviée, et la déviation est proportionnelle à la vitesse de rotation ou au débit électrique de la machine. Comme la déviation reste *extrêmement faible*, une machine électrostatique se comporte comme une source de *potentiel très élevé* et de *très faible débit*; les piles donnent au contraire un *débit considérable* avec une *force électromotrice faible*.

Tandis qu'une machine électrostatique à très faible débit donne de longues étincelles, les piles dont le débit est très grand, ne peuvent donner que des étincelles à peine visibles.

RÉSISTANCE D'UN CIRCUIT

912. L'intensité du courant fourni par une pile constante, mesurée par un galvanomètre, varie avec la nature et les dimensions du circuit intermédiaire. Le courant électrique s'affaiblit ou semble éprouver un accroissement de *résistance* quand on augmente la longueur d'un conducteur du circuit, ou quand on diminue sa section, sans changer sa nature. De même, l'affaiblissement considérable d'un courant par l'introduction d'une colonne liquide dans son trajet est d'autant plus grand que les plaques métalliques qui comprennent le liquide sont plus écartées et que leur section est plus faible.

Résistances égales. — Deux conducteurs sont dits avoir des résistances égales s'ils produisent le même affaiblissement d'un courant quand on les substitue l'un à l'autre dans son circuit.

Résistances multiples. — Deux résistances égales placées bout à bout dans un même circuit forment une résistance qu'on appelle *double*; n résistances égales consécutives forment une résistance qu'on dit n fois plus grande.

913. Unité de résistance. — L'unité de résistance est appelée **ohm**. C'est un étalon réalisé matériellement comme le mètre; il a la résistance d'une colonne de mercure à 0° de 106,3 centimètres de longueur et de 1 millimètre carré de section⁽¹⁾.

(1) On définit encore l'ohm : une masse de mercure à 0° égale à 14574521 qui occupe 106,3 centimètres de longueur, dans un tube de section intérieure constante.

A cause de la fragilité des colonnes de mercure enfermées dans des tubes de verre, on forme en fil de maillechort des résistances égales à l'ohm. Le fil, *bien isolé*, est enroulé sur une bobine de bois B; ses

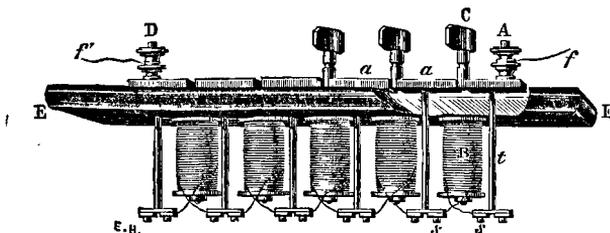


Fig. 759.

extrémités sont soudées en *s* à deux grosses tiges de cuivre *t* sans résistance appréciable, qui servent à établir les communications (fig. 759).

Boîtes de résistances. — On construit des résistances de 1, 2, 2, 5, 10... 100 ohms, et on les groupe dans des boîtes appelées *boîtes de résistances*, comme la série des poids dans une boîte de poids marqués (fig. 760).

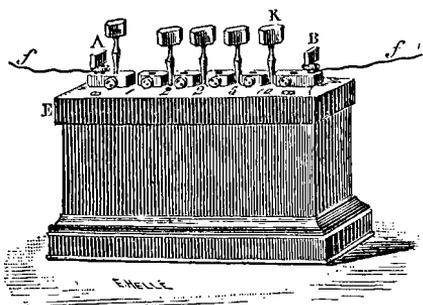


Fig. 760.

Ces résistances sont faites en fil de maillechort plus ou moins fin et de longueur telle qu'à 15° leurs résistances soient 1, 2, 2, 5, 10... 100 ohms.

Ces résistances sont faites en fil de maillechort plus ou moins fin et de longueur telle qu'à 15° leurs résistances soient 1, 2, 2, 5, 10... 100 ohms.

Dans une boîte de résistances, chaque bobine est recouverte de fil isolé. Les extrémités des fils de deux bobines consécutives aboutissent par une tige *t* à un bloc de cuivre *a* de résistance négligeable fixé sur le couvercle en ébonite E de la boîte (fig. 759). Toutes les bobines de la boîte sont traversées par le courant quand on attache aux blocs extrêmes les deux fils de la pile. On supprime une bobine du circuit en insérant une fiche de laiton K dans un intervalle ménagé entre les deux blocs qui comprennent cette bobine; la résistance des blocs et de la cheville étant extrêmement faible par rapport à la résistance de la bobine, tout le courant passe directement par la cheville d'un bloc au suivant. *Les bobines traversées par le courant correspondent aux fiches enlevées*; en faisant la somme des nombres

lus au-dessous des fiches enlevées, on connaît la résistance totale que la boîte introduit dans le circuit.

914. Mesure d'une résistance. — On évalue la résistance d'un conducteur quelconque, en l'intercalant dans un circuit qui comprend une pile *constante* et un galvanomètre. On observe la déviation de l'aiguille du galvanomètre, puis on retire le conducteur du circuit et on lui *substitue* à l'aide de boîtes de résistances, le nombre d'ohms et de fractions d'ohm qui convient pour obtenir la même déviation.

Pour les déterminations très précises, on fait usage de la méthode du pont de Wheatstone (928).

Conducteurs de même nature équivalents. — On reconnaît, en les substituant l'un à l'autre dans un même circuit, qu'un fil de longueur l et de section s a la même résistance qu'un fil de même nature de longueur $\frac{l}{2}$ et de section $\frac{s}{2}$ ou qu'un fil de longueur $\frac{l}{p}$ et de section $\frac{s}{p}$. D'après cela, un fil de longueur l et de section s équivaut à un fil de longueur $\frac{l}{s}$ et de section 1 (en divisant à la fois par s la longueur et la section).

915. Résistance spécifique. — Deux conducteurs de mêmes dimensions, mais de natures différentes, affaiblissent inégalement un courant.

On appelle *résistance spécifique* d'une substance, le nombre ρ d'ohms et de fractions d'ohm ayant la même résistance qu'un cube de la substance de 1 centimètre de côté, entre deux faces opposées.

916. Résistance d'un conducteur quelconque. — Un conducteur de longueur 1 et de section 1 d'une substance de résistance spécifique ρ vaut un nombre d'ohms égal à ρ . Un conducteur de même nature, de longueur l et de section 1, vaut ρl ohms. Un conducteur de longueur l et de section s peut être remplacé par un conducteur de section 1 et de longueur $\frac{l}{s}$ et vaut $\rho \frac{l}{s}$ ohms.

$r = \rho \frac{l}{s}$ est donc la résistance en ohms d'un conducteur de longueur l , de section s et de résistance spécifique ρ ⁽¹⁾.

(1) La résistance d'un tube en hydraulique est de même proportionnelle à sa longueur, en raison inverse de sa section et proportionnelle à un coefficient spécifique.

917. Résultats. — Le cuivre recuit est la substance usuelle la plus conductrice.

Les métaux qui conduisent le mieux la chaleur sont aussi ceux qui conduisent le mieux l'électricité.

La résistance d'un métal *augmente avec la température*; pour la plupart des métaux purs, l'accroissement est d'environ 0,38 pour 100° centigrades; les métaux du commerce et les alliages ont une résistance supérieure à celle des métaux purs. La résistance du maillechort (cuivre, zinc et nickel) varie peu avec la température.

La résistance des solutions salines ou acides est beaucoup plus grande que celle des métaux.

L'eau distillée et les corps dits isolants ont une résistance extrêmement grande par rapport à celle des métaux et des solutions salines. La résistance des liquides et des corps isolants *diminue quand la température s'élève*.

RÉSISTANCES SPÉCIFIQUES EN MICROHMS (1)

Argent.....	1,5	Platine.....	9,1
Cuivre.....	1,6	Fer.....	9,8
Aluminium.....	2,9	Mercure.....	94,34
Zinc.....	5,7	Maillechort.....	21

RÉSISTANCES SPÉCIFIQUES EN OHMS

Acide azotique à 12°.....	1,50
Solution saturée de sulfate de cuivre à 10°.....	29,3
Solution saturée de sulfate de zinc à 10°.....	33,7

918. Résistance totale d'un circuit. — Étant donné un circuit formé d'éléments de pile et de conducteurs variés, on évaluera séparément la résistance des diverses parties solides ou liquides, d'après leurs dimensions et leurs résistances spécifiques. La somme de toutes les résistances représentera la résistance totale du circuit :

$$R = \rho \frac{l}{s} + \rho' \frac{l'}{s'} + \rho'' \frac{l''}{s''} \dots = \sum \rho \frac{l}{s}.$$

Applications. — 1° Quelle quantité d'électricité prend une sphère de 50 centimètres de rayon, reliée au pôle positif d'un élément de pile, quand l'autre pôle communique avec le sol, la différence de potentiel aux deux pôles étant 1,8 volt?

2° On joint les deux pôles d'un élément de pile aux deux systèmes de secteurs d'un électromètre à quadrants, et on obtient une déviation de 61 divisions de la règle divisée.

(1) On appelle *microhm* la millionième partie d'un ohm.

Un élément Daniell produisant une déviation de 45 divisions et ayant une différence de potentiel égale à 1^m08, quelle est la force électromotrice de l'élément considéré?

3° Les deux armatures d'un condensateur à air, d'un mètre carré de surface, et distantes de 2 millimètres, sont mises en communication avec les deux pôles d'une pile de 1000 éléments Daniell. Calculer sa charge. La différence de potentiel aux deux pôles d'un élément Daniell vaut 0,00374 en unités électrostatiques.

4° La résistance d'un fil d'argent de 1^m03 de longueur et de 1 millimètre de diamètre est 0,02 ohms. Quelle est la résistance spécifique ρ de l'argent?

5° Un fil de 500 mètres de longueur et de 0^mm76 de diamètre a une résistance de 20 ohms. Quelle est sa résistance spécifique?

6° La résistance spécifique du platine est 9 microhms. Quelle sera la résistance d'un fil de platine de 2 mètres de long pesant 2 décigrammes? Densité du platine, 22.

7° Un fil de cuivre a 10 mètres de longueur et pèse 20 grammes. Sa résistance en ohms est 0,715. La densité du cuivre étant 8,8, quelle est sa résistance spécifique?

8° Quelle longueur l de fil de platine de 1 millimètre de diamètre faut-il pour une résistance d'un ohm? Résistance spécifique du platine, 9 microhms.

LOI D'OHM

919. Une pile est caractérisée par sa force électromotrice et sa résistance, le circuit extérieur par sa résistance.

L'intensité d'un courant augmente lorsque la force électromotrice de la pile augmente et que la résistance totale du circuit diminue. Il y a entre ces trois grandeurs : *force électromotrice* ou différence de potentiel aux pôles de la pile ouverte, *intensité du courant*, et *résistance du circuit*, une relation simple connue sous le nom de loi d'Ohm. En voici l'énoncé :

L'intensité I du courant en ampères est le quotient de la force électromotrice de la pile E en volts par la résistance totale du circuit R en ohms (la résistance totale comprend la résistance des éléments et la résistance des conducteurs interpolaires).

$$I = \frac{E}{R}$$

Notons qu'en hydraulique, le débit par seconde est de même proportionnel à la différence des niveaux des deux réservoirs entre lesquels l'écoulement a lieu et en raison inverse de la résistance du tube de communication.

La démonstration de la loi d'Ohm peut être présentée de diverses

manières ⁽¹⁾. Nous allons la déduire d'une proposition fondamentale établie par Ohm et basée sur la mesure des charges électrostatiques qu'on observe le long des conducteurs qui font partie du circuit d'une pile.

920. Charges électrostatiques sur le trajet d'un courant. — Un électroscope condensateur mis en contact avec un point A d'un circuit parcouru par un courant accuse une charge d'électricité statique.

Si c'est par communication lointaine que le point A est réuni, soit à un électroscope gradué, soit à une sphère de rayon 1, la charge obtenue mesure

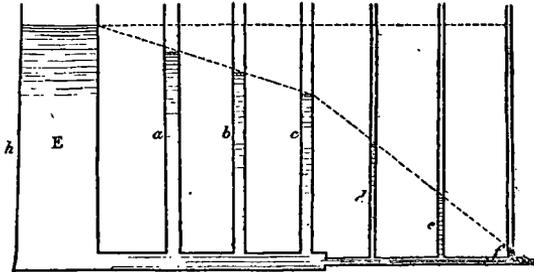


Fig. 761.

le *potentiel* au point considéré. Ce potentiel est positif au voisinage du pôle positif, il décroît dans le sens du courant, du pôle positif au pôle négatif dans le circuit extérieur, et devient négatif au voisinage du pôle négatif. La chute progressive de potentiel le long d'un circuit est tout à fait comparable à la diminution de pression le long d'un tuyau de conduite entre deux réservoirs à niveaux différents (fig. 761).

Différence de potentiel entre deux points d'un circuit. — Un électromètre à quadrants, dont les deux paires de quadrants sont reliés respectivement par des fils à deux points A et B d'un circuit (fig. 762), donne par

(1) Voici la forme sous laquelle la loi d'Ohm avait été trouvée par Pouillet, à l'aide de simples mesures galvanométriques d'intensité :

Prenons une pile constante. Reunions les deux pôles par un conducteur de résistance r_1 ; nous avons un courant d'intensité déterminée. Remplaçons le conducteur interpolaire de résistance r_1 par un autre de résistance $2r_1$, l'intensité du courant diminue, mais elle n'est pas réduite à moitié. En effet, on n'a pas doublé la résistance du circuit puisque le courant traverse aussi la pile, ce qui équivaut au passage à travers une résistance λ .

On constate que l'intensité varie en raison inverse de la résistance totale du circuit :

$$I_1 = \frac{E}{\lambda + r_1} \quad I_2 = \frac{E}{\lambda + r_2}; \text{ en général } I = \frac{E}{\lambda + r},$$

le produit $I_1 (\lambda + r_1) = I_2 (\lambda + r_2) = I (\lambda + r)$ est constant ; la valeur de λ qu'on tire de ces deux équations est la même.

Le produit constant $I (\lambda + r) = E$ caractérise la pile : on l'appelle *force électromotrice*. On reconnaît ainsi que la force électromotrice d'un élément ne dépend pas de ses dimensions. Avec n éléments de même nature disposés en série la force électromotrice est n fois plus grande qu'avec un seul.

sa déviation la différence des potentiels en ces deux points. On peut mettre en communication avec le sol un point quelconque du circuit; les valeurs

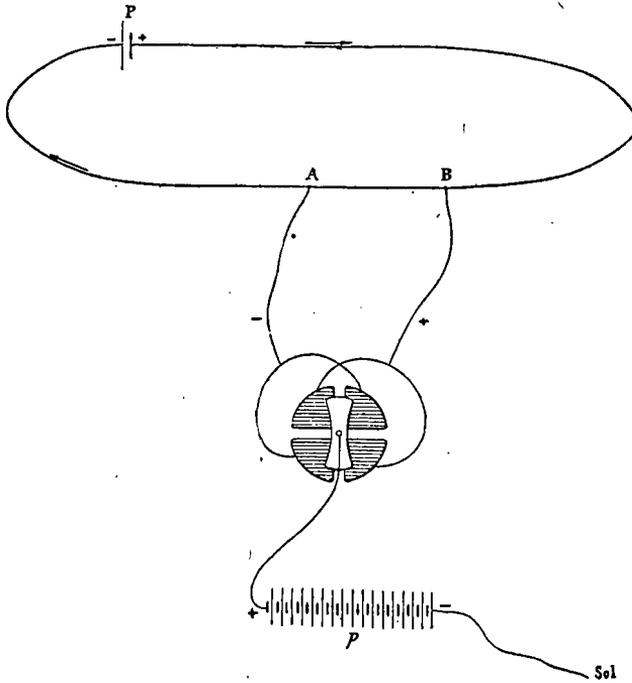


Fig. 762.

absolues des potentiels sont modifiées tout le long du circuit, mais la différence des potentiels entre deux points A et B reste la même que précédemment.

921. Loi d'Ohm pour un conducteur. — 1° Dans un circuit où l'intensité reste constante, *les chutes de potentiel* $a - b$ et $a' - b'$ (fig. 763) entre les extrémités de conducteurs différents AB et A'B' sont *proportionnelles à leurs résistances* (1).

$$\frac{a - b}{a' - b'} = \frac{r}{r'}$$

$$\text{ou } \frac{a - b}{r} = \frac{a' - b'}{r'}$$

2° Dans un circuit où l'on fait varier l'intensité en introduisant de nou-

(1) De même, pour un courant liquide, la perte de pression aux extrémités d'un conducteur est proportionnelle à sa résistance, elle est moindre pour un tuyau large et peu résistant que pour un tuyau étroit (fig. 761), moindre entre a et b qu'entre d et e .

velles résistances, les *différences de potentiel* entre deux points A et B d'un conducteur invariable sont *proportionnelles aux intensités* ⁽¹⁾.

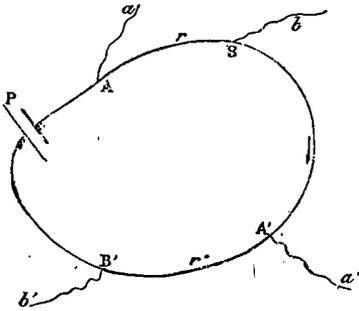


Fig. 763.

$$\frac{a-b}{a_1-b_1} = \frac{I}{I_1}$$

$$\text{ou } \frac{a-b}{l} = \frac{a_1-b_1}{l_1}.$$

Ces deux propositions sont démontrées par l'expérience.

Entre deux points A et B d'un conducteur, la différence de potentiel est donc proportionnelle à r lorsque I est constant : c'est la *chute de potentiel due à la résistance r* .

$$a-b = gr$$

mais, comme cette différence de potentiel doit aussi être proportionnelle à I ,

$$g = hI$$

$$\text{d'où } a-b = hIr$$

c'est la loi énoncée par Ohm pour un conducteur.

Conformément à la règle qui a été posée pour définir les unités dérivées (135), le choix des unités adoptées en électricité a été fait de telle façon que le coefficient h soit égal à 1, et en écrivant $a-b = Ir$, $a-b$ est exprimé en volts, I en ampères et r en ohms.

922. Conséquences de la loi d'Ohm relative à un conducteur. — Soit un conducteur *homogène de section constante*. D'après l'expression $r = \rho \frac{l}{s}$ (916), r est proportionnel à la longueur. La chute de potentiel entre deux points le long d'un conducteur homogène traversé par un courant est donc proportionnelle à la distance des deux points.

La vérification de ce cas particulier se fait très simplement. Si l'on relie respectivement aux deux paires de quadrants d'un électromètre deux points du conducteur, la déviation de la plaque mobile est proportionnelle à la distance des deux points.

Développons le conducteur sur une horizontale AB. Sur les perpendiculaires aux extrémités de AB prenons des longueurs représentant les potentiels des extrémités. Les points intermédiaires du conducteur ont pour potentiels les ordonnées d'une droite A'B'. Les potentiels forment une ligne droite ou varient en progression arithmétique ⁽²⁾.

(1) De même, pour un courant liquide, le débit est proportionnel à la différence des niveaux entre deux points A et B.

(2) Le long d'un tube de diamètre constant traversé par un liquide, on observe une chute de pression proportionnelle à la longueur. Les niveaux forment une droite (fig. 761).

923. Extension de la loi d'Ohm au circuit tout entier. — Portons sur une horizontale des longueurs égales aux résistances du circuit coupé en un point et développé; menons aux différents points de cette horizontale des ordonnées égales aux potentiels en ces points; nous obtenons, en appliquant la loi d'Ohm aux conducteurs consécutifs de nature différente AB, BD, DA constituant le circuit (fig. 764) :

$$I = \frac{a-b}{r_1}$$

$$I = \frac{c-d}{r_2}$$

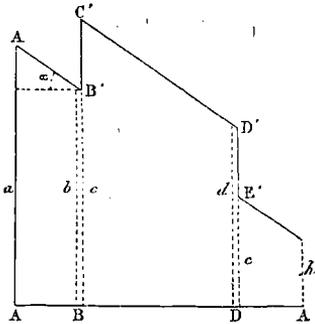


Fig. 764.

comme l'intensité I a la même valeur sur tout le circuit, l'inclinaison des droites représentatives des potentiels sera la même, car

$$I = \frac{a-b}{r_1} = \operatorname{tg} \alpha$$

Pour toute la série des conducteurs,

$$\begin{aligned} I &= \frac{a-b}{r_1} = \frac{c-d}{r_2} = \frac{e-h}{r_3} \\ &= \frac{a-b+c-d+e-h}{r_1+r_2+r_3} \end{aligned}$$

(Dans la fig. 764, conformément aux expériences de Volta, nous avons admis qu'au point de contact de deux conducteurs différents, le potentiel varie brusquement; en outre, que le circuit soit ouvert ou fermé, les variations de potentiels au contact ne changent pas.)

Posons $a-h = \varepsilon_1$, $c-b = \varepsilon_2$, $e-d = \varepsilon_3 \dots$ ε_1 et ε_2 sont positifs, ε_3 est négatif.

$$I = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3}{r_1 + r_2 + r_3} = \frac{\Sigma \varepsilon}{\Sigma r}$$

$\Sigma \varepsilon$ est la somme algébrique des forces électromotrices à tous les contacts : Σr est la somme des résistances du circuit; si l'on s'appuie sur la loi de Volta, on reconnaît que les différences de potentiel aux contacts métalliques disparaissent, $\Sigma \varepsilon$ se réduit à la somme des forces électromotrices des éléments de pile.

Vérifions-le pour 2 éléments (fig. 765)

$$\Sigma \varepsilon = \underbrace{C|Z + Z|L + L|C}_{E} + \underbrace{C|Z + Z|L + L|C}_{E} + \underbrace{C|M + M|M' + M'|M' + M''|C}_{0}$$

Dans un circuit traversé par un courant, il y a variation brusque de potentiel aux différents contacts hétérogènes, et cette variation est la même qu'en circuit ouvert; mais partout ailleurs le potentiel varie d'une façon continue, et les droites représentatives des potentiels sont inclinées.

Quand le circuit d'une pile est ouvert, il y a encore variation brusque de potentiel aux contacts hétérogènes, mais aux points intermédiaires il y a équilibre, et le potentiel reste constant; les droites représentatives des potentiels sont *horizontales* (fig. 766.)

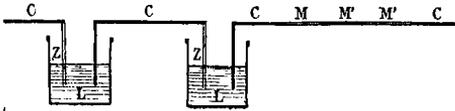


Fig. 765.

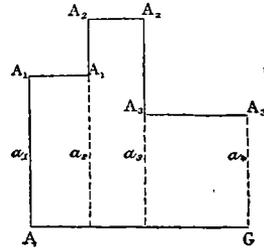


Fig. 766.

924. Résumé sur la loi d'Ohm. — Appliquée à un circuit entier, la loi d'Ohm s'exprime par l'équation $I = \frac{\sum e}{\sum r} = \frac{E}{R}$ semblable à l'équation relative à un conducteur : le numérateur représente la différence de potentiel aux deux pôles de la pile ouverte ou la force électromotrice, le dénominateur est la résistance totale du circuit.

L'intensité d'un courant en ampères est égale au quotient de la force électromotrice en volts par la résistance du circuit en ohms.

En résumé, la loi d'Ohm s'applique : 1° à un conducteur quelconque, de résistance r , traversé par un courant d'intensité I ;

$$e = Ir$$

e représente la différence de potentiel aux deux extrémités du conducteur ou la différence des charges de petites sphères de rayon 1 mises en communication lointaine avec ces deux extrémités.

2° à un circuit entier, de résistance totale R , traversé par un courant d'intensité I .

$$E = IR$$

E est la force électromotrice de la pile ou la différence de potentiel aux deux pôles de la pile ouverte.

925. Différence de potentiel aux deux pôles d'une pile en circuit fermé. — Appelons λ la résistance de la pile, r la résistance extérieure intermédiaire, R la résistance totale du circuit : $R = \lambda + r$.

Quand le circuit est fermé, la différence de potentiel E' entre les pôles est inférieure à la force électromotrice de la pile ouverte.

$$\text{On a, en effet, } Ir = E' \quad \text{et} \quad I(\lambda + r) = E$$

$E' < E$, la différence $E - E' = I\lambda$, c'est la chute de potentiel apportée par la résistance de la pile elle-même.

$$\text{d'où } \frac{E'}{E} = \frac{r}{\lambda + r} = \frac{1}{\frac{\lambda}{r} + 1}$$

E' sera d'autant plus voisin de E que $\frac{\lambda}{r}$ sera plus petit.

$E' = E - I\lambda$, la différence de potentiel entre les pôles est égale à la force électromotrice de la pile diminuée du produit de la résistance intérieure par l'intensité du courant.

APPLICATIONS DE LA LOI D'OHM

926. Groupement des éléments d'une pile. — Dans une pile formée d'éléments groupés d'une façon quelconque, *chaque élément se comporte comme s'il était seul.*

I. Groupement en série (fig. 767). — *Le pôle positif de chaque élément est relié au pôle négatif de l'élément suivant.*

Soient n éléments identiques, E la force électromotrice d'un élément en volts ; nE sera la force électromotrice totale, car les forces électromotrices agissent toutes dans le même sens et s'ajoutent⁽¹⁾. Les résistances intérieures des éléments s'ajoutent, car le même courant traverse tous les éléments. Si l'on désigne par λ la résistance de chaque élément en ohms, $n\lambda$ sera la résistance de la pile ; r étant la résistance interpolaire,

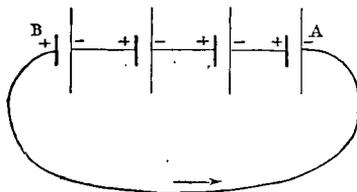


Fig. 767.

$$I = \frac{nE}{n\lambda + r}.$$

Lorsque la résistance extérieure est considérable, si la résistance intérieure de la pile est négligeable par rapport à la résistance extérieure $I = \frac{nE}{r}$, l'intensité est proportionnelle au nombre des éléments.

Quand la résistance extérieure est négligeable, $I = \frac{E}{\lambda}$, l'intensité est alors indépendante du nombre des éléments, et il n'y a pas avantage à employer ce mode de groupement.

(1) On peut assimiler ces éléments à une série d'appareils hydrauliques élevant l'eau par degrés successifs.

S'il y a dans le circuit n' éléments de résistance λ' et de force électromotrice E' opposés à la pile principale, la force électromotrice résultante est $nE - n'E'$

$$I = \frac{nE - n'E'}{n\lambda + n'\lambda' + r}$$

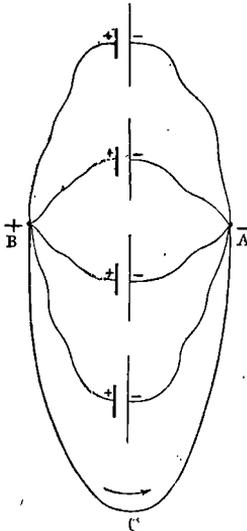


Fig. 768.

II. Groupement en batterie ou en surface (fig. 768). — Soit n éléments identiques. Tous les pôles de même nom sont réunis entre eux, les pôles négatifs aboutissent en un même point A, les pôles positifs en un même point B.

Le conducteur interpolaire ACB a une résistance r .

La force électromotrice de l'ensemble des éléments est la même que celle d'un seul élément; la résistance intérieure de cet élément unique est inversement proportionnelle à la surface des lames plongées. Comme cette surface est n fois plus grande qu'avec un élément simple, la résistance de la pile est $\frac{\lambda}{n}$.

$$I = \frac{E}{\frac{\lambda}{n} + r}$$

Pour une résistance extérieure très petite, ce mode d'association convient, car l'intensité $\frac{nE}{\lambda}$ est proportionnelle au nombre des éléments.

Dans le cas où la résistance extérieure est très grande par rapport à la résistance de la pile, $I = \frac{E}{r}$, l'intensité est indépendante du nombre des éléments, le groupement en surface n'est pas alors avantageux.

III. Groupement mixte (fig. 769). — On forme un certain nombre de batteries que l'on associe ensuite en série. Désignons par p le nombre total des éléments dont on dispose, par m le nombre des éléments accouplés en surface dans une batterie, par n le nombre des batteries groupées en série.

Chaque batterie a une force électromotrice E et une résistance $\frac{\lambda}{m}$; la pile a la force électromotrice nE et une résistance $\frac{n\lambda}{m}$.

$$I = \frac{nE}{\frac{n\lambda}{m} + r} = \frac{E}{\frac{\lambda}{m} + \frac{r}{n}}$$

L'intensité sera *maximum* si le dénominateur est minimum.

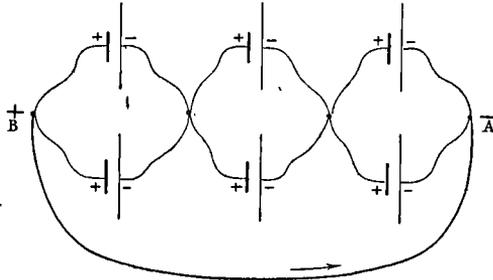


Fig. 769.

Le produit des deux termes de la somme qui forme le dénominateur est constant; c'est :

$$\frac{\lambda}{m} \cdot \frac{r}{n} = \frac{r\lambda}{p}$$

Cette somme sera minimum quand les deux termes seront égaux, ou quand on aura :

$$\frac{\lambda}{m} = \frac{r}{n}$$

$$\text{ou } r = \frac{n\lambda}{m}$$

Groupement le plus avantageux. — D'après ce qui précède, l'intensité, pour une pile formée d'éléments *identiques*, sera maximum si la résistance de la pile $\frac{n\lambda}{m}$ est égale à la résistance extérieure r , on choisira le groupement qui réalise le mieux possible cette condition. Nous voyons encore d'après ce résultat que le groupement en série convient lorsque la résistance extérieure est considérable, et le groupement en batterie lorsque la résistance extérieure est très faible.

Applications. — 1° Une pile de 8 éléments ayant chacun 1,8 volt de force électromotrice et 0,4 ohm de résistance intérieure, est opposée à une autre de 6 éléments ayant 1,1 volt de force électromotrice et 0,3 ohm de résistance. Quelle est l'intensité du courant?

2° Une pile a 120 éléments; elle est formée de deux groupes associés en quantité, chacun de ces groupes renferme 60 éléments en série. Quelle est la résistance de la pile, la résistance d'un élément étant 1,5 ohm?

3° La différence de potentiel aux deux pôles d'une machine de Holz est de 50 mille volts, l'intensité du courant est 0,1 milliampère. Quelle est la résistance intérieure de la machine, la résistance extérieure étant négligeable?

4° La différence de potentiel aux deux pôles d'un élément de pile à circuit ouvert est 15 volts; on réunit les pôles par un fil conducteur; on a un courant de deux ampères, et la différence de potentiel entre les pôles devient 10 volts. Trouver la résistance r du fil et la résistance R de la pile.

5° La différence de potentiel aux deux pôles d'une pile en circuit ouvert est 1,8 volt; on ferme le circuit par une résistance extérieure de 10 ohms, et on observe entre les deux pôles une différence de potentiel de 1,75. Calculer la résistance R de l'élément de pile.

6° Les pôles d'une pile de 10 éléments sont réunis par un fil homogène de 16 mètres de longueur ayant une résistance de $\frac{1}{2}$ ohm par mètre. La différence de potentiel aux deux pôles de chaque élément de pile est 1,8, et sa résistance 0,4 ohm. Quelle sera sur le fil la distance de deux points offrant une différence de potentiel de 1 volt?

7° Un élément Daniell de force électromotrice 1,08 et un élément Bunsen de force électromotrice 1,8 sont opposés dans un circuit: le courant a une intensité de 0,4 ampère. Quelle serait l'intensité I si les éléments s'ajoutaient?

8° Un circuit, dont la résistance extérieure est 1 ohm, est traversé par le courant de 5 éléments égaux disposés en série. Quelle est l'intensité du courant? Résistance d'un élément 0,4 ohm, différence de potentiel 1,8 volt.

9° Un circuit renferme cinq éléments semblables, un galvanomètre d'une résistance de $\frac{1}{2}$ ohm, et un conducteur intermédiaire d'une résistance de $\frac{1}{2}$ ohm. Les cinq éléments étant en série, l'intensité du courant est 1,5 ampères; s'ils sont en quantité, l'intensité est 1,25 ampères. Calculer la différence de potentiel E et la résistance intérieure R d'un élément?

10° Le courant d'une pile constante est de 10 ampères quand il traverse un circuit extérieur de 20 ohms, de 8 ampères avec une résistance de 40 ohms et de 9 ampères à travers un fil de résistance inconnue. Trouver la résistance R de la pile et la résistance x du fil.

11° Quel est le courant maximum qu'on peut obtenir avec 40 éléments offrant chacun une différence de potentiel de 1,6, et dont la résistance intérieure est 0,3, la résistance extérieure étant 3 ohms? Comment faut-il grouper les éléments?

927. Courants dérivés. — Arc double. —

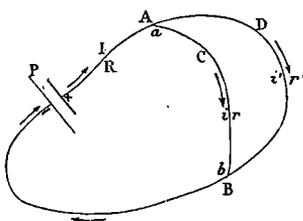


Fig. 770.

En un point A du circuit d'une pile, le courant se bifurque en deux branches de résistance r et r' qui se réunissent en B (fig. 770). On donne E , r , r' , R et on demande I , i , i' .

Nous admettons que l'intensité I dans le circuit principal est égale à la somme des intensités i et i' dans les deux branches de dérivation

$$I = i + i' \quad (1)$$

Désignons par a et b les potentiels en A et B, et appliquons la loi d'Ohm aux conducteurs ACB et ADB :

$$i = \frac{a-b}{r} \quad i' = \frac{a-b}{r'} \quad (2)$$

$$I = i + i' = (a-b) \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{r'} \right).$$

Calcul de la résistance de l'arc double. — Si les deux fils ACB, ADB sont remplacés par un seul conducteur équivalent, sa résistance r_1 satisfait à l'équation

$$I = \frac{a-b}{r_1}$$

$$\text{donc } \frac{1}{r_1} = \frac{1}{r} + \frac{1}{r'} \quad r_1 = \frac{rr'}{r+r'}$$

$$\text{or } I = \frac{E}{R+r_1}$$

d'après la loi d'Ohm appliquée à tout le circuit.

R est la résistance de la partie non dérivée du circuit, E représente la force électromotrice de la pile.

$$I = \frac{E}{R + \frac{rr'}{r+r'}} \quad (3)$$

Calcul des intensités. — Les équations (2) peuvent s'écrire :

$$a-b = ir = i'r' \quad (4)$$

$$\text{par suite } \frac{i}{i'} = \frac{r'}{r}$$

les intensités dans les branches dérivées sont en raison inverse des résistances de ces branches.

Les équations (1) et (4) donnent :

$$\frac{i}{r} = \frac{i'}{r'} = \frac{I}{\frac{1}{r} + \frac{1}{r'}}$$

$$\text{d'où } i = \frac{Ir'}{r+r'} \quad i' = \frac{Ir}{r+r'}$$

$$\text{que l'on joindra à } I = \frac{E}{R + \frac{rr'}{r+r'}}$$

Arc multiple. — On donne E, r, r', \dots, R et on cherche I, i, i', \dots . S'il y a plus de deux branches entre A et B (fig. 771) on peut écrire :

$$I = i + i' + i'' \dots$$

$$\text{et } a-b = ir = i'r' = i''r'' \dots$$

$$\text{d'où } \frac{i}{r} = \frac{i'}{r'} = \frac{i''}{r''} \dots = \frac{I}{\sum \frac{1}{r}}$$

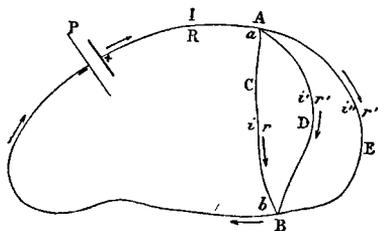


Fig. 771.

Ce qui conduit à $i = \frac{I \frac{1}{r}}{\Sigma \frac{1}{r}}$ et $i' = \frac{I \frac{1}{r'}}{\Sigma \frac{1}{r}}$

que l'on joindra à $I = \frac{IE}{R + \Sigma \frac{1}{r}} = \frac{E}{R + \Sigma \frac{1}{r}}$

La résistance unique r_1 , qui équivaldrait à toutes les branches r, r' , comprises entre A et B, est donnée par $\frac{1}{r_1} = \Sigma \frac{1}{r}$.

La relation $\frac{1}{r_1} = \frac{1}{r} + \frac{1}{r'} + \frac{1}{r''} + \dots$ qui donne la résistante r_1 équivalente à un faisceau de conducteurs parallèles, remplace l'équation $r_1 = r + r' + r'' \dots$ qui se rapporte à des conducteurs consécutifs.

928. Pont de Wheatstone. — On appelle ainsi la disposition employée habituellement pour comparer les résistances.

Entre deux points A et B d'un circuit parcouru par un courant sont intercalés deux conducteurs ACB, ADB. Le courant s'y bifurque (fig. 772).

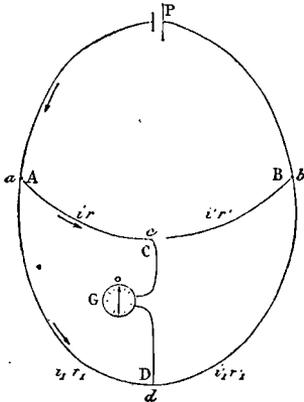


Fig. 772.

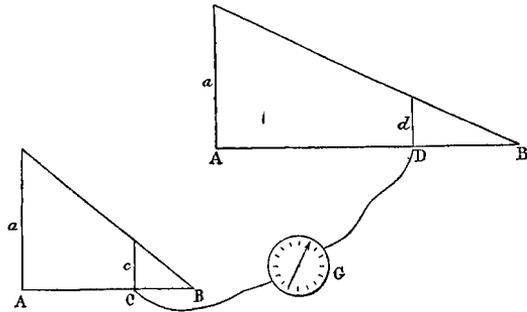


Fig. 773.

Le long de chacun de ces conducteurs le potentiel décroît de a à b . On peut trouver sur ces deux conducteurs une infinité de paires de points au même potentiel. Si on établit une communication par un pont jeté entre deux points C et D au même potentiel, il ne passe aucun courant dans ce pont (fig. 773). Les quatre résistances r, r', r_1, r_1' , interceptées par le fil CD offrent alors entre elles une relation simple.

Comme il ne passe rien dans le conducteur CD, le courant conserve la même intensité i en AC et CB, et la même intensité i_1 en AD et DB.

Désignons les potentiels en A, B, C, D par les petites lettres correspon-

dantes, et appliquons la loi d'Ohm aux quatre branches AB et CB, AB et DB :

$$i = \frac{a-c}{r} = \frac{c-b}{r'}$$

$$i_1 = \frac{a-d}{r_1} = \frac{d-b}{r'_1}$$

$$\text{on a donc } r'(a-c) = r(c-b)$$

$$r'_1(a-d) = r_1(d-b)$$

$c = d$ puisqu'il ne passe pas de courant en D,

$$\text{d'où, en divisant } \frac{r'}{r'_1} = \frac{r}{r_1}$$

Si, en particulier, par un choix convenable du point C, on a pris les deux résistances r' et r'_1 égales entre elles, la position du point D devra être telle qu'on ait $r = r_1$.

929. Détermination expérimentale d'une résistance par le pont de Wheatstone. — Cette méthode est à la fois sensible et précise ; en outre, elle n'exige pas la constance du courant de la pile.

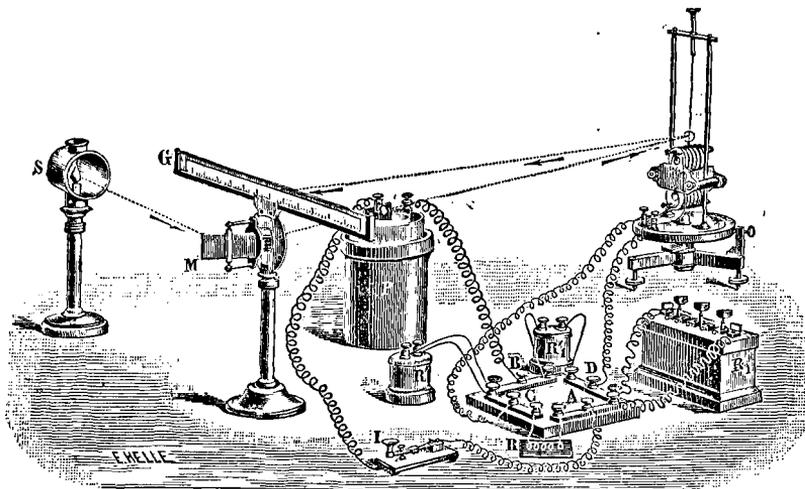


Fig. 774.

On forme les deux branches CB et DB de résistances R' et R'_1 égales entre elles, puis on introduit entre A et C la résistance à évaluer R , et entre A et D une boîte de résistances R_1 (fig. 774). On enlève graduellement les chevilles de cette boîte de résistances jusqu'à ce que la déviation du galvanomètre placé dans le pont CD soit inappréciable ; il suffit alors de lire sur la boîte le nombre d'ohms introduits pour avoir la valeur en ohms de

la résistance AC. Un interrupteur à manette I, semblable à un manipulateur de télégraphe Morse (1001), permet d'interrompre le courant pendant les tâtonnements que nécessite le réglage des résistances. On profite de toute la sensibilité de la méthode en faisant usage d'un galvanomètre à miroir (985).

Pour déterminer la résistance spécifique d'une substance, on évalue par la méthode du pont la résistance R d'un échantillon dont on mesure la longueur et la section, on calcule ensuite la résistance spécifique ρ d'après l'équation $R = \rho \frac{l}{s}$

(**Pont de Wheatstone hydraulique** (fig. 775). — Les analogies hydrauliques, qui nous ont facilité à plusieurs reprises l'intelligence des phénomènes de courant, nous fournissent dans le cas actuel une représentation commode de la circulation électrique dans la disposition du pont de Wheatstone.

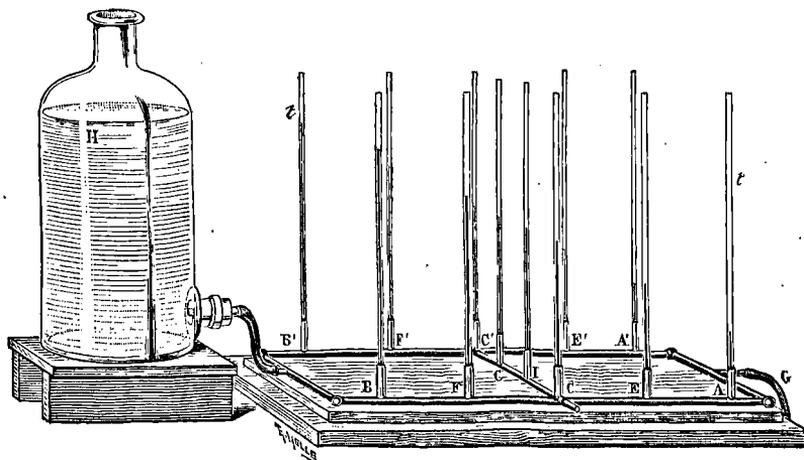


Fig. 775.

A la pile correspond un réservoir contenant de l'eau à un niveau II; les quatre branches entre lesquelles le courant se partage sont remplacées par quatre tuyaux portant des tubes t indicateurs de niveau; le pont est un tuyau transversal CC' réunissant deux points C et C' où le niveau est le même. La chute des niveaux en BCA est figurée par une droite, il en est de même de la chute en B'C'A'; les quatre branches ayant été prises égales, l'inclinaison des deux droites BCA, B'C'A' est la même. Sur le tuyau transversal CC', qui figure le pont, les tubes indicateurs intermédiaires, en G et en I, marquent le même niveau qu'en C et C', ce qui prouve qu'aucun courant n'y circule.)

930. Détermination des constantes d'une pile. — La force électromotrice et la résistance intérieure d'un élément de pile s'appellent les constantes de cet élément; la force électromotrice se mesure en volts et la résistance de l'élément en ohms.

Mesure de la différence de potentiel. — On détermine à circuit ouvert avec l'électromètre à quadrants la différence de potentiel des deux pôles (fig. 732); elle est égale à la force électromotrice (903).

Cette différence de potentiel ne dépend ni des dimensions de l'élément ni de sa résistance; la concentration des liquides n'exerce qu'une faible influence, c'est de la nature des métaux qu'elle dépend surtout.

Mesure de la résistance intérieure. — La résistance d'un élément de pile diminue quand ses dimensions augmentent; la résistance est d'autant plus petite que les surfaces des métaux plongés sont plus larges et que l'épaisseur des liquides interposés est plus faible.

Un moyen de déterminer la résistance intérieure d'un élément de pile à courant constant pendant son fonctionnement consiste à intercaler dans son circuit une résistance connue r_1 . On mesure avec un électromètre à quadrants la différence de potentiel E' aux deux pôles à *circuit fermé*, puis la différence de potentiel e aux extrémités de la résistance r_1 .

Désignons par E la force électromotrice de la pile, par λ sa résistance, par r la résistance du circuit intermédiaire.

$$\text{Nous avons : } Ir = E'; \quad Ir_1 = e; \quad I(\lambda + r) = E$$

$$\text{d'où } I\lambda = E - E'$$

$$\text{et } \frac{\lambda}{r_1} = \frac{E - E'}{e}$$

Applications. — 1° Trois conducteurs en arc multiple relient deux points d'un circuit. Leurs résistances respectives sont 3 ohms, 5 ohms et 9 ohms. Quelle est la résistance totale de l'arc?

2° Dans un pont de Wheatstone on a pris comme résistances fixes 20 et 100 ohms; quelle sera la résistance d'un fil occupant la branche contiguë à 20 ohms si la résistance de la boîte graduée qui établit l'équilibre dans la 4° branche est 252 ohms?

3° Une bobine marquée 1 ohm a réellement une résistance égale à 1,005 ohms. Quelle longueur l'un fil ayant une résistance de 20 ohms par mètre devra-t-on placer entre les bornes de la bobine pour avoir un ohm exact?

4° Trois fils aboutissant aux deux points A et B d'un circuit ont pour résistances respectives 1, 2 et 3 ohms. Quelle sera l'intensité I du courant total qui passe entre A et B lorsque la différence de potentiel entre ces deux points est 2 volts?

5° Les pôles d'une pile sont réunis à 2 fils formant un arc double; l'un d'une résistance de 50 ohms, l'autre d'une résistance de 100 ohms. La force électromotrice de la pile étant 6 volts et sa résistance 10 ohms, trouver l'intensité du courant principal et des courants dérivés.

EFFETS CALORIFIQUES DES COURANTS

931. Les courants électriques élèvent la température des conducteurs qu'ils traversent⁽¹⁾. Un fil de fer tendu entre les deux pôles d'une forte pile s'échauffe et rougit; il peut fondre et brûler s'il est assez fin et assez court. Nous avons déjà observé la chaleur développée dans un conducteur métallique que parcourt la décharge d'une batterie électrique (835); les lois sont analogues pour les courants continus des piles.

Expériences de Joule. — Pour trouver ces lois, Joule fit plonger dans un calorimètre contenant un poids d'eau connu des fils S enroulés en spirales et traversés par un courant constant (fig. 776). L'intensité du courant était mesurée par une boussole des tangentes (990). La chaleur gagnée par le calorimètre ne provenait que de la chaleur dégagée par le courant *dans le fil*. On évitait, en effet, des dérivations du courant dans le liquide en prenant pour liquide du calorimètre un mauvais conducteur, tel que l'eau distillée, l'alcool ou l'essence de térébenthine.

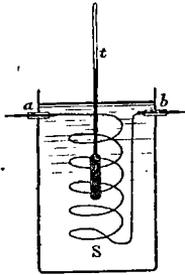


Fig. 776.

La chaleur dégagée par le courant est égale au produit de l'élévation de température du calorimètre par la capacité calorifique de tout ce qui s'échauffe (laiton du calorimètre, fil, thermomètre)⁽²⁾.

(1) La résistance qu'un courant d'eau éprouve dans un tube provient des frottements entre l'eau en mouvement et les parois. Ce frottement dégage de la chaleur. La chaleur développée dans le circuit d'un courant électrique peut aussi être attribuée à une sorte de frottement contre la matière des conducteurs.

(2) Dans cette mesure, la correction de refroidissement du calorimètre est évitée par l'emploi d'une méthode dite *de compensation*.

La température ambiante étant désignée par τ , on prend le calorimètre et son contenu à une température inférieure de θ° (2 ou 3°) à la température τ , et on fait passer le courant dans la spirale jusqu'à ce que la température du calorimètre se soit élevé du même nombre de degrés θ au-dessus de τ .

La chaleur dégagée étant proportionnelle à la durée de l'expérience, il faut *le même temps* au calorimètre pour s'élever de $\tau - \theta$ à τ que pour passer de τ à $\tau + \theta$. Le réchauffement de la 1^{re} période compense alors exactement le refroidissement de la 2^e.

932. Résultats. — La chaleur dégagée dans un conducteur est *indépendante du sens du courant, proportionnelle à la durée de l'expérience*. Pour un conducteur déterminé et des intensités successives différentes, elle est *proportionnelle au carré de l'intensité*. Pour différents conducteurs faisant partie d'un même circuit parcouru par un courant constant, elle est *proportionnelle à la résistance des conducteurs*.

Le nombre W de calories dégagées pendant un temps t dans un conducteur de résistance r par un courant d'intensité I est donc proportionnel à I^2rt , c'est-à-dire au carré de l'intensité du courant, à la résistance du conducteur et au temps.

L'équivalent mécanique de la calorie étant $4,17 \cdot 10^7$ ergs ou $4,17$ joules, les W calories équivalent à un travail de $4,17 \cdot 10^7 W$ ergs ou $4,17 W$ joules; de même que W , ce travail est proportionnel à I^2rt

$$4,17W = KI^2rt;$$

d'autre part, d'après la loi d'Ohm (921),

$$Ir = e$$

où e représente la différence de potentiel entre les deux points qui comprennent la résistance r ; on a donc

$$4,17W = KIet.$$

933. Travail développé dans un circuit entier. — La loi de l'échauffement par le courant a été vérifiée pour tous les conducteurs, liquides et solides; si nous désignons par $r, r' \dots$ les résistances des différents conducteurs d'un circuit, le travail développé dans chacun d'eux est $I^2rt, I^2r't \dots$

Le travail développé dans tout le circuit dans un même temps sera $KI^2(r + r' + \dots)t = KI^2Rt$, où R représente la résistance totale.

D'après la loi d'Ohm étendue à tout le circuit, $IR = E$ (E force électromotrice de la pile), I^2Rt peut s'écrire EIt ou EQ , puisque $It = Q$. On a donc pour le travail total $4,17W = KEIt$.

Conformément à la règle qui a été posée pour définir les unités dérivées (135), le choix des unités adoptées en électricité a été fait de telle façon que le coefficient K de la relation $4,17W = KEIt$ devienne égal à 1. D'après cela, en écrivant

$$JW = EIt$$

où W représente le nombre de calories dégagées dans tout le circuit

(calories du gramme), J l'équivalent mécanique de la calorie en joules ($J = 4,17$), t le temps de l'expérience en secondes, l'intensité I du courant sera exprimée en ampères, les résistances $r, r' \dots R$ en ohms, la force électromotrice E de la pile en volts.

Le travail développé dans tout le circuit (évalué en joules) est égal au produit EQ de la force électromotrice de la pile (en volts) par le nombre de coulombs qui ont traversé le circuit.

On voit que la force électromotrice d'une pile est le travail en joules que produit un coulomb en tombant du potentiel E ou en traversant le circuit de cette pile.

La force électromotrice d'un électromoteur quelconque se définit l'énergie en joules qu'il communique à un coulomb. La force électromotrice d'un élément de pile est en même temps égale à la différence de potentiel aux deux pôles de l'élément en circuit ouvert.

934. Analogie hydraulique. — Signalons l'analogie que l'expression EQ du travail électrique présente avec le travail d'un liquide pesant tombant d'une hauteur H . Pour une chute d'un poids P de liquide, le travail est égal à HP .

On peut prévoir la loi de Joule en prenant pour point de départ l'analogie du potentiel en électricité et du niveau en hydraulique. Si une quantité d'électricité Q est transportée d'un point où le potentiel est V_1 à un autre où le potentiel est V_2 , cette quantité d'électricité produit un travail $(V_1 - V_2)Q$ ou eIt , puisque $V_1 - V_2 = e$ et $Q = It$.

935. Distribution relative de la chaleur dans un circuit.
— Puisque sur un même circuit les quantités de chaleur dégagées dans deux résistances r et r' sont I^2rt et $I^2r't$ ou en raison directe de r et de r' , la chaleur totale dégagée dans les différents conducteurs d'un circuit se répartit proportionnellement à leurs résistances.

A égalité de diamètre, un fil métallique est d'autant plus échauffé par un courant que sa résistance spécifique est plus grande. Si l'on transmet un courant d'intensité suffisante à travers un conducteur formé de chaînons de même diamètre *alternativement en argent et en platine* (fig. 777), les chaînons de platine sont portés au rouge tandis que les chaînons d'argent, moins résistants, restent sombres.

Le cuivre étant parmi les conducteurs usuels celui dont la résistance spécifique est la plus faible, de *gros fils de cuivre* n'offrent dans un circuit qu'une résistance relative négligeable et ne retiennent qu'une très minime partie du travail total.

Pour une même intensité du courant, *un fil fin s'échauffe plus* qu'une même longueur d'un gros fil de même substance, 1° parce que la chaleur dégagée y est plus forte (la résistance variant en raison inverse de la section); 2° parce que son poids étant moindre, sa capacité calorifique est plus faible, ce qui détermine une température plus élevée pour une même quantité de chaleur.

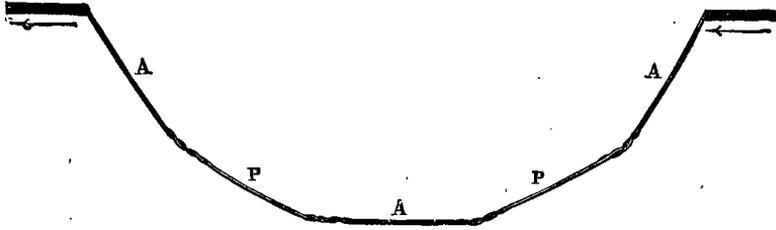


Fig. 777.

Il convient d'ajouter que la résistance d'un métal croissant avec sa température, le fil fin s'échauffe beaucoup plus qu'il ne le ferait si le rapport de sa résistance à celle du reste du circuit se maintenait ce qu'il est à la température ordinaire.

936. Chaleur perdue dans la pile. — La chaleur dégagée par un courant comprend deux parties : la chaleur absorbée par le circuit extérieur et la chaleur retenue par la pile elle-même ; cette dernière est dépensée en pure perte.

Si la résistance extérieure est négligeable, la chaleur est entièrement retenue par la pile ; elle apparaît, au contraire, tout entière dans le circuit extérieur si la résistance de la pile est très faible. La résistance intérieure d'une pile varie avec la nature des liquides et avec les dimensions des éléments ; elle diminue quand les dimensions des éléments augmentent (930).

D'après cela, quand on veut produire des effets calorifiques intenses dans des fils métalliques dont la résistance est toujours faible par rapport à la résistance des liquides d'une pile, on diminue la résistance des éléments en donnant aux métaux plongés une grande surface, et en réduisant l'épaisseur des liquides interposés ; de plus, on associe les éléments en batterie (926, II).

(937. Travail maximum. — Le seul travail utilisable d'une pile est celui qui est développé dans son circuit extérieur.

Désignons par E la force électromotrice de la pile, par λ sa résistance

intérieure, par I l'intensité du courant et par E' la différence de potentiel aux bornes de la pile à circuit fermé.

La différence E' se rapproche d'autant plus de E que la résistance extérieure r est plus considérable; c'est la chute de potentiel due à la résistance r , tandis que $E - E'$ est la chute relative à la résistance λ . L'énergie totale développée dans le circuit est EI , l'énergie utilisable est $E'I$, l'énergie retenue par la pile $(E - E')I$ ou $I^2\lambda$.

Appliquons successivement la loi d'Ohm au circuit tout entier et au circuit extérieur :

$$I(\lambda + r) = E \quad Ir = E'$$

$$\text{d'où } I\lambda = E - E' \quad \text{et } I = \frac{E - E'}{\lambda}$$

$$E'I = \frac{E'(E - E')}{\lambda}$$

Pour une pile déterminée, le dénominateur est invariable.

La somme $E' + E - E'$ étant constante, le produit $E'(E - E')$ est maximum quand les deux facteurs sont égaux, ou quand on a $E' = E - E'$, c'est-à-dire $E' = \frac{E}{2}$.

D'après la relation $I = \frac{E'}{r}$; si $E' = \frac{E}{2}$, $I = \frac{E}{2r}$:

Le maximum de travail utilisable par seconde correspond à une intensité $I = \frac{E}{2r}$; comme on a d'ailleurs $I = \frac{E}{\lambda + r}$, $\lambda + r = 2r$ ou $\lambda = r$; la résistance extérieure est alors égale à la résistance intérieure.

Remarquons que $E = E' + I\lambda$ ou $EI = E'I + I^2\lambda$.

Le rendement ou la fraction utilisable de l'énergie est $\frac{E'I}{EI}$ ou $\frac{E'}{E}$,

$$\frac{E'I}{EI} = \frac{EI - I^2\lambda}{EI} = 1 - I \frac{\lambda}{E}$$

le rendement est donc d'autant plus voisin de l'unité que l'intensité est plus petite.

Il est égal à $\frac{1}{2}$ lorsque $E' = \frac{E}{2}$ ou quand le travail utilisable par seconde est maximum. Le rendement est nul quand la pile est en court circuit ou fermée par un gros fil de cuivre, $\frac{E}{\lambda}$ est l'intensité correspondante.)

938. Applications des effets calorifiques du courant. — L'incandescence de fils fins de platine est utilisée dans les opérations chirurgicales (*galvanocautères*).

Dans l'éclairage par incandescence (1042), de fins filaments de charbon sont traversés par un fort courant et portés à une température assez élevée pour devenir lumineux.

Applications. — 1° Calculer l'énergie développée par heure dans un conducteur ayant une résistance de 32 ohms et offrant une différence de potentiel de 40 volts?

2° Combien de chevaux-vapeur faut-il pour maintenir un courant de douze ampères dans une résistance de 40 ohms?

3° On fait passer pendant 5 minutes un courant de 0,75 ampère dans une colonne de mercure dont la résistance est 0,47 ohm. Masse du mercure 20^{gr}25, chaleur spécifique du mercure 0,0322. En négligeant les pertes par rayonnement, à quelle température s'élèvera le mercure?

4° Un courant de 1,5 ampère passe pendant 15 minutes à travers un fil de 3 ohms de résistance plongé dans 300 grammes d'eau. Quelle sera l'élévation de température produite?

5° Les pôles d'une pile sont réunis à une spirale plongée dans un calorimètre qui contient 200 grammes d'eau. Un courant de deux ampères élève la température de l'eau de 2° en un quart d'heure. Quelle est la différence de potentiel aux deux extrémités de la spirale pendant le passage du courant?

6° Un courant traverse un fil de 10 ohms de résistance plongé dans un calorimètre. On fait circuler dans ce calorimètre 20 centimètres cubes d'eau par minute, cette eau présente à sa sortie 3° de plus qu'à l'entrée. Quelle est l'intensité du courant?

7° Les deux pôles d'un élément Bunsen de force électromotrice 1,8 et de résistance intérieure 0,7 sont réunis successivement : 1° par un fil de cuivre gros et court de résistance négligeable; 2° par un fil fin de platine de 5 ohms de résistance. Quel est le rapport des quantités de chaleur dégagées dans chaque cas dans l'élément?

8° Deux fils d'argent et de platine de même longueur et de même diamètre se suivent dans un circuit. Quel est le rapport des quantités de chaleur dégagées dans chacun d'eux? Résistance spécifique du platine 9, résistance spécifique de l'argent $\frac{3}{2}$ (en microhms).

9° Si les deux fils sont placés *en arc double* entre deux points du circuit, quel sera le nouveau rapport des quantités de chaleur dégagées dans le même temps dans chacun d'eux?

10° Un fil de plomb est employé comme *fil de sûreté* (coupe-circuit), quel diamètre faut-il lui donner pour que le courant qui le traverse ne puisse pas dépasser 10 ampères? Nous prendrons 3,2 microhms pour résistance spécifique du plomb de 0° à 330°. Nous admettons, *par approximation*, que le rayonnement du métal chaud a lieu conformément à loi de Newton et que la fraction de calorie rayonnée par degré et par centimètre carré est $\frac{1}{4000}$.

EFFETS CHIMIQUES DES COURANTS

939. Tandis qu'un conducteur métallique n'éprouve aucune modification chimique par le passage d'un courant, les conducteurs liquides sont décomposés *lorsque le courant les traverse*. La décomposition par le courant est nommée *électrolyse*. Une substance qui subit la décomposition est un *électrolyte*. Les *électrodes* sont les plaques conductrices qui comprennent le liquide. On appelle électrode positive la plaque reliée au pôle positif, électrode négative la plaque reliée au pôle négatif.

Décomposition de l'eau. — La première décomposition électro-

chimique qui ait été observée est la décomposition de l'eau. Elle se fait dans un *voltamètre*. C'est un vase de verre dont le fond est traversé par deux lames de platine E et E' fixées dans un mastic isolant G et reliées par des fils métalliques à deux bornes P et P' munies de vis et fixées sur un socle (fig. 778). On verse dans le voltamètre de l'eau acidulée avec de l'acide sulfurique, et on recouvre chacune

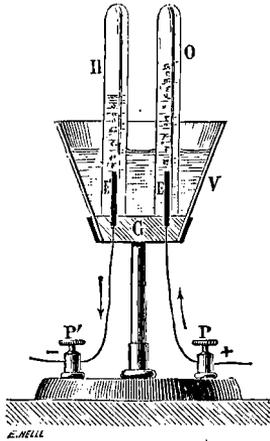


Fig. 778.

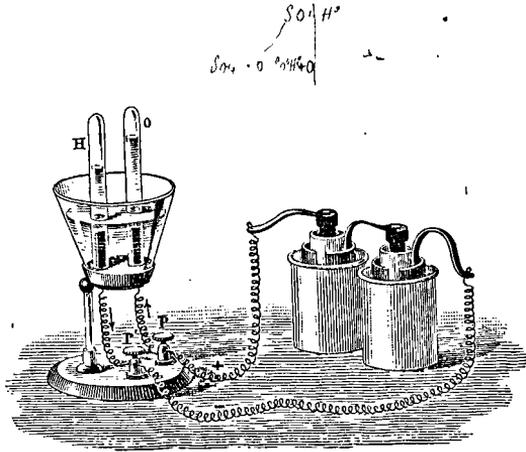


Fig. 779.

des lames d'une éprouvette pleine du même liquide. On met en communication les deux bornes P et P' avec les deux pôles d'une pile de quelques éléments Bunsen (fig. 779). Dès que le circuit est fermé, de nombreuses bulles de gaz se dégagent sur les deux lames de platine et gagnent le haut des éprouvettes. Ce sont les éléments de l'eau, *ils sont séparés* : l'hydrogène se dégage exclusivement à l'électrode négative et l'oxygène à l'électrode positive. Le volume de l'hydrogène est constamment *double* de celui de l'oxygène. Entre les électrodes on ne voit se produire aucune trace de décomposition. Le dégagement aux deux électrodes cesse dès que l'on interrompt le courant et reprend si le circuit est de nouveau fermé.

Décomposition des composés binaires métalliques. — Les oxydes, chlorures, sulfures... sont décomposés par le courant. Le métalloïde se rend à l'électrode positive, le métal à l'électrode négative. C'est ainsi que sont décomposés les chlorures métalliques anhydres rendus conducteurs par fusion ou leurs solutions aqueuses. Ils donnent du chlore à l'électrode positive, du métal à l'électrode

négative. Dans le cas des chlorures, on prend pour électrode positive une électrode de charbon que le chlore n'attaque pas.

Décomposition des sels oxygénés. — Prenons pour exemple le sulfate de cuivre SO^4Cu . Dans un tube à deux branches (fig. 780) on verse une dissolution du sulfate, et on plonge dans chacune des branches une lame de platine communiquant avec l'un des pôles d'une pile. L'électrode négative B se recouvre d'un enduit rouge de cuivre métallique; de l'acide sulfurique et de l'oxygène apparaissent à l'électrode positive A; la liqueur devient acide autour de cette électrode et il s'y dégage de l'oxygène.

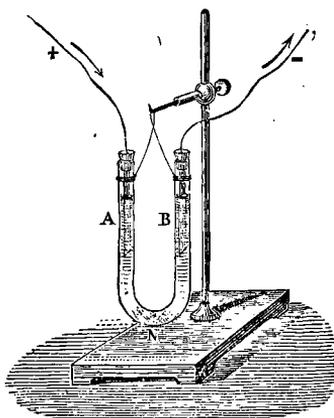


Fig. 780.

940. Mécanisme général de l'électrolyse. — La décomposition des composés binaires métalliques et celle des sels oxygénés donnent des résultats qu'on peut formuler dans un même énoncé en regardant ces différents corps comme formés d'un métal uni, soit à un radical métalloïde tel que Br, I, O, S... soit à un radical acide comme SO^4 , AzO^3 ... *Le métal se rend à l'électrode négative, le métalloïde ou le radical à l'électrode positive.*

Théorie de Grotthus. — Pour concevoir que les éléments d'un corps décomposé par le courant n'apparaissent qu'aux électrodes, on admet que le courant oriente toutes les molécules, les décompose à la fois sur son parcours et dirige l'un de leurs éléments vers le pôle négatif et l'autre vers le pôle positif.

Prenons le sulfate de cuivre comme exemple : le cuivre d'une molécule décomposée se recombine au radical SO^4 de la molécule suivante; par ces décompositions et recompositions successives, un élément cuivre à l'une des extrémités de la couche et un élément SO^4 à l'autre extrémité deviennent seuls libres et se dégagent. Cette interprétation connue sous le nom de *théorie de Grotthus* s'applique à toutes les décompositions par le courant.

On peut produire l'électrolyse avec une machine électrostatique, mais elle est extrêmement lente en raison de la très faible intensité du courant.

LOIS DE L'ÉLECTROLYSE

941. Première loi. — *Si plusieurs voltamètres se suivent dans un même circuit, le poids⁽¹⁾ d'hydrogène dégagé dans chacun d'eux est le même dans le même temps.*

Ces voltamètres peuvent différer par l'écartement ou la surface des lames de platine, par la conductibilité du liquide. Intercalés séparément et successivement dans un même circuit, ils donneraient des dégagements différents d'hydrogène, parce qu'ils diminueraient l'intensité du courant dans des proportions différentes. Placés *en série* dans le circuit, ils offrent tous en même temps un même volume d'hydrogène.

L'expérience peut être répétée avec un électrolyte quelconque. Par exemple, le même poids de sulfate de cuivre serait décomposé dans plusieurs appareils à sulfate de cuivre faisant partie d'un même circuit. L'action chimique est donc la même en tous les points.

Deuxième loi. — *Les poids d'un même électrolyte, décomposés dans un même temps, sont proportionnels aux quantités d'électricité qui passent ou aux intensités du courant.*

Si l'on bifurque un circuit en formant de A en B deux dérivations de même résistance, et si l'on introduit trois voltamètres, l'un V dans le circuit principal, et les deux autres V' et V'' identiques dans les dérivations (fig. 756), les poids décomposés en V' et V'' sont les mêmes et égaux à la moitié du poids décomposé en V.

Troisième loi. — *Le poids d'un électrolyte décomposé par un courant constant est proportionnel au temps.*

Cette loi est admise quand on définit l'invariabilité d'un courant par la constance de l'effet chimique ; on doit l'énoncer comme fait d'expérience si on définit l'invariabilité du courant par la constance d'un autre effet tel que l'effet magnétique.

Quatrième loi. — *Si l'on place dans un même circuit plusieurs vases à décomposition renfermant des composés métalliques différents, en un même temps, un même courant décompose, dans les divers appareils qu'il traverse, des poids des composés correspon-*

(1) Masse ou poids en grammes.

dant à des valences égales des métaux : KCl , $\frac{1}{2} \text{MgCl}_2$, $\frac{1}{3} \text{AuCl}_3$,
 $\frac{1}{4} \text{PtCl}_4$, AgAzO_3 ...

Dans la notation en équivalents, cette loi s'énonce : en un même temps, un même courant décompose dans chacun des divers appareils qu'il traverse un poids du composé proportionnel à son équivalent en poids : KCl , PbCl ...

L'équivalent étant le poids atomique divisé par la valence, cet énoncé exige que l'on présente d'une façon spéciale les formules des divers composés métalliques; c'est ainsi qu'on écrira $\text{Fe}^{\frac{2}{3}}\text{Cl}$, au lieu de Fe^2Cl_3 , $\text{Sn}^{\frac{1}{2}}\text{Cl}$ au lieu de SnCl_2 .

942. Poids d'hydrogène ou de métal séparé par un coulomb. — On forme un circuit comprenant une boussole des tangentes, un voltamètre et une pile; on mesure la masse m d'hydrogène dégagée par un courant de I ampères⁽¹⁾ pendant un temps t ; cette masse étant proportionnelle à la quantité d'électricité qui passe, d'après la deuxième loi,

$\frac{m}{It}$ est la masse d'hydrogène dégagée en une seconde par un courant de 1 ampère ou par un coulomb. On trouve $\frac{m}{It} = \frac{1}{96\ 600}$.

Un coulomb dégage donc $\frac{1}{96\ 600}$ de gramme d'hydrogène.

Pour un métal quelconque $\frac{m'}{It} = \frac{E}{96\ 600}$.

E étant l'équivalent du métal.

96 600 coulombs dégagent 1 équivalent d'hydrogène ou déposent 1 équivalent d'un métal.

On appelle *équivalent électrochimique* ϵ d'une substance la masse de cette substance mise en liberté par le passage d'un coulomb.

L'équivalent électrochimique de l'hydrogène est $\frac{1}{96\ 600}$, celui du cuivre $\frac{31,5}{96\ 600}$, celui du zinc $\frac{33}{96\ 600}$, celui de l'argent $\frac{108}{96\ 600}$.

La masse de substance mise en liberté par une quantité d'électricité It est ϵIt .

943. Mesure de l'intensité d'un courant en ampères. — La connaissance du nombre 96 600 permet de déduire de l'indication d'un voltamètre l'intensité d'un courant en ampères.

(1) On évalue l'intensité du courant avec la boussole des tangentes d'après la déviation de l'aiguille aimantée et d'après les dimensions du cadre (990).

m étant la masse d'hydrogène dégagé en t secondes par un courant d'intensité I

$$\text{l'équation } \frac{m}{It} = \frac{1}{96\,600} \text{ donnera } I.$$

On pourra employer de la même manière un appareil à décomposition d'azotate d'argent.

$$\text{L'équation } \frac{m}{It} = \frac{108}{96\,600} \text{ donnera } I,$$

quand on aura obtenu la masse m d'argent déposé sur l'électrode négative et mesuré le temps t .

944. Effets chimiques à l'intérieur de la pile. — Le courant électrolyse tous les liquides qu'il traverse, dans les éléments de la pile, *comme dans les voltamètres extérieurs*.

Soit une pile dont chaque couple est formé d'une lame de zinc et d'une lame de platine plongeant dans l'eau acidulée, il se produit, pendant le fonctionnement de la pile, une électrolyse de l'eau dans chacun des éléments, comme dans un voltamètre extérieur : l'hydrogène se dégage dans tous les cas sur la *cathode* ou *électrode de sortie* du courant (l'électrode de sortie est l'électrode négative dans le voltamètre, c'est la lame positive dans l'élément) ⁽¹⁾.

L'oxygène de l'eau électrolysée se rend à l'*anode* ou *électrode d'entrée* (lame négative dans l'élément), il oxyde le zinc qui se combine avec l'acide sulfurique pour former du sulfate de zinc. Pour 1 gramme d'hydrogène dégagé il y a 33 grammes de zinc dissous.

Si la pile est formée de plusieurs éléments associés en série, la dépense de zinc est la même dans tous. Avec cinq éléments, il y aura, pour 1 gramme d'hydrogène dégagé dans un voltamètre faisant partie du circuit extérieur, 5 équivalents de zinc ou 5 . 33 grammes de zinc dissous. Avec 10 éléments de pile, il y aura pour 1 gramme d'hydrogène dégagé dans le voltamètre, 10 . 33 grammes de zinc dissous ; la dépense sera double pour un même effet extérieur, mais l'opération sera plus rapide.

En résumé, quand 1 coulomb traverse le circuit, il y a dans chaque élément de pile $\frac{1}{96\,600}$ de gramme d'hydrogène dégagé et $\frac{33}{96\,600}$ de gramme de zinc dissous.

(1) Dans la décomposition des composés métalliques, le métal se dégage comme l'hydrogène sur la *cathode* ou *électrode de sortie*.

ACTIONS SECONDAIRES

945. Les éléments séparés exercent fréquemment sur les électrodes ou sur l'électrolyte des réactions qu'on appelle secondaires. Voici quelques exemples.

Dans la *décomposition du sulfate de cuivre* entre des électrodes de platine, le radical SO^4 isolé à l'électrode positive se complète aux dépens de l'eau à laquelle il emprunte H^2 pour former SO^4H^2 tandis que l'oxygène de l'eau se dégage. Si le métal de l'électrode positive est du cuivre, c'est en dissolvant du cuivre et en reformant du sulfate de cuivre que SO^4 se complète; il n'y a plus alors de dégagement d'oxygène, le cuivre de l'électrode positive appelée *électrode soluble* se dissout en quantité égale au cuivre déposé à l'électrode négative.

La *décomposition de l'eau acidulée* peut aussi s'expliquer par une action secondaire. Quand on remplit un voltamètre d'eau distillée parfaitement pure, le courant ne passe pas et il ne se dégage pas de gaz aux électrodes; l'eau rigoureusement pure n'est donc pas un électrolyte; c'est un isolant comme l'alcool, la benzine. Dans un voltamètre à eau acidulée par l'acide sulfurique, SO^4H^2 paraît décomposé par le courant en H^2 qui va au pôle négatif (électrode de sortie) et SO^4 qui va au pôle positif (électrode d'entrée). Au pôle positif, SO^4 reforme SO^4H^2 en prenant H^2 à l'eau et l'oxygène de l'eau se dégage.

Décomposition d'un sel alcalin. — Une solution de sulfate de soude est renfermée dans un tube en U contenant des électrodes de platine. Lorsque le courant passe, SO^4 se rend au pôle positif et s'y complète en prenant H^2 à l'eau et en dégageant O ; Na^2 va au pôle négatif et y décompose aussi l'eau, prend l'oxygène et dégage l'hydrogène. Il se dégage par conséquent de l'oxygène au pôle positif et de l'hydrogène au pôle négatif; en définitive, de l'*acide sulfurique* apparaît à l'électrode positive et de la *soude* à l'électrode négative. Si l'on a versé du tournesol rose dans chaque branche du tube en U, on voit le

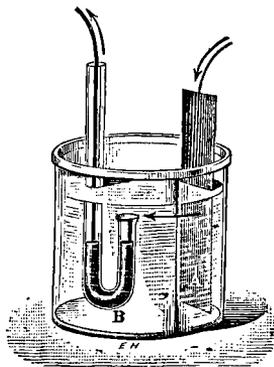


Fig. 781.

tournesol rougir autour de l'électrode positive et bleuir autour de l'électrode négative.

Pour se convaincre que la décomposition n'a pas lieu réellement en acide et base, mais en SO^4 et Na^2 comme pour un sulfate métallique, on fait plonger dans une solution de sulfate de soude un tube recourbé B contenant du mercure auquel aboutit une électrode négative de platine (fig. 781). L'électrode positive est une lame de platine A plongée dans la solution. Le sodium mis en liberté forme avec le mercure en B un amalgame qui ne prendrait pas naissance s'il ne s'y rendait que de la soude. On peut séparer le sodium du mercure par distillation dans un courant de gaz inerte.

POLARISATION DES ÉLECTRODES

946. Formons un circuit comprenant une pile P, un voltamètre V et un galvanomètre G. Un fil conducteur réunit transversalement deux points du circuit. Le circuit peut être interrompu soit en O, soit en O' (fig. 782).

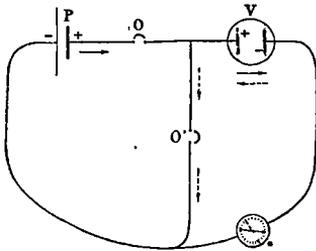


Fig. 782.

1° O est fermé, O' est ouvert; il y a décomposition dans le voltamètre, et l'aiguille du galvanomètre est déviée dans un sens.

2° Après une décomposition de quelques instants, on ouvre O et on ferme O'; la pile n'agit plus; pourtant l'aiguille du galvanomètre est encore déviée, mais en sens contraire. Le voltamètre donne en effet naissance à un courant (*courant secondaire*), de sens opposé au courant de la pile (*courant primaire*). Ce courant du voltamètre diminue peu à peu, puis cesse.

Un voltamètre qui a été traversé par un courant se comporte donc comme une source d'électricité : il a pris deux pôles. En effet, si l'on relie aux plateaux d'un électroscope condensateur (fig. 734) les deux électrodes du voltamètre après que le courant y a passé, il y a charge de l'électroscope, l'électrode hydrogène est négative comme l'électrode zinc d'un élément de pile, l'électrode oxygène est positive. Les électrodes du voltamètre sont dites **polarisées**, elles offrent, en effet, une différence de potentiel comme les deux pôles d'un élément

de pile. Cette différence de potentiel agit comme force électromotrice et produit un courant secondaire dans un circuit fermé.

La force électromotrice E' du voltamètre est opposée à la force électromotrice E de la pile et s'en retranche pendant le passage du courant primaire (O fermé et O' ouvert). La force électromotrice efficace est $E - E'$, et l'intensité du courant qui traverse le voltamètre a pour valeur :

$$I = \frac{E - E'}{R}$$

R résistance totale du circuit (pile, voltamètre, galvanomètre, fils de communication).

947. Calcul d'une force électromotrice de polarisation. — L'existence d'une force électromotrice de polarisation résulte de la chute de potentiel qui accompagne un travail électrique.

Admettons, en généralisant la loi des effet thermiques (933), qu'un travail du courant, quel qu'il soit, a lieu par une chute d'électricité d'un potentiel supérieur à un potentiel inférieur; le travail de décomposition d'un électrolyte sera représenté (comme un travail thermique) par $E'Q = E'It$, E' désignant la chute correspondante de potentiel et $Q = It$ la quantité d'électricité qui passe pour accomplir le travail.

Représentons d'autre part par W la chaleur de décomposition (en calories) d'un équivalent d'un électrolyte; le travail correspondant de décomposition sera en joules $4,17W$.

Puisque, dans un circuit électrique, le travail de décomposition pour un équivalent est toujours produit par 96 600 coulombs, quel que soit l'électrolyte, la hauteur de chute E' , devra varier avec W , puisqu'on doit avoir :

$$E' 96\ 600 = 4,17W$$

$$\text{Dans le cas de l'eau, } W = 34\ 500,$$

$$E' = \frac{4,17 \cdot 34\ 500}{96\ 600} = 1,49.$$

Pour qu'il y ait électrolyse, la force électromotrice E de la pile qui fournit le courant ne peut pas être inférieure à E' . La force électromotrice E d'un élément est le travail en joules que produit un coulomb en traversant le circuit de cet élément. La force électromotrice E' d'un appareil à décomposition est le travail en joules que doit produire un coulomb en le traversant pour que la décomposition ait lieu.

E doit donc être supérieur à E' . Pour cette raison, un seul élément Daniell ($E = 1^v,1$) ne peut décomposer l'eau ($E' = 1^v,49$), mais un seul élément Bunsen suffit ($E = 1^v,9$).

Pendant le passage du courant, le liquide du voltamètre offre par lui-même une résistance qui donne lieu à une chute de potentiel e' indépendante de la chute de polarisation E' . C'est la somme $E' + e'$ qu'indique un électro-

mètre si les deux paires de quadrants communiquent avec les deux bornes du voltamètre pendant le passage du courant.

948. Résistance d'une solution saline. — La décomposition d'un sel entre deux électrodes de même métal que le sel ne donne lieu à aucun travail, puisque la solution conserve sa richesse, le métal dissous à l'électrode positive ayant le même poids que le métal déposé à l'électrode négative (945);

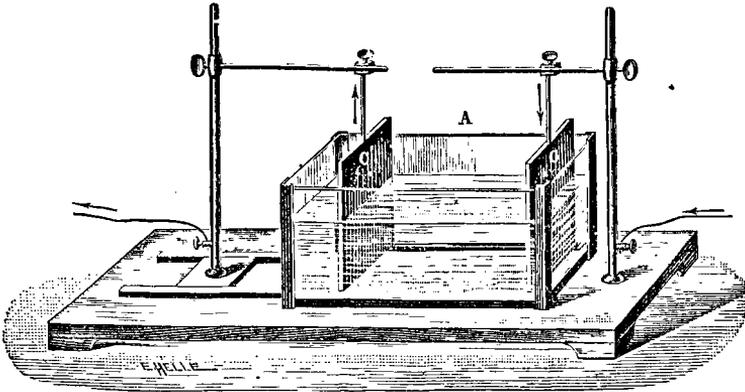


Fig. 783.

il n'y a pas dans ce cas de force électromotrice de polarisation. Tout le travail se réduit à vaincre la résistance du liquide.

D'après cela, on pourra mesurer la résistance r d'une *solution saline* intercalée entre deux *électrodes de même métal* C et C' que le sel par les méthodes employées pour les métaux eux-mêmes. Si la solution est placée dans un vase cylindrique ou prismatique A (fig. 783) dont la longueur et la section sont aisées à évaluer, la relation $r = \rho \frac{l}{s}$ permettra de calculer la résistance spécifique ρ (résistance en ohms d'un centimètre cube de la solution.)

APPLICATIONS DE L'ÉLECTROLYSE

949. Préparation des métaux alcalins. — Les alcalis et les oxydes terreux passèrent pour indécomposables jusqu'au moment où Davy appliqua le courant de la pile à la décomposition de la potasse et isola ainsi le *potassium*.

Décomposition de la potasse. — Un fragment P d'hydrate de potasse humide est placé sur une lame de platine AB communiquant avec le pôle positif d'une forte pile (fig. 784); dans une cavité creusée à la partie supérieure de la potasse et contenant du mercure M, on plonge un fil de platine N relié au pôle négatif de la pile.

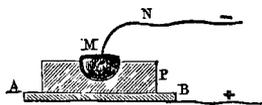


Fig. 784.

Le circuit étant fermé, il se dégage de l'oxygène sur l'électrode positive de platine. Le potassium mis en liberté à l'électrode négative s'allie au mercure avec lequel il forme un amalgame. Cet amalgame donne le potassium par distillation du mercure.

On obtient le *calcium*, le *magnésium*, l'*aluminium* en employant comme électrolytes les chlorures de ces métaux rendus conducteurs par fusion et en y plongeant des électrodes de charbon.

950. Galvanoplastie. — La galvanoplastie a pour objet de déposer par électrolyse sur une surface servant de moule une couche de cuivre. Nous allons supposer qu'il s'agit de reproduire le relief d'un objet.

Préparation d'un moule. — On forme un moule en creux de l'objet à reproduire : avec du plâtre, du soufre, de la cire ou mieux de la gutta-percha ramollie dans de l'eau tiède et appliquée avec pression sur l'objet. On détache le moule après refroidissement et on le rend conducteur du courant en l'enduisant avec une brosse fine d'une couche de plombagine en poudre impalpable.

Dépôt de cuivre sur le moule. — On suspend le moule M dans un bain saturé de sulfate de cuivre, légèrement acidulé par de l'acide sulfurique et on le relie métalliquement au pôle négatif d'une pile; une plaque de cuivre E qui plonge dans le bain communique avec le pôle

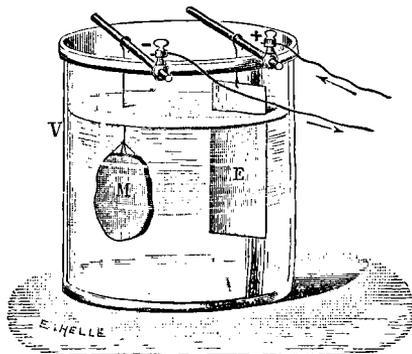


Fig. 785.

positif de la pile (fig. 785). Le circuit étant fermé, le sulfate est décomposé, le cuivre se dépose sur le moule à la *cathode* et le recouvre dans tous ses détails, tandis que l'acide sulfurique et l'oxygène vont dissoudre sur l'*électrode soluble (anode)* un poids égal à celui du dépôt (945). Le bain reste ainsi saturé, malgré le dépôt qui se fait sur le moule, et le courant est constant. Un courant trop fort donne un dépôt pulvérulent et cassant, un courant trop faible donne un dépôt cristallin. L'épaisseur du dépôt est proportionnelle à la durée de l'opération; on le détache quand il est assez épais.

Un coulomb met en liberté $\frac{31^{\text{er}},5}{96600}$ de cuivre. La masse de cuivre déposée en une heure par un courant d'un ampère est

$$\frac{31,5 \cdot 3600}{96600} = 1^{\text{er}}19.$$

Appareil simple. — On donne le nom d'appareil simple à une disposition qui n'est autre qu'une pile de Daniell. Dans une cuve en verre contenant une solution de sulfate de cuivre maintenue saturée par des cristaux, on place plusieurs vases poreux renfermant chacun de l'eau acidulée et une lame de zinc. Les lames de zinc réunies par une tringle forment le pôle négatif de la pile. Elles sont reliées par un fil conducteur à une autre tringle soutenant les moules plongés dans le sulfate de cuivre. Le courant va dans la pile du zinc au moule qui forme la *cathode* sur laquelle le cuivre se dépose.

Applications industrielles de la galvanoplastie. — Ces applications sont nombreuses. C'est ainsi que pour préserver de l'oxydation les candélabres et les ornements en fonte des voies publiques, on les recouvre d'une couche de cuivre.

Les bois gravés ne supporteraient pas longtemps sans déformation la pression des tirages : on les remplace par des *clichés galvaniques* obtenus en cuivrant un moule du dessin gravé; ces clichés sont plus résistants et l'on peut d'ailleurs les renouveler. Les clichés galvaniques servent aussi pour le tirage des timbres-poste.

950. Dorure, argenture, nickelage. — On a recours à l'électrolyse pour déposer une mince couche *adhérente* d'un métal précieux (or, argent) ou peu oxydable (nickel) sur un métal altérable.

La pièce à recouvrir est d'abord chauffée fortement pour détruire les matières grasses qui peuvent la recouvrir, décapée en la plongeant chaude dans un acide qui dissout l'oxyde, puis lavée à l'eau et séchée dans de la sciure de bois chaude.

Elle est ensuite suspendue à la cathode dans un bain à réaction alcaline. Pour la dorure et l'argenture, ce bain est du cyanure d'or ou d'argent dissous dans du cyanure de potassium ; pour le nickelage, c'est une dissolution de sulfate double de nickel et d'ammoniaque. L'anode est une électrode soluble du métal à déposer.

Au sortir du bain, la pièce est mate ; on lui donne du brillant par le brunissage, c'est-à-dire par le frottement avec une pierre d'agate arrondie, sertie dans un manche en bois.

951. Électrométallurgie. — La préparation industrielle de certains métaux est obtenue par l'électrolyse. On prépare l'aluminium en électrolysant du fluorure double d'aluminium et de sodium en fusion.

Affinage du cuivre. — L'électrolyse peut être appliquée à la préparation des métaux purs. Pour obtenir du cuivre pur, on prend comme électrode positive dans un bain de sulfate de cuivre une plaque de cuivre contenant plus de 95 pour 100 de cuivre et, par le courant on transporte le métal sur une électrode négative formée d'une lame mince de cuivre pur. Les métaux étrangers tombent au fond du bain. On prépare ainsi de larges plaques de cuivre très pur.

CONSTRUCTION DES ÉLÉMENTS DE PILE

952. Zinc amalgamé. — Le zinc est celui des métaux usuels qu'on emploie avec le plus d'avantage comme métal négatif dans les piles. Mais le zinc commercial est attaqué par l'eau acidulée *même à circuit ouvert* ; il contient en effet des métaux étrangers, tels que le plomb, l'arsenic, et il se forme à sa surface des couples locaux. Chaque grain moins attaqué que le zinc devient en effet le pôle positif d'un élément et le zinc voisin le pôle négatif ; de là une usure du zinc et une transformation sur place, en pure perte, d'énergie chimique en chaleur.

Le zinc amalgamé, *comme le zinc pur*, se dissout difficilement dans l'eau acidulée, et l'usure à circuit ouvert est presque nulle ; il n'y a alors dépense de zinc qu'à circuit fermé, *et il ne se dégage pas d'hydrogène sur le zinc*.

On amalgame le zinc en décupant soigneusement sa surface avec de l'eau acidulée par de l'acide sulfurique et en le frottant ensuite avec du mercure. On renouvelle l'opération quand le zinc de la couche amalgamée a été dissous par le courant. Le mercure de l'amalgame tombe au fond de l'élément sans prendre part aux actions chimiques de la pile.

953. Affaiblissement du courant d'un élément de Volta. —

Un élément de Volta, quelle que soit sa forme, donne un courant dont l'intensité s'affaiblit rapidement : la déviation d'un galvanomètre placé dans son circuit décroît peu à peu après la fermeture du circuit. *Cela tient surtout à une diminution de la force électromotrice.*

Diminution de force électromotrice par la polarisation du cuivre.

— Par suite de la décomposition de l'eau qui accompagne le fonctionnement de l'élément, la lame de cuivre (électrode de sortie) se couvre de bulles d'hydrogène, élément oxydable qui diminue la force électromotrice. La différence de potentiel de l'élément, mesurée peu après le début du fonctionnement, est en effet notablement inférieure à la valeur initiale.

A circuit ouvert, la lame de cuivre se dépolarise lentement, et la force électromotrice remonte peu à peu.

Accroissement de résistance par la formation de sulfate de zinc. —

Le zinc dissous par l'acide sulfurique se transforme en sulfate de zinc qui remplace l'acide sulfurique et augmente ainsi la résistance de l'élément. Cette seconde cause d'affaiblissement est toutefois bien moins importante que l'autre, et elle ne se fait pas sentir immédiatement.

Diminution de force électromotrice par dépôt de zinc sur le cuivre.

— Lorsque l'élément a servi quelque temps, le sulfate de zinc est électrolysé, et le zinc qui se dépose sur le cuivre (électrode de sortie) cause une nouvelle réduction de la force électromotrice.

954. Dépolarisation de la plaque positive. — On évite la polarisation du cuivre en se débarrassant du dépôt d'hydrogène à mesure qu'il se forme.

Dépolarisation mécanique. — On peut opérer mécaniquement en agitant le liquide au pôle positif ou en brossant la lame positive. On peut encore couvrir la lame positive d'aspérités par un dépôt électro-

laquelle est accolé un mélange dépolarisant de peroxyde de manganèse et de charbon agglomérés. En circuit fermé, AzH^4Cl se décompose en Cl à l'électrode d'entrée, AzH^3 et H à l'électrode de sortie. Il y a formation de chlorure de zinc au pôle négatif ; au pôle positif, l'hydrogène réduit le peroxyde de manganèse à l'état de sesquioxyde, AzH^3 se dégage. Le peroxyde de manganèse cède son oxygène plus lentement qu'un dépolarisant liquide ; aussi cette pile ne convient-elle pas pour des courants continus intenses. Force électromotrice 1,46. Cet élément est très employé pour le fonctionnement intermittent des sonneries électriques.

956. Piles constantes à deux liquides séparés. — La lame positive est placée dans un vase poreux contenant le liquide dépolarisant.

Élément Daniell (fig. 788). — C'est l'élément le plus constant.

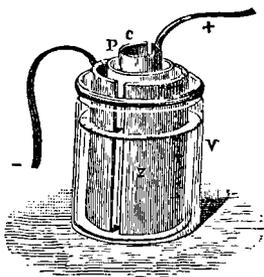


Fig. 788.

Description. — Le pôle négatif est un cylindre creux de zinc fendu longitudinalement et placé dans une dissolution saturée de sulfate de zinc. Le pôle positif est une lame de cuivre plongeant dans une solution saturée de sulfate de cuivre, contenue dans un cylindre de porcelaine poreuse. Le vase poreux est facilement traversé par l'électricité, car il se laisse pénétrer par les liquides tout en s'opposant à leur mélange.

Réaction pendant le fonctionnement. — En circuit ouvert, il n'y a pas d'action chimique. Quand le circuit est fermé, les liquides sont électrolysés. Le sulfate de zinc est décomposé en SO^4 qui se porte sur le pôle zinc (anode), et en zinc qui se porte vers le cuivre (cathode). Le sulfate de cuivre est décomposé en SO^4 qui se porte vers le pôle zinc et forme du sulfate de zinc avec le zinc devenu libre qu'il rencontre et en cuivre qui se dépose sur le pôle cuivre.

Il disparaît un équivalent de sulfate de zinc et un équivalent de sulfate de cuivre, il y a d'autre part deux équivalents de sulfate de zinc formés ; en définitive, la formation d'un équivalent de sulfate de zinc accompagne la réduction d'un équivalent de sulfate de cuivre. Il y a un équivalent de zinc dissous et un équivalent de cuivre déposé. Le zinc s'use et le cuivre augmente d'épaisseur. La solution de sulfate de cuivre s'épuise ; elle est maintenue saturée avec des cristaux.

Constantes de l'élément. — L'élément Daniell à sulfates a pour force électromotrice 1^r,1. La pile Daniell ne convient pas pour les forts courants à cause de sa grande résistance ; elle est très employée en télégraphie (1001).

Élément Bunsen. — *Description.* — Le pôle négatif *n* est fixé sur un cylindre *Z* de zinc amalgamé placé dans un bocal en grès contenant de l'eau acidulée sulfurique au $\frac{1}{10}$ (eau acidulée préparée avec l'acide sulfurique au soufre). Au centre du bocal un cylindre *V* en

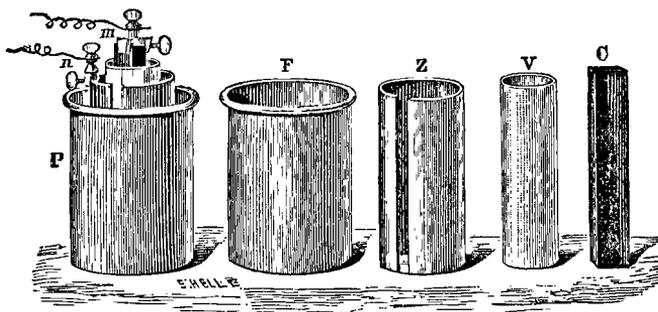


Fig. 789.

porcelaine poreuse renferme un prisme de charbon de cornue *C* qui plonge dans l'acide nitrique fumant (fig. 789). La borne *m* fixée au charbon est le pôle positif.

Réactions pendant le fonctionnement. — A circuit fermé, l'eau acidulée est décomposée en SO^4 et H^2 , l'acide azotique en O et AzO^2 ; SO^4 dissout le zinc sur lequel il se porte, H s'unit à l'oxygène et AzO^2 se dégage.

Le dégagement de vapeurs nitreuses est un inconvénient de la pile Bunsen. On le supprime en remplaçant l'acide azotique par une dissolution d'acide chromique qui cède son oxygène à l'hydrogène.

Constantes de l'élément. — La force électromotrice est égale à 1^r,9. La résistance intérieure est faible. C'est la pile qui convient le mieux pour les courants intenses.

ORIGINE DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE D'UNE PILE

957. La connaissance des réactions chimiques d'un élément de pile fait voir que ces réactions sont **exothermiques** ou dégagent de la chaleur. Dans un appareil à décomposition électrolytique, les réactions sont **endothermiques** ou absorbent de la chaleur.

On a démontré expérimentalement que c'est à la chaleur W que les réactions chimiques d'une pile laissent disponible ou à l'énergie chimique JW qu'est empruntée l'énergie distribuée par le courant lorsque le circuit est formé.

(Pour faire cette démonstration, Favre a enfermé un élément de Volta dans un calorimètre et a mesuré dans quatre conditions différentes la quantité de chaleur dégagée pendant la dissolution de 33 grammes de zinc.

Première expérience. — On mesure dans le calorimètre le nombre de calories W que dégage la dissolution du zinc par l'eau acidulée sulfurique dans l'élément à circuit ouvert.

Deuxième expérience. — Après avoir réuni les deux pôles par un fil fin de platine, on mesure le nombre de calories dégagées à circuit fermé, l'élément et le fil de platine étant contenus à la fois dans le même calorimètre. On trouve le même nombre W que dans la détermination précédente.

Troisième expérience. — On mesure séparément la chaleur w dégagée dans l'élément placé seul dans le calorimètre, et la chaleur w' dégagée dans le fil placé à son tour seul dans le calorimètre; on trouve $w + w' = W$.

Quatrième expérience. — Le courant produit un autre travail qu'un travail calorifique; par exemple, le courant traverse un moteur qui soulève un poids (1028). La chaleur w_1 dégagée dans le circuit est alors moindre que s'il ne se produisait pas de travail mécanique; mais la chaleur w_1 , ajoutée à la chaleur w'_1 équivalente au travail accompli donne encore la même somme W .

Il résulte de ces expériences que la quantité de chaleur accusée au calorimètre pendant la dissolution de 33 grammes de zinc, par exemple, est la chaleur dégagée dans le circuit; elle est précisément égale à la chaleur qui correspond uniquement aux réactions chimiques produites dans l'élément. Le dégagement de chaleur dans les conducteurs est rigoureusement complémentaire de la chaleur qui est retenue dans la pile. Une partie de la chaleur due aux réactions chimiques est donc transportée dans le circuit extérieur; il y a transport d'énergie par le courant.

On voit enfin qu'un travail quelconque réalisé dans le circuit par le courant emprunte à la chaleur chimique totale une partie équivalente à ce travail.)

958. Rôle industriel d'une pile. — La pile est un appareil qui consomme de l'énergie chimique et la transforme en énergie électrique. Cette *énergie électrique* n'est qu'un intermédiaire, elle est répartie sous différentes formes dans le circuit : énergie *thermique* dans l'échauffement des conducteurs, énergie *chimique* dans les décompositions électrolytiques, énergie *mécanique* dans les moteurs électriques, etc.

Comparaison d'une pile et d'une machine à vapeur. — Dans une machine à vapeur, on utilise la combustion du charbon, et on convertit une énergie chimique en énergie mécanique. Dans une pile, on utilise la combustion du zinc, et on convertit une énergie chimique en diverses énergies par l'intermédiaire du courant ou de l'énergie électrique.

Une machine à vapeur n'a qu'un rendement très faible (523); le rendement d'une pile peut devenir très voisin de l'unité par le ralentissement du courant (937). Toutefois, le prix élevé des produits consommés par une pile et en particulier du zinc a empêché jusqu'ici les piles d'être aussi économiques que les machines à vapeur.

(959. Calcul de la force électromotrice d'un élément de pile. — Si la totalité de l'énergie chimique disponible dans un élément est convertie en énergie électrique dans son circuit, on peut calculer la force électromotrice de l'élément.

Calcul pour l'élément Daniell. — Dans l'élément Daniell (956), il y a substitution d'un équivalent de zinc à un équivalent de cuivre; la chaleur rendue disponible par cette substitution est de 25 300 calories : c'est la différence entre les chaleurs de dissolution du zinc et du cuivre dans l'acide sulfurique (53 500 — 28 200); le travail correspondant en joules est

$$4.17.25300.$$

D'autre part, l'énergie électrique du courant qui accompagne ces réactions est E.96600, puisqu'il passe 96600 coulombs par équivalent de zinc dissous,

$$\text{On aura } E.96600 = 4,17.25300$$

$$\text{d'où } E = 1,08.$$

Applications. — 1° Quelle serait l'intensité d'un courant qui décomposerait 1 gramme d'eau en une seconde?

2° Quelle est l'intensité du courant qui dépose 1 gramme d'argent en 5 minutes?

3° Combien de temps faut-il à un courant d'un ampère pour déposer 1 gramme d'argent?

4° Quel est le poids d'argent déposé en une minute d'une solution de nitrate d'argent, le courant étant de deux ampères?

5° Une pile dépose en 2 heures 9^m54^s d'argent d'une solution d'azotate d'argent. Quelle est l'intensité du courant en ampères?

6° Une pile de cinq éléments Daniell associés en série est reliée à un voltamètre à sulfate de cuivre dans lequel 40 grammes de cuivre sont déposés en une heure. Combien y aura-t-il de cuivre déposé et de zinc dissous dans la pile dans le même temps? Équivalent du cuivre, 31,5; équivalent du zinc, 33.

7° Quel poids de zinc faut-il dépenser pour produire pendant une heure un travail de 10 kilogrammètres : 1° avec un élément Bunsen de force électromotrice 1v,9; 2° avec un élément Daniell de force électromotrice 1v,1?

8° Deux plaques de cuivre de même surface sont plongées parallèlement et en regard dans une solution de sulfate de cuivre. Quand les plaques sont distantes de 20 centimètres, l'intensité du courant est la même que lorsqu'elles sont distantes de 17,5 centimètres, avec une résistance additionnelle de 10 ohms dans le circuit. Quelle est la résistance spécifique du liquide? La surface plongée de chacune des plaques est 25 centimètres carrés.

9° Combien peut-on décomposer d'eau avec un cheval-vapeur en une heure? on prendra pour force électromotrice de polarisation de l'eau 1,5 volts.

PILES SECONDAIRES

960. Dans l'expérience qui nous a servi à démontrer la polarisation (fig. 782), le courant secondaire du voltamètre dure peu. En maintenant les électrodes en contact avec les éléments de l'eau, on obtient un courant qui peut persister beaucoup plus longtemps.

Pile à gaz. — Un élément de cette pile est un voltamètre dont les électrodes en platine E et E' sont fixées au sommet des éprouvettes et pendent dans le liquide. Elles reçoivent le courant par de petits godets à mercure g. Les éprouvettes sont remplies d'eau acidulée qui est décomposée par le passage du courant (fig. 790). Lorsque les éprouvettes contiennent une quantité de gaz suffisante, on supprime le courant primaire et on relie les deux électrodes par un conducteur qui réunit le sommet des éprouvettes. Il se produit un courant *secondaire* de sens contraire au courant *primaire* qui a produit l'électrolyse, et les gaz disparaissent lentement en reformant de l'eau. Le courant cesse quand les gaz ont disparu.

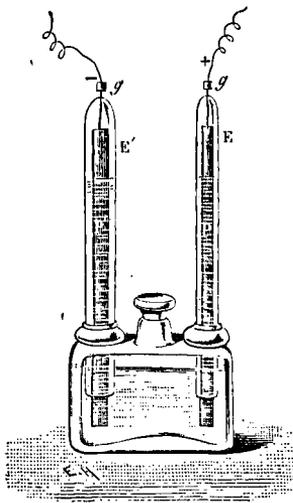


Fig. 790.

En associant plusieurs voltamètres semblables, on forme une *pile à gaz*. Les éléments de cette pile sont réunis en série si l'électrode hydrogène de l'un est reliée à l'électrode oxygène du suivant. Quand

on emploie le courant secondaire d'une pile à gaz à décomposer l'eau dans un voltamètre extérieur : pour 1 gramme d'hydrogène dégagé dans le voltamètre extérieur, il disparaît 1 gramme d'hydrogène dans chacun des éléments de pile, conformément à la loi de l'action chimique (944).

(961. **Accumulateurs.** — Les accumulateurs sont des voltamètres à *électrodes de plomb* qui peuvent fournir un courant secondaire de longue durée. Ils se comportent comme s'ils emmagasinaient une grande quantité d'électricité (par exemple 20 000 coulombs par kilogramme de plomb), et *jouent pratiquement le rôle de condensateurs de très grande capacité.*

Formation. — Par le passage du courant primaire ou *courant de charge*, l'eau acidulée de l'accumulateur est décomposée, l'oxygène se porte sur la plaque positive et y forme du peroxyde de plomb brun, qui reste adhérent et qui est insoluble dans l'acide sulfurique étendu; la plaque négative condense d'abord de l'hydrogène, puis ce gaz se dégage. Après quelque temps, la plaque positive est protégée par le peroxyde et l'oxygène se dégage également.

La plaque peroxydée est positive par rapport à la plaque hydrogénée qui est négative et si l'on vient à réunir ces deux plaques après avoir supprimé le courant primaire, il se produit un courant secondaire, inverse du courant de charge; pendant ce courant l'oxygène se porte sur la plaque négative pour l'oxyder et l'hydrogène sur la plaque positive (électrode de sortie) où il ramène le bioxyde à l'état de plomb métallique. Le courant cesse quand les deux électrodes sont redevenues semblables.

Les éléments secondaires au plomb s'améliorent par l'usage. Par des charges et des décharges successives, les surfaces des électrodes deviennent poreuses et permettent aux actions chimiques d'avoir lieu profondément. La durée des charges et des décharges augmente, et par suite le débit électrique.

On *réduit le temps de formation* des éléments en emprisonnant des oxydes de plomb dans des alvéoles pratiquées dans les plaques qui servent d'électrodes (électrodes à grilles) (fig. 791). Une plaque est ainsi formée d'une partie active soutenue par une carcasse inactive que constitue un alliage de plomb et d'antimoine⁽¹⁾.

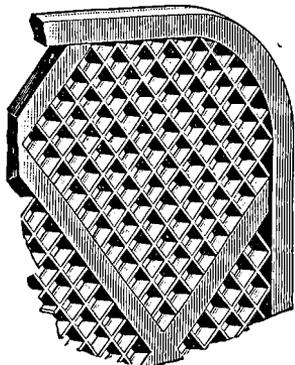


Fig. 791.

(1) Les figures 791 et 792 se rapportent à un élément Faure-Sellon-Voelckmar.

Pour supprimer les soudures, les plaques sont fabriquées par *paires*. Chaque paire comprend une plaque positive et une plaque négative réunies

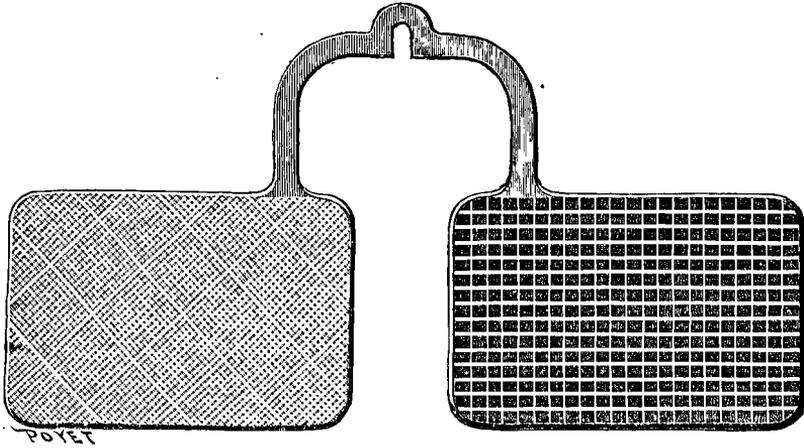


Fig. 792.

par un pont (fig. 792). Les éléments d'une pile d'accumulateurs groupés en série sont placés bout à bout : les plaques positives du premier élément sont

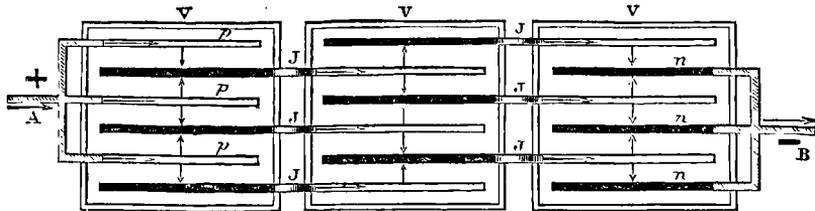


Fig. 793.

reliées aux négatives du deuxième, les positives du deuxième aux négatives du troisième...; les négatives n du premier et les positives p du dernier élément constituent les pôles (fig. 793).

La force électromotrice d'un accumulateur à lames de plomb, chargé, est un peu supérieure à deux volts ; par le rapprochement des lames et leur grande surface on rend la *résistance intérieure très faible*. Ils conservent leur charge sans grande perte, quand leur circuit est ouvert, et, même quand un temps assez long sépare la charge et la décharge, un accumulateur peut débiter pendant la décharge un nombre de coulombs qui n'est pas très éloigné de celui qu'il a reçu pendant la charge.

Les accumulateurs s'associent comme des éléments de pile, soit en série, soit en surface. Après avoir chargé *séparément* et successivement un certain nombre d'accumulateurs avec deux éléments Bunsen, on peut les grouper *en série* de façon à avoir une force électromotrice bien supérieure à celle de la pile qui a servi à les charger. C'est ainsi que 30 accumulateurs chargés *séparément* et successivement avec une force électromotrice inférieure à 3 volts permettent de former une pile dont la force électromotrice dépassera 60 volts ⁽¹⁾.

Les accumulateurs sont très employés dans l'industrie, pour l'éclairage et pour la traction.

Mode de fonctionnement d'un accumulateur. — Un accumulateur est assimilable à un condensateur pour le rôle *pratique* qu'il joue, mais il s'en distingue en ce que ses électrodes *n'emmagasinent pas directement l'électricité*.

Pendant la charge, l'accumulateur *fonctionne comme voltamètre*, des réactions chimiques absorbant de la chaleur sont effectuées par le courant primaire, et des produits chimiques se déposent sur les électrodes. L'énergie électrique du courant de charge s'emmagasine dans l'accumulateur sous la forme d'énergie potentielle chimique.

Pendant la décharge, des réactions chimiques inverses des premières dégagent de la chaleur qui est distribuée sous forme d'énergie électrique dans le circuit du courant secondaire. L'accumulateur fonctionne dans ce cas *comme élément de pile*, et les produits déposés pendant la charge sur ses plaques polaires disparaissent graduellement. Dans la décharge, l'énergie chimique se transforme en énergie électrique.

Certains éléments de pile peuvent offrir la *réversibilité* des accumulateurs. Prenons un élément Daniell à sulfates qui a servi longtemps et dont le zinc a diminué tandis que l'épaisseur du cuivre s'est accrue. Faisons-y passer un courant de sens opposé au sien, de force électromotrice plus grande, le sulfate de zinc formé est réduit, et le métal zinc se dépose sur le zinc tandis que le cuivre est dissous. Les métaux constitutifs de l'élément sont ainsi régénérés par l'électrolyse au lieu d'être remplacés directement. Ayant supprimé le courant de charge, si l'on réunit les pôles, l'élément fonctionne de nouveau dans le sens direct : le zinc déposé par électrolyse se dissout et le cuivre dissous se dépose.)

(1) On charge une pile d'accumulateurs avec une source électrique qui doit présenter à ses deux pôles *au moins autant de fois 2,5 volts* qu'il y a dans la pile d'accumulateurs disposés en série (926, I).

PILES THERMO-ÉLECTRIQUES

962. La chaleur dégagée par les actions chimiques n'est pas le seul moyen d'entretenir un courant, l'action directe de la chaleur permet d'arriver au même résultat. C'est le cas des courants thermo-électriques.

Dans un circuit formé d'un conducteur unique *parfaitement homogène*, on peut chauffer l'un quelconque des points sans qu'il se produise de courant électrique.

Dans un *circuit formé de différents métaux à la même température*, il ne se produit aucun courant (897), mais un courant prend naissance dès qu'on chauffe un des points de contact.

963. Expérience de Seebeck. — Soit un circuit formé d'un barreau de bismuth BB' soudé à une lame d'antimoine AA' qui forme avec lui un rectangle. On dirige les longs côtés du rectangle dans le

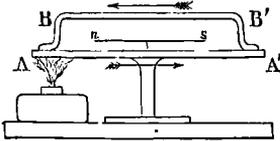


Fig. 794.

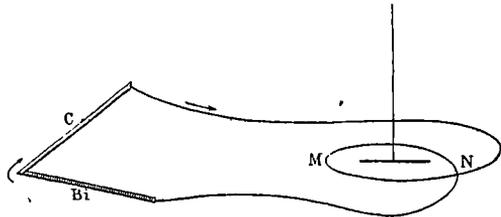


Fig. 795.

méridien magnétique après avoir placé à l'intérieur une aiguille aimantée mobile sur un pivot (fig. 794).

Si l'on chauffe légèrement l'une des deux soudures A avec une lampe à alcool, une déviation de l'aiguille indique l'existence d'un courant qui va du bismuth à l'antimoine à travers la soudure chaude. Si l'on avait refroidi la même soudure avec de la glace, il se serait produit un courant de sens inverse.

On peut encore faire l'expérience en soudant à un barreau de bismuth un fil de cuivre qui vient s'enrouler sur le cadre d'un galvanomètre (fig. 795). Le courant, allant du bismuth au cuivre à travers la

soudure chaude, parcourt le circuit extérieur dans le sens CNM; le cuivre est dit *positif* par rapport au bismuth.

Le sens du courant dépend de la nature du couple thermo-électrique, c'est-à-dire des deux métaux associés.

Un couple thermo-électrique est un couple à *courant constant*, car l'intensité du courant reste invariable si les deux soudures sont maintenues à des températures différentes, mais fixes.

964. Pile thermo-électrique. — On forme une pile thermo-électrique avec un certain nombre de couples groupés *en série* en reliant le pôle positif du premier au pôle négatif du second, le pôle positif du deuxième au pôle négatif du troisième, etc... On réunit le pôle positif du dernier au pôle négatif du premier par un fil qui ferme le circuit.

Si l'on chauffe à T^0 les soudures de rang pair, en maintenant froides, par exemple à 0^0 , les soudures de rang impair, on obtient un courant égal à la somme des courants des différents couples, car les courants partiels sont tous de même sens.

Les éléments ayant été ainsi associés en série, l'intensité du courant est donnée par la formule :

$$I = \frac{nE}{n\lambda + r}$$

E est la force électromotrice d'un couple, nE la force électromotrice de la pile que nous supposons formée de n couples identiques, λ est la résistance intérieure d'un élément de pile, et r la résistance extérieure (926, I).

La résistance intérieure est négligeable pour des couples formés de barreaux métalliques gros et courts; on a sensiblement dans ce cas $I = \frac{nE}{r}$, l'intensité varie alors en raison inverse de la résistance du circuit extérieur.

Les *forces électromotrices thermoélectriques* sont très faibles. La force électromotrice d'un élément Daniell est 180 fois plus grande que celle d'un élément bismuth-cuivre dont les soudures sont à 100^0 et 0^0 .

Une pile thermoélectrique est donc une pile de petite résistance intérieure et de faible force électromotrice. Son courant ne peut être employé pour surmonter de grandes résistances; l'interposition d'une petite colonne liquide l'annule presque, et il faudrait un très grand nombre d'éléments pour décomposer l'eau. Toutefois, d'après l'équa-

tion $I = \frac{nE}{r}$, si la résistance extérieure est elle-même très faible, les courants peuvent être intenses.

En raison du grand affaiblissement de l'intensité que causerait la résistance d'un fil long et fin, le cadre des galvanomètres employés pour l'étude des courants thermoélectriques ne doit être recouvert que d'un petit nombre de tours de gros fil (983).

965. Lois des forces électromotrices. — 1° *Loi des températures successives.* — Pour un couple donné, la force électromotrice obtenue en portant l'une des soudures à T^0 et l'autre à T'^0 est la somme des forces électromotrices obtenues en portant les soudures à T et à t (la première à T et la deuxième à t), puis à t et T' (la première à t et la deuxième à T'); t étant une température comprise entre T et T' .

2° *Loi des métaux intermédiaires.* — Deux métaux M et M_1 étant en contact direct par une de leurs extrémités, si les autres extrémités A et B

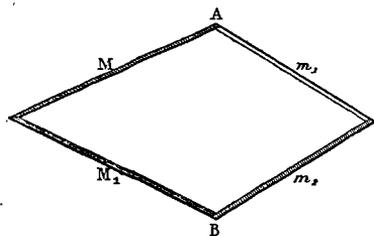


Fig. 796.

de ces métaux M et M_1 sont séparées par plusieurs métaux m_1 et m_2 portés à la même température T que A et B (fig. 796), la force électromotrice est la même que si les deux extrémités A et B se touchaient directement, le contact en A et B étant maintenu à T^0 . Il résulte de là qu'une soudure interposée entre deux métaux est sans effet sur la force électromotrice du couple.

3° *Loi analogue à la loi de Volta.* — Soient plusieurs couples distincts dont les soudures sont maintenues aux mêmes températures T et T' . Désignons par $E_{A|B}$ la force électromotrice du couple A et B ; en mesurant les électromotrices pour trois couples, A et B , A et C , B et C , on vérifie une loi analogue à la loi de Volta.

$$E_{B|C} = E_{B|A} + E_{A|C}$$

D'après cette relation, pour obtenir les forces électromotrices des divers couples, il suffit de les mesurer pour les couples que l'on peut former avec un même corps A .

4° *Variation avec la différence des températures.* — La force électromotrice pour un couple déterminé dépend de la différence des températures des deux soudures et de leur valeur absolue. Pour des températures très peu écartées, elle est sensiblement proportionnelle à leur différence.

Phénomène de l'inversion. — Le courant n'augmente pas dans tous les cas d'une façon continue quand on élève la température de la soudure chaude. Ainsi, avec un couple fer-cuivre, le courant est maximum quand la

soudure chaude atteint 274°; pour une température plus élevée et croissante, le courant décroît, devient nul et enfin change de sens.

Il y a une température d'inversion pour chaque couple thermoélectrique.

MESURE DES TEMPÉRATURES

Les piles thermoélectriques ont été appliquées à la mesure des températures.

966. Thermomultiplicateur. — La pile thermoélectrique de Melloni, utilisée en chaleur rayonnante (458) pour la mesure des faibles différences de température, est formée par une chaîne de barreaux de bismuth alternant avec des barreaux d'antimoine; elle comprend dans son circuit un galvanomètre de *faible résistance* (983). Les soudures de même parité sont placées d'un même côté (fig. 797). Quand on fait tomber un faisceau calorifique sur l'une des faces de la pile, par exemple sur les soudures paires, les soudures impaires restant maintenues à une température uniforme, il se produit un courant dont la force électromotrice est proportionnelle à la différence de température des deux faces de la pile, et l'aiguille

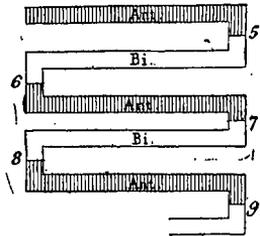


Fig. 797.

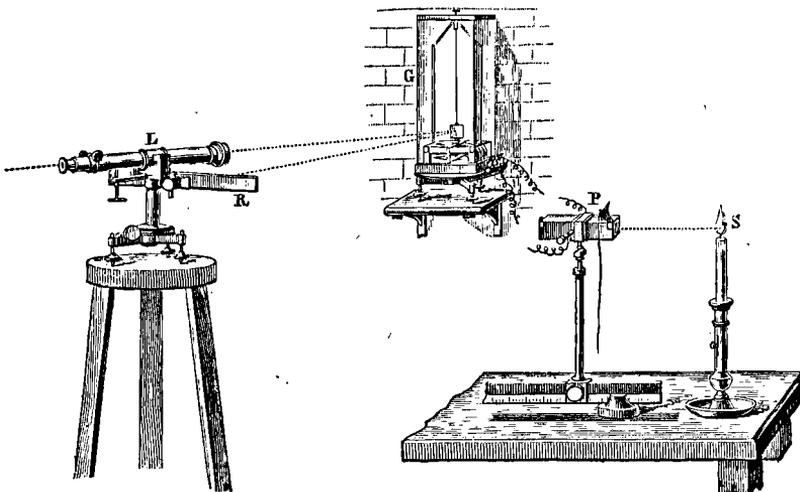


Fig. 798.

du galvanomètre est déviée. Si la déviation ne dépasse pas un petit nombre de degrés, elle est proportionnelle à la différence de température, on l'évalue par la méthode de la réflexion (fig. 798).

967. Pince thermoélectrique. — Une pince thermoélectrique est un système de deux couples thermoélectriques *bismuth-antimoine* disposés *en série* de façon que le point dont on veut mesurer la température θ soit placé entre deux soudures de même parité. La déviation de l'aiguille du galvanomètre placé dans le circuit mesure $\theta - t$, t étant la température à laquelle restent les soudures qui ne comprennent pas le corps chaud MN (fig. 799).

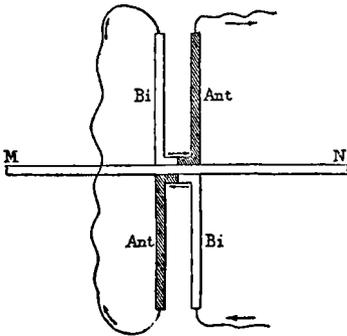


Fig. 799.

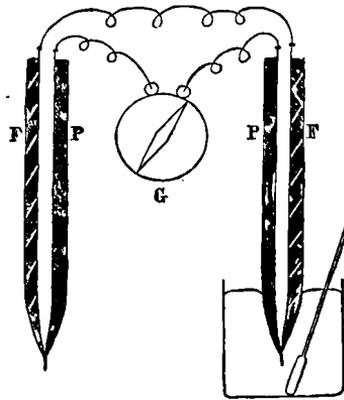


Fig. 800.

Aiguilles thermoélectriques. — Ces aiguilles, employées surtout pour l'étude de la chaleur animale, sont formées de deux soudures thermoélectriques, *fer-maillechort*, dont les courants *s'opposent* (fig. 800). L'une des soudures est placée dans le milieu dont on cherche la température, l'autre soudure est plongée dans un bain dont on fait varier la température jusqu'à ce que l'aiguille d'un galvanomètre G placé dans le circuit reste au zéro. La température cherchée est alors égale à la température du bain.

Pyromètre électrique. — Cet appareil, destiné à la mesure des hautes températures, consiste en un circuit comprenant un galvanomètre et un couple *platine-platine rhodié* ($\frac{1}{10}$ de rhodium), dont l'une des soudures A est portée dans le foyer dont on veut évaluer la température, tandis que l'autre soudure reste à la température ambiante. Une graduation a été établie empiriquement en observant les déviations du galvanomètre quand la soudure A est plongée successivement dans des bains de températures connues : plomb fondu (325°), soufre en ébullition (448°), argent fondu (945°), or fondu (1040°), palladium fondu (1500°).

968. Piles thermoélectriques industrielles. — Les couples thermoélectriques formés par les métaux sont généralement très faibles; certaines combinaisons métalliques et des alliages bien choisis

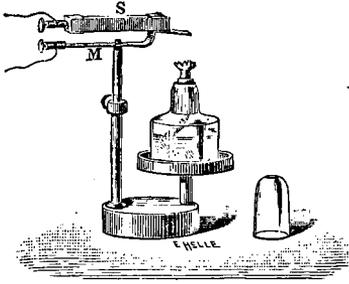


Fig. 801.

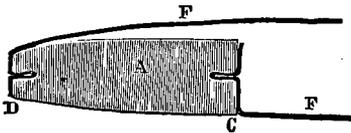


Fig. 802.

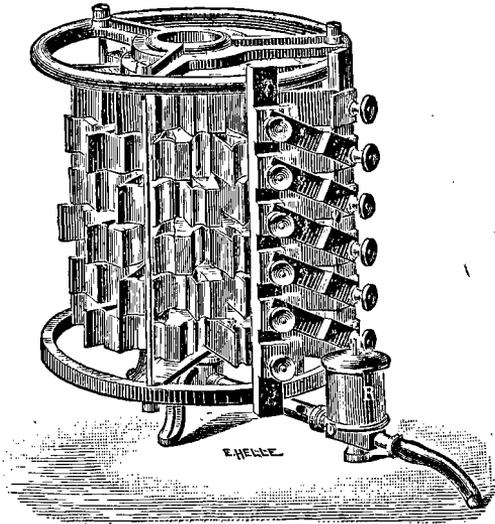


Fig. 803.

peuvent donner des forces électromotrices notablement supérieures. Tel est l'élément *mailechort-sulfure de cuivre* (fig. 801), dont 40 couples chauffés au gaz et associés en série décomposent l'eau.

La pile Clamond qui a été utilisée pour la production industrielle de courants constants se compose de couples formés d'un *alliage A de zinc et d'antimoine soudé à une lame de fer F* (fig. 802).

10 de ces éléments sont montés en série de façon à former une couronne; une pile se compose de couronnes superposées, isolées les unes des autres par des

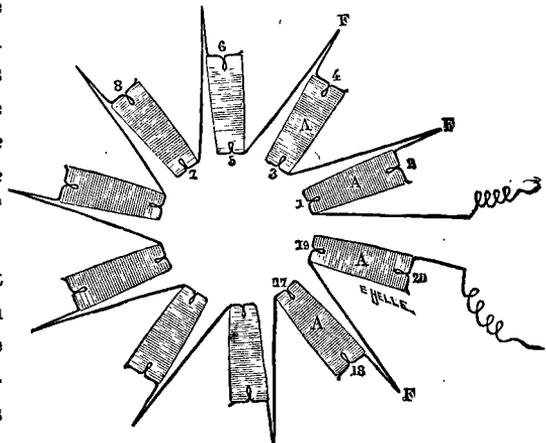


Fig. 804.

rondelles d'amiante. L'extrémité positive de chaque couronne est reliée à l'extrémité négative de la couronne suivante. Le tout forme un cylindre creux chauffé intérieurement par la flamme du gaz et porté environ à 350° (fig. 803). Les soudures paires sont disposées sur la surface extérieure du cylindre, et les soudures impaires occupent la surface intérieure (fig. 804).

La force électromotrice de chaque élément vaut à peu près 0,7015, et sa résistance 0,01 ohm. Avec 60 éléments, on a une pile de 2,5, avec une résistance d'un demi-ohm.

969. Source de l'énergie électrique d'une pile thermoélectrique.

— L'étude du fonctionnement d'une pile thermoélectrique montre en premier lieu que la production du courant électrique exige une dépense de chaleur à la source chaude. Une portion de la chaleur dépensée est convertie en énergie électrique, et celle-ci se transforme à son tour en énergie calorifique dégagée dans le circuit. *La chaleur dégagée dans le circuit se divise en deux parts* : une partie est distribuée conformément à la loi de Joule et utilisable (du moins la fraction qui appartient au circuit extérieur), une autre partie détermine un réchauffement spécial de la soudure froide, ce qui fait que pour maintenir le courant il faut refroidir cette soudure afin d'éviter une égalisation de température qui tend à se produire.

Ce fonctionnement ressemble à celui d'une machine à vapeur où une partie de la chaleur fournie à la vapeur est utilisée pour des travaux extérieurs tandis qu'une autre partie passe dans un réfrigérant dont la température doit être maintenue suffisamment basse par un apport continu d'eau froide.

L'absorption de chaleur par la soudure froide n'est pas la seule cause qui diminue le rendement, il y en a une autre beaucoup plus considérable qui tient à la *conductibilité calorifique de la pile* : la plus grande partie de la chaleur fournie par le foyer passe par conductibilité des soudures chaudes aux soudures froides. En définitive, le rendement est extrêmement faible.

Calcul expérimental du rendement. — Le calcul du rendement peut se faire d'après la dépense de gaz à l'heure et le nombre de calories que ce gaz fournirait ; on convertit ces calories en joules. C'est le travail dépensé T.

D'autre part, on évalue le travail utilisable T' en mesurant la chaleur produite dans un circuit extérieur de résistance égale à la résistance de la pile (C'est le travail maximum) (937). Le rendement est le quotient $\frac{T'}{T}$.

ÉLECTROMAGNÉTISME

Les actions qu'un courant exerce extérieurement à son circuit forment l'objet de l'électromagnétisme. Les phénomènes électromagnétiques ont pour origine l'expérience d'Ørsted ou l'action d'un courant sur un aimant.

970. Expérience d'Ørsted. — En disposant dans le méridien magnétique un fil métallique au-dessus d'une aiguille aimantée mobile sur un pivot et en équilibre, l'aiguille est déviée dès qu'on fait passer un courant dans le fil (fig. 805). Le sens de la déviation change si l'on renverse le sens du courant ⁽¹⁾.

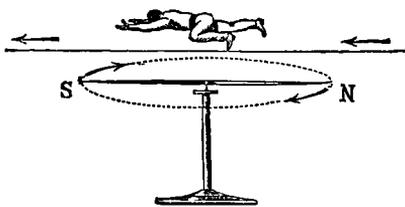


Fig. 805.

L'orientation des pôles dépend de la position du conducteur et du sens du courant; Ampère a formulé une règle simple qui fait connaître dans tous les cas le sens de la déviation : l'aimant tend à se mettre

(1) Pour renverser le sens d'un courant, on fait usage de commutateurs. L'un des plus simples (fig. 807) consiste en un disque d'ébonite que l'on peut faire tourner sur son axe à l'aide d'un manche M entre deux arrêts *b* et *b'*. Sur la face supérieure de ce disque sont fixées deux pièces métalliques : l'une, LL', recourbée en fer à cheval, communique d'une façon permanente avec le pôle négatif B de la pile; l'autre P, isolée de la précédente, part du centre et forme un rayon du disque, elle communique par l'axe de rotation avec le pôle positif B'. Ces deux pièces peuvent frotter contre deux lames élastiques de cuivre adaptées à deux bornes C et C' qui servent de point d'attache au circuit extérieur.

Dans la position de la figure, le courant va de B' à l'axe; par la pièce centrale P, il gagne l'un des ressorts et la borne C, traverse le circuit extérieur, revient à la borne C', puis au bras L, et enfin à la borne B qui le ramène à la pile.

Quand le disque est tourné de manière que le manche M soit à égale distance des arrêts *b* et *b'*, il n'y a plus contact avec les ressorts, le courant ne passe plus, et l'appareil fonctionne comme *interrupteur*.

Enfin, on peut tourner le disque de manière à faire appuyer L' sur le ressort qui aboutit en C et P sur le ressort qui aboutit en C', ce qui rend positive la lame C' et négative la borne C; le sens du courant est alors renversé dans le circuit extérieur.

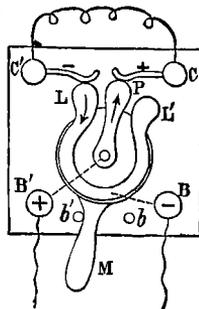


Fig. 807.

en croix avec le courant et son pôle nord se porte à la gauche du courant. La droite et la gauche du courant sont la droite et la gauche d'un observateur couché le long du conducteur, nageant dans le sens du courant, la face tournée vers l'aimant (908).

L'aimant ne se met en croix avec le courant que si le courant est très intense. C'est l'action directrice de la terre qui limite la déviation et tend à ramener l'aimant dans le méridien magnétique ou parallèlement au conducteur. En effet, si l'on prend une aiguille aimantée mobile autour d'un axe qui passe par son centre de gravité et qui est parallèle à la force magnétique, l'aiguille est soustraite à la fois à la pesanteur et à la force magnétique terrestre, et elle se met toujours en croix avec le courant.

971. Champ magnétique d'un courant. — L'action d'un courant sur une aiguille aimantée étant une action magnétique, on peut dire qu'un courant crée autour de lui un champ magnétique analogue à celui que produirait un aimant. Comme pour les aimants, ce champ magnétique est révélé par des spectres magnétiques.

Spectre magnétique d'un courant rectiligne. — Si l'on jette de la limaille de fer sur une feuille de carton horizontale percée d'un trou

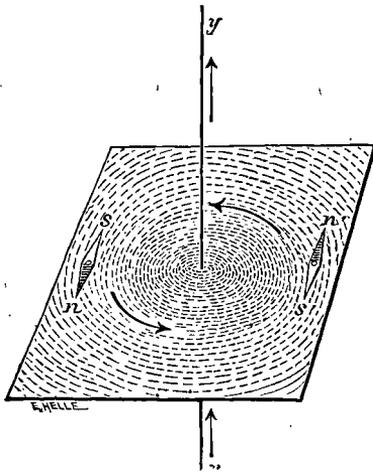


Fig. 806.

où passe un conducteur vertical xy parcouru par un courant, les particules de limaille deviennent de petits aimants (995) sous l'influence du courant; si l'on facilite le groupement par de petites secousses, elles se disposent en *circonférences* ayant pour centre la trace du fil (fig. 806). Ces circonférences perpendiculaires à la direction du courant figurent les lignes de force du champ magnétique; le *spectre magnétique* qu'elles forment reste le même quand on fait glisser le carton le long du fil en le maintenant perpendiculaire au fil. La

direction des aiguilles aimantées ns , $n's'$ indique de quelle façon s'orientent les pôles des particules. Les flèches figurent les lignes de force : ces lignes parcourent intérieurement les petits aimants formés par la limaille en allant de leur pôle sud à leur pôle nord (883).

Dans l'expérience d'Ærsted, la ligne des pôles de l'aimant dévié se place de façon à être tangente à la ligne de force au point de l'espace où se trouve l'aimant.

Spectre magnétique d'un circuit plan. — D'après la règle d'Ampère, un conducteur formant un circuit plan et entourant une aiguille aimantée exerce sur elle, par tous ses éléments, une action de même sens (908).

Cette action tend à placer l'aiguille en croix avec chacun des côtés du cadre, par suite la force exercée sur chaque pôle est perpendiculaire au plan du cadre et dirige le pôle nord à gauche du courant.

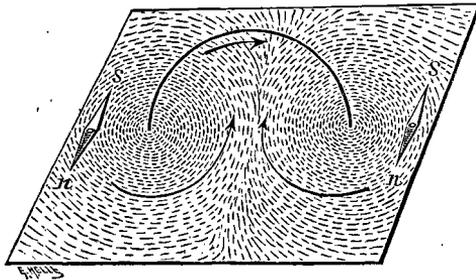


Fig. 808.

On obtient la direction des lignes de force du champ magnétique dû au circuit en plaçant son plan verticalement et en jetant de la limaille sur un carton horizontal traversé par le cadre (fig. 808).

Le système des lignes de force est semblable à celui que produirait une plaque aimantée, de faible épaisseur, ayant son axe magnétique perpendiculaire au plan du cadre et son pôle sud en avant de la figure. Cette analogie est précisée par le théorème d'Ampère.

THÉORÈME D'AMPÈRE

972. *Un petit circuit fermé parcouru par un courant exerce la même action magnétique qu'un aimant dont l'axe serait normal au plan du courant et le moment égal à sI , s étant la surface enveloppée par le circuit et I l'intensité du courant. Le pôle nord du petit aimant équivalent (fig. 809) est situé à la gauche du courant.*

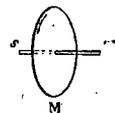


Fig. 809.

Équivalence d'un circuit et d'un feuillet magnétique. — Le théorème précédent peut être étendu à un circuit fermé de forme quelconque.

Par le contour du circuit BCDE faisons passer une surface, et coupons-la par deux systèmes de plans, les plans de chaque système étant parallèles entre eux et très voisins ; nous la décomposons ainsi en circuits très petits tels que *abef*.

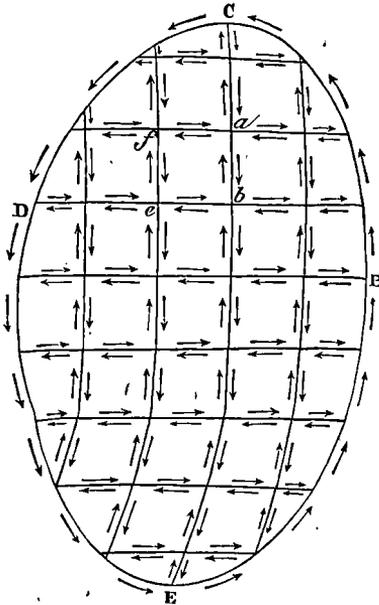


Fig. 810.

Supposons les contours de ces petits circuits parcourus par des courants de même sens et de même intensité que le courant du contour primitif (fig. 810). Chaque ligne de séparation sur un circuit intérieur est parcourue par deux courants égaux et de sens contraires dont les actions extérieures s'annulent. Les actions des éléments situés sur le contour subsistent alors seules. Il reviendra donc au même de considérer l'action du courant extérieur ou de lui substituer tous les petits circuits provenant de la

subdivision. Puisque chacun des petits circuits peut être remplacé au point de vue de son action magnétique par un petit aimant qui lui est normal, l'ensemble produira le même effet qu'une lame magnétique de faible épaisseur, aimantée transversalement, ou **feuillet magnétique**, de même contour que le circuit et ayant sa face nord à la gauche du courant.

Cette assimilation est extrêmement importante, nous allons la suivre dans ses conséquences. Elle nous permettra d'expliquer les actions électromagnétiques d'un courant comme on explique les actions magnétiques d'un aimant.

973. Support des courants mobiles. — Pour rendre un courant mobile on se sert d'un support spécial (fig. 811).

Sur un socle muni de vis calantes sont fixées deux bornes A et D ; entrant par la borne A, le courant se dirige par un conducteur caché

sous le socle dans une tige de laiton centrale surmontée d'une coupe en acier *a* qui renferme du mercure. De la coupe *a*, le courant suit le

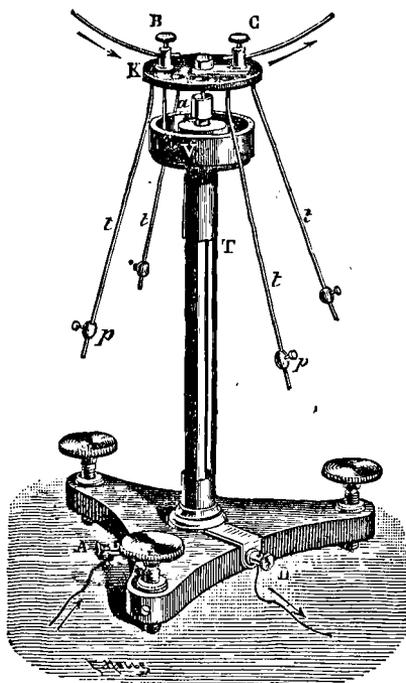


Fig. 811.

conducteur mobile, revient dans un godet annulaire en ébonite *V*, contenant du mercure et assujéti autour de la partie supérieure de la tige centrale. Le fond du godet communique par des vis en fer avec un cylindre métallique creux *T* qui entoure la tige centrale *sans la toucher* et est relié à la borne de sortie *D*.

L'équipage mobile (fig. 812) est formé d'un disque en ébonite *K*

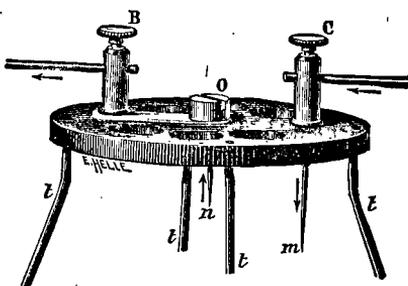


Fig. 812.

portant deux bornes *B* et *C* auxquelles aboutit le conducteur en expérience. Une lame en laiton relie la borne *B* au centre *O*, qui repose par une pointe *n* sur le fond de la coupe *a*; la borne *C* se continue par une autre pointe plus longue *m* qui plonge dans le mercure du godet annulaire *V*.

De la coupe au godet, le courant suit la route *anOB... CmV*.

Le disque d'ébonite porte des tiges *t*, munies de curseurs *p*, que l'on règle pour amener le centre de gravité de l'équipage mobile au-dessous de la pointe qui sert de pivot et pour rendre le disque horizontal.

974. Action de la Terre sur un cadre traversé par un courant. — Tant qu'il n'est pas traversé par un courant, le circuit mobile reste en équilibre dans toute position où on le place. Mais si, l'on relie les deux bornes *A* et *D* aux deux pôles d'une pile, le cadre

se met en mouvement et après quelques oscillations se fixe dans une position qui est toujours la même (fig. 813). Le plan BMNC du cadre s'oriente *perpendiculairement à la direction de l'aiguille de déclinaison* au lieu où l'on se trouve.

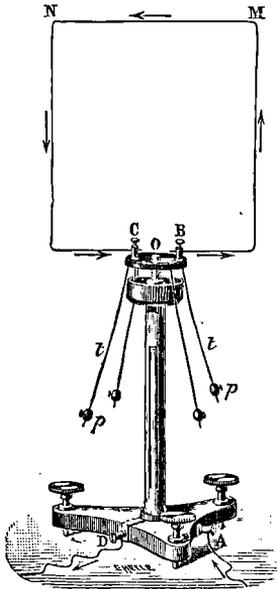


Fig. 813.

L'orientation est la même, quelle que soit la forme du circuit : plan, rectangulaire, circulaire ou quelconque.

Cette orientation est due à l'action de la Terre, elle résulte de ce que le circuit fermé se comporte comme un feuillet magnétique (972), formé de petits aimants dont les axes sont perpendiculaires au plan du cadre. Les axes de ces aimants parallèles se dirigent comme l'axe d'une aiguille de déclinaison.

Le courant a donc une *face nord* et une *face sud*. La face nord est à la gauche du courant; un observateur placé devant la face nord y voit le courant circuler en sens inverse du mouvement des aiguilles d'une montre.

Si le cadre est mobile autour d'un axe horizontal, perpendiculaire au méridien magnétique et passant par le centre de gravité du cadre pour le soustraire à l'action de la pesanteur, son plan se dirige perpendiculairement à l'aiguille d'inclinaison; c'est en effet suivant l'aiguille d'inclinaison que se dirigeraient les axes magnétiques des petits aimants du feuillet équivalent.

Systemes astatiques. — Les équipages mobiles représentés par les figures 814 et 815 ne sont pas susceptibles d'être dirigés par la Terre. Ils sont équivalents à un système *astatique* de deux barreaux

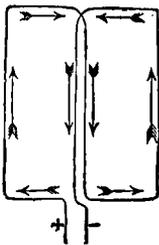


Fig. 814.

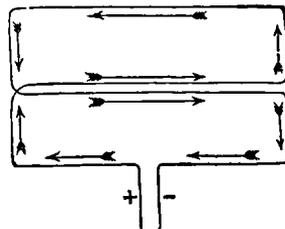


Fig. 815.

également aimantés, car ils comprennent deux surfaces planes égales sur le contour desquelles le même courant circule *en sens contraires*.

Action d'un barreau aimanté sur un cadre. — Si l'on approche un barreau aimanté d'un cadre traversé par un courant mobile autour d'un axe vertical, il y a répulsion lorsque les faces en regard de l'aimant et du courant (ou du feuillet équivalent) sont de même nom, attraction lorsqu'elles sont de noms contraires.

975. Solénoïdes. — Un solénoïde est un ensemble de courants circulaires, égaux, très rapprochés, parallèles et équidistants, ayant leurs centres sur une droite et parcourus par un courant de même sens.

Pour réaliser un solénoïde, on enroule sur la surface d'un cylindre

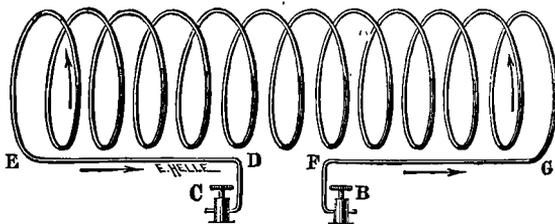


Fig. 816.

un fil conducteur en hélice à spires serrées; les deux bouts libres sont repliés parallèlement à l'axe et ramenés au milieu du cylindre. Les deux extrémités du fil sont fixées aux bornes B et C (fig. 816) du disque d'ébonite dont les pointes reposent sur la coupe et le godet annulaire du support à colonnes concentriques déjà décrit. Chaque spire de l'hélice équivaut à un cercle perpendiculaire à l'axe relié au cercle suivant par un courant rectiligne égal au pas de l'hélice. Les parties rectilignes traversées par des courants de sens contraires sont égales. De même que les courants circulaires qui le constituent, un solénoïde traversé par un courant possède *toutes les propriétés d'un aimant* et exerce comme lui des actions directrices, des actions attractives et des actions portantes.

Spectre d'un solénoïde. — Quand on plonge un solénoïde dans la limaille de fer, les grains de limaille adhèrent aux extrémités; elles se détachent quand on interrompt le courant.

Si l'on pose un disque de carton sur un solénoïde, normalement à l'axe, la limaille se groupe autour de l'extrémité comme autour du pôle d'un aimant : les lignes de force rayonnent dans tous les sens.

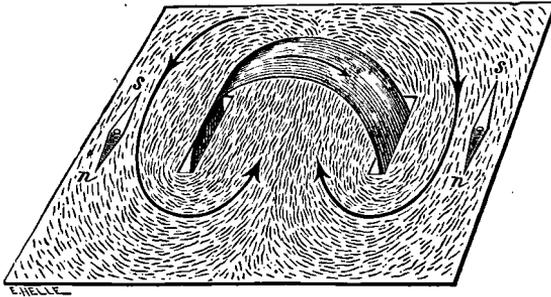


Fig. 817.

Suivant l'axe d'un solénoïde horizontal plaçons un carton sur lequel nous jetons de la limaille : les lignes de forces du solénoïde sont *continues* (fig. 817). Elles forment, à l'intérieur du solénoïde, un faisceau parallèle à l'axe, elles divergent aux extrémités et entourent le solénoïde en sortant par son extrémité nord pour rentrer par son extrémité sud. Elles figurent le *flux de force* (885).

Orientation d'un solénoïde. — Si l'on suspend horizontalement un solénoïde sur le support à colonnes et si on l'abandonne, on le voit s'orienter. Les forces directrices exercées par la Terre sur chacun de ces courants plans s'ajoutent. *L'axe du solénoïde prend la direction de l'aiguille de déclinaison.* C'est toujours la même extrémité N du solénoïde qui se dirige vers le nord. On l'appelle *pôle nord*. On nomme *pôle sud* l'extrémité qui se dirige vers le sud (fig. 818).

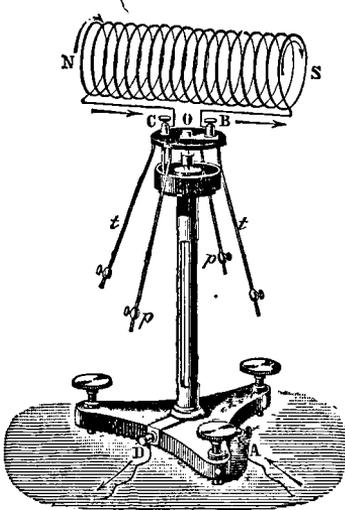


Fig. 818.

La face nord est à la gauche du courant, ou ce qui revient au même, un observateur qui *regarde le pôle nord* N y voit le courant circuler *en sens inverse* du mouvement des aiguilles d'une montre. Le solénoïde se retourne si l'on renverse le sens du courant.

L'axe d'un solénoïde entièrement libre et soutenu par son centre de gravité se dirige parallèlement à l'aiguille d'inclinaison. Le pôle qui plonge est le pôle nord (867).

Action d'un aimant sur un solénoïde. — Au pôle nord d'un solénoïde mobile, parcouru par un courant, on présente le pôle nord d'un aimant, il y a répulsion (fig. 819); il y a attraction, si on lui présente le pôle sud.

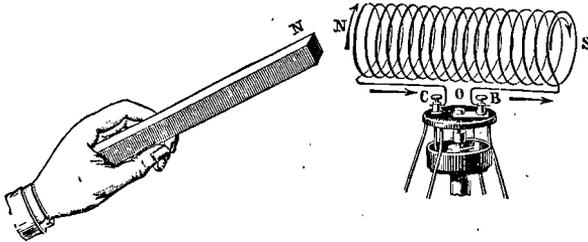


Fig. 819.

Les actions des pôles en présence sont les mêmes si l'on présente à une aiguille aimantée mobile sur un pivot un solénoïde tenu à la main et parcouru par un courant.

Action d'un courant sur un solénoïde. — Un courant agit sur un solénoïde comme sur un aimant. Sur un solénoïde mobile parcouru par un courant et orienté dans le méridien magnétique, on fait agir

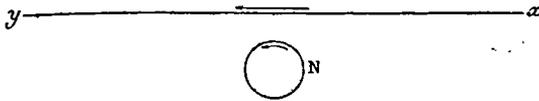


Fig. 820.

un courant rectiligne fixe, parallèle à l'axe du solénoïde : le pôle nord du solénoïde est dévié à la gauche du courant et tend à se mettre en croix avec lui (fig. 820). Comme dans le cas d'un aimant (970), c'est l'action directrice de la Terre qui limite la déviation.

Électrodynamomètre. — Au centre d'un *multiplicateur orienté dans le méridien magnétique* est mobile horizontalement un solénoïde parcouru par un courant constant. Par l'action de la Terre sur le courant du solénoïde, celui-ci se dirige parallèlement au multiplicateur. Si le multiplicateur est à son tour traversé par un courant, le solénoïde est dévié comme un aimant, et sa déviation peut mesurer l'intensité du courant qui parcourt le multiplicateur.

Action de deux solénoïdes. — Un solénoïde traversé par un courant et mobile autour d'un axe vertical ayant pris la direction de l'aiguille de déclinaison, de l'un de ses pôles on approche un pôle d'un autre solénoïde tenu à la main (fig. 821) : les pôles de même nom des

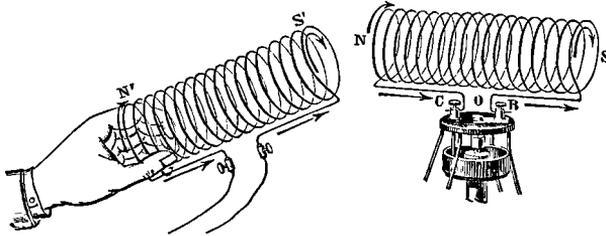


Fig. 821.

deux solénoïdes se repoussent, les pôles de noms contraires s'attirent, comme les pôles de noms contraires de deux aimants.

Voici une autre manière de montrer l'action de deux solénoïdes. Plaçons l'un au-dessus de l'autre deux circuits égaux et parallèles, l'un inférieur fixe, l'autre supérieur mobile, soutenu par un fléau de balance et équilibré. Faisons passer des courants dans les deux bobines. Si les courants sont de même sens, les pôles contraires des aimants équivalents seront en regard et s'attireront : si les courants sont de sens contraires, les pôles en regard seront de même nom et se repousseront. On pourra faire équilibre par un poids à l'attraction ou à la répulsion.

Toutes ces expériences vérifient le théorème d'Ampère (972).

976. Relation entre le flux de force et la position d'équilibre d'un circuit. — L'assimilation d'un courant et d'un aimant que nous venons de vérifier nous permet d'appliquer aux courants la loi générale d'équilibre déjà énoncée pour un aimant (786) : *un circuit traversé par un courant, mobile dans un champ magnétique, se place de façon à recevoir le flux magnétique par sa face sud et à embrasser un flux maximum.*

ÉLECTRODYNAMIQUE

977. Dans le chapitre précédent, nous avons déduit des actions mutuelles des aimants et des courants les actions des courants sur les

courants. Ampère, auquel sont dues la plupart des expériences qui ont suivi la découverte d'Ørsted, avait pris pour point de départ les actions mutuelles des courants et avait été conduit par cette voie à énoncer le théorème fondamental de l'assimilation d'un courant à un feuillet magnétique (972).

Bien que dans la pratique il soit plus avantageux d'attribuer des propriétés magnétiques aux courants, et par conséquent de faire dériver leurs actions extérieures de celles des aimants, nous allons rappeler la méthode d'Ampère.

Les phénomènes de l'électrodynamique ou les actions des courants sur les courants se déduisent de trois expériences fondamentales dues à Ampère.

1° **Expérience des courants parallèles.** — *Deux courants parallèles et de même sens s'attirent. Deux courants parallèles et de sens contraires se repoussent.*

Prenons un circuit rectangulaire soutenu par le support déjà décrit

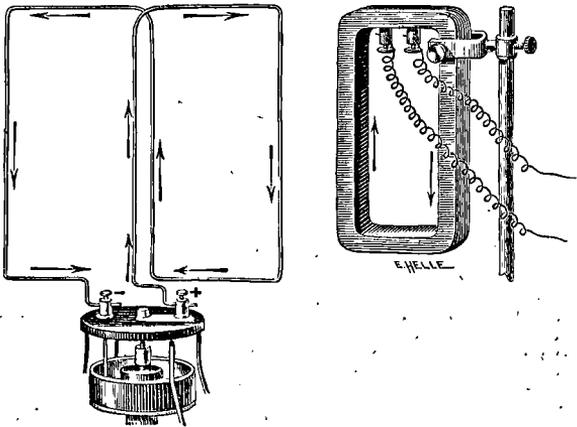


Fig. 822.

(973) et pouvant tourner autour d'un axe vertical. D'une branche verticale du rectangle on approche un conducteur vertical traversé par un courant et maintenu fixe : il y a attraction du conducteur mobile si les deux conducteurs parallèles voisins sont de même sens, répulsion s'ils sont de sens contraires (fig. 822).

On rend l'action plus forte en prenant pour conducteur fixe un fil de cuivre recouvert de soie, enroulé un certain nombre de fois sur un cadre de bois rectangulaire et formant ainsi un multiplicateur.

Pour n'avoir pas à se préoccuper des perturbations que pourrait

faire craindre l'action de la Terre sur le cadre mobile, on doit employer pour conducteur mobile un conducteur astatique.

2° **Expérience des courants angulaires.** — *Deux courants rectilignes faisant un angle s'attirent s'ils s'éloignent ou s'approchent*

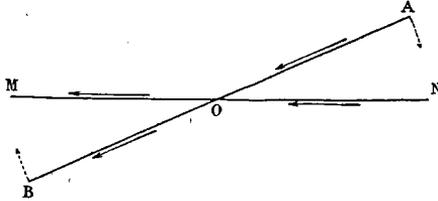


Fig. 823.

tous les deux de leur point de croisement ou de leur perpendiculaire commune (fig. 823); ils se repoussent si l'un s'en approche tandis que l'autre s'en éloigne (fig. 824).

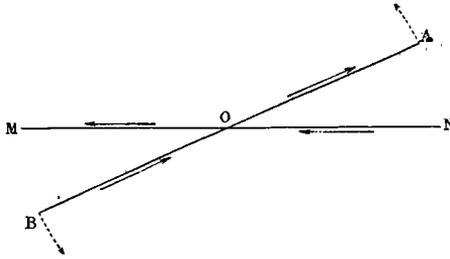


Fig. 824.

Pour la démonstration, on fait usage d'un cadre mobile tel que celui de la fig. 815, mais au lieu de présenter le conducteur fixe MN parallèlement à l'un des côtés verticaux du rectangle, on le place au-dessus du côté horizontal supérieur et dans un plan parallèle; le cadre tourne jusqu'à ce que le côté horizontal supérieur soit devenu parallèle au conducteur fixe et de même sens.

3° **Expérience des courants sinueux.** — *Deux courants égaux et de sens contraires produisent des actions égales et de sens contraires, et l'effet total est nul.*

Un courant sinueux produit le même effet qu'un courant rectiligne de même intensité et de même sens, ayant les mêmes extrémités et dont il s'écarte très peu.

En présentant à un conducteur mobile le système d'un fil conducteur replié de telle façon que les deux branches très voisines soient

parcourues par des courants contraires (fig. 825), ce système n'a pas d'action. Le résultat est le même si l'on remplace l'un des deux fils par un *fil sinueux* qui s'écarte très peu du fil rectiligne (fig. 826); les actions de la partie rectiligne OB et de la partie sinueuse sont donc égales.

Les actions électrodynamiques, comme les actions électromagnétiques, diminuent d'intensité quand la distance entre les conducteurs augmente. Elles s'exercent aussi à travers différents corps interposés entre les conducteurs : lame de verre, plaque de bois ou métal, etc.

Les propositions fondamentales d'Ampère suffisent pour expliquer les principaux phénomènes électrodynamiques indépendamment de l'assimilation d'un courant à un aimant. Nous allons appliquer cette méthode à quelques cas particuliers.

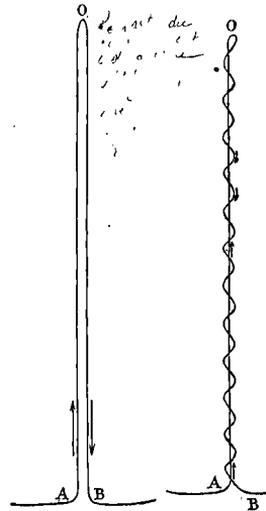


Fig. 825. Fig. 826.

(978. Actions d'un courant horizontal rectiligne et indéfini. — I. Orientation d'un conducteur vertical fini. — Soit un courant horizontal indéfini allant de X

vers Y, et soit un élément de courant vertical ascendant AB mobile autour d'un axe ZZ' parallèle à sa direction (fig. 827); menons la perpendiculaire CD commune aux deux courants (fig. 828); les parties DX et DY exercent sur AB, par raison de symétrie, des forces égales appliquées au milieu O de l'élément. Ces forces sont contraires, car c'est une attraction

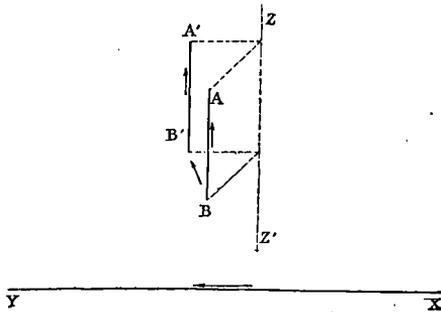


Fig. 827.

pour les courants angulaires AB et DY qui s'éloignent à la fois de la perpendiculaire commune, et une répulsion pour AB et DX dont l'un s'approche tandis que l'autre s'éloigne. Les forces F et F' sont dans le plan OXY; la droite OD, qui est perpendiculaire à XY d'après le théorème des trois perpendiculaires, est dans ce plan et bissectrice de l'angle GOE, et par suite perpendiculaire à la diagonale OR du losange de F et F' . La résultante OR est donc parallèle à XY, et le courant ascendant AB est sollicité par une force parallèle et de même sens que le courant fixe. Cette force OR reste parallèle

On réalise l'expérience à l'aide d'un appareil (fig. 830) formé de deux cuvettes annulaires de cuivre rouge d'inégal diamètre, C et C', disposées horizontalement et renfermant une dissolution de sulfate de cuivre. Elles sont traversées en leur centre par une colonne de laiton t . Cette colonne, isolée de la cuvette inférieure, supporte la cuvette supérieure et se termine par un godet à mercure, sur lequel une tige de bois horizontale a repose par un pivot. La tige porte à l'une de ses extrémités un contre-poids et à l'autre un fil de platine replié en deux branches verticales de longueurs inégales qui plongent dans le liquide des cuvettes.

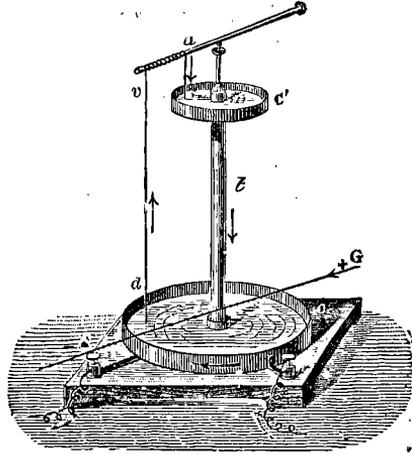


Fig. 830.

Le courant d'une pile arrive par une borne du socle de l'appareil, passe dans la cuvette inférieure qui communique métalliquement avec elle, puis, de là, par le liquide gagne la longue branche dv du fil de platine, redescend en a par la courte branche, et, de la cuvette supérieure retourne à la pile par la colonne et la seconde borne du socle.

Si le circuit est fermé, on voit l'équipage tourner autour de la colonne et s'arrêter, quand le plan vertical qui passe par la colonne et le fil est perpendiculaire au méridien magnétique.

Le courant se place à l'est s'il est descendant, à l'ouest s'il est montant⁽¹⁾. Il se place comme il le ferait sous l'action d'un courant horizontal GE allant de l'est à l'ouest.

II. — Rotation d'un courant horizontal. — Un courant horizontal mobile autour d'un axe vertical prend de lui-même un mouvement de rotation continu.

On réalise l'expérience avec un appareil à une seule cuvette (fig. 831). Le

(1) Un multiplicateur circulaire enroulé sur la cuvette inférieure communique un mouvement de rotation continu à l'équipage mobile. Le sens de la rotation change à chaque changement de sens de l'un ou de l'autre courant. On voit aisément par la considération de deux éléments du courant circulaire, symétriques par rapport à un élément du courant vertical, que si le courant vertical est ascendant, il est transporté dans le sens du courant circulaire. Il prend un mouvement de rotation continu, car dans son déplacement il est constamment soumis à l'action de nouveaux éléments situés de part et d'autre de la perpendiculaire commune et agissant constamment de la même manière (fig. 832).

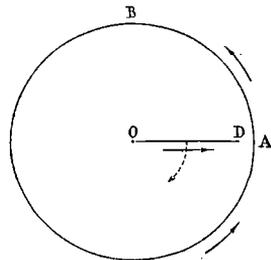


Fig. 832.

courant arrive par la borne A du socle, monte par une colonne centrale isolée de la cuvette et portant un godet à mercure, passe à la partie horizontale de l'équipage mobile et par OD et OE arrive à la cuvette, puis retourne à la pile dont le deuxième conducteur polaire aboutit en B.

Si le courant horizontal s'éloigne de son axe de rotation, son mouvement

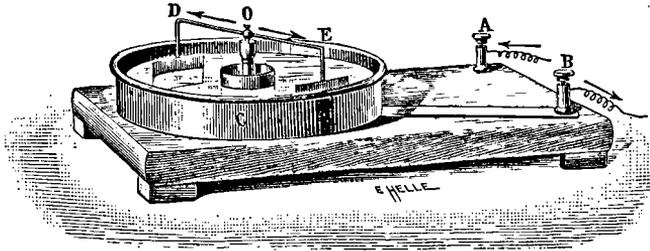


Fig. 831.

a lieu de l'ouest à l'est en passant par le sud ; s'il se rapproche de son axe de rotation, le mouvement a lieu de l'est à l'ouest en passant par le nord⁽¹⁾.

Ces effets d'orientation d'un courant vertical et de rotation d'un courant horizontal, peuvent être produits par un courant horizontal indéfini allant de l'est à l'ouest ; mais il faut que ce courant soit situé au sud par rapport à nous, c'est-à-dire vers la région équatoriale ; s'il était situé au nord, il produirait la même orientation pour le courant vertical, mais une rotation inverse pour le courant horizontal.

Si le courant terrestre était au-dessous du courant mobile, le courant horizontal se fixerait dans une position horizontale invariable sans tourner d'une façon continue.

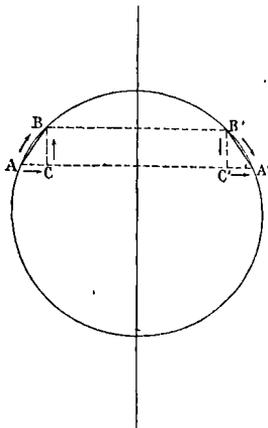


Fig. 833.

III. Orientation d'un courant rectangulaire vertical. — Les expériences précédentes donnent l'explication de l'orientation d'un cadre rectangulaire (974).

Les actions de la Terre sur les parties horizontales inférieure et supérieure sont égales et contraires et s'annulent ; les côtés latéraux s'orientent, l'ascendant à l'ouest, le descendant à l'est. Dans la partie inférieure, le courant est parallèle au courant terrestre.

IV. Orientation d'un courant circulaire vertical. — Un courant circulaire mobile

(1) Un multiplicateur circulaire enroulé sur la cuvette communique un mouvement de rotation continu au courant horizontal mobile. Lorsque le courant horizontal est centrifuge, sa rotation a lieu en sens contraire du courant circulaire, conformément à la loi des courants angulaires.

autour d'un axe vertical s'oriente dans un plan perpendiculaire au méridien magnétique, la partie descendante à l'est et la partie ascendante à l'ouest.

Si, en effet, nous prenons deux éléments égaux du courant circulaire AB et A'B' situés à la même hauteur (fig. 833), nous pourrions leur substituer, d'après le théorème des courants sinueux, un élément horizontal AC et un élément vertical CB, de même B'C' et C'A'; les actions de la Terre sur les deux éléments horizontaux sont égales et opposées et s'annulent, les courants verticaux s'orientent conformément à la règle établie.

980. Solénoïdes. — On appelle solénoïde une série de cercles parallèles voisins, de même surface, perpendiculaires à une même droite réunissant leurs centres, parcourus par des courants de même sens et de même intensité.

Nous avons vu plus haut (975) comment on réalisait un solénoïde mobile autour d'un axe vertical avec un fil de cuivre enroulé en hélice; les deux extrémités du fil aboutissent aux deux bornes du disque d'ébonite et communiquent par des pointes d'acier avec les godets du support à colonnes.

Action de la Terre sur un solénoïde. — Un solénoïde à axe horizontal, mobile autour d'un axe vertical, s'oriente dès qu'il est traversé par un courant, il se fixe de façon que son axe soit dirigé suivant l'aiguille de déclinaison. Si le sens du courant ne change pas, c'est toujours la même extrémité qui se dirige vers le nord, on l'appelle *pôle nord*.

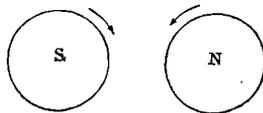


Fig. 834.

Le courant du solénoïde est ascendant à l'ouest, descendant à l'est. En se plaçant en face du pôle sud S, on voit le courant circuler dans le sens direct; en face du pôle nord N, on le voit circuler dans le sens inverse (fig. 834).

Actions mutuelles de deux solénoïdes. — Soient un solénoïde mobile orienté NS, et un solénoïde fixe N'S' auquel on a donné la position qu'il aurait s'il était orienté librement; les pôles de même nom sont dirigés vers

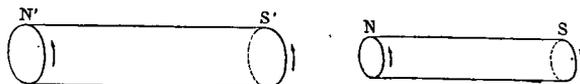


Fig. 835.

le nord en N et N', leurs courants sont parallèles et tous les deux ascendants à l'ouest.

Approchons le solénoïde fixe en lui conservant son orientation; les pôles en regard sont des pôles de noms contraires N et S' (fig. 835): les courants en présence sont parallèles et de même sens et s'attirent.

Si l'on présente au pôle nord du solénoïde mobile le pôle nord du solénoïde fixe, les courants en présence en N et en N' sont parallèles et de sens contraires (fig. 836) et se repoussent.

Il résulte donc des expériences fondamentales de l'électrodynamique que

les pôles de noms contraires de deux solénoïdes s'attirent tandis que les pôles de même nom se repoussent.

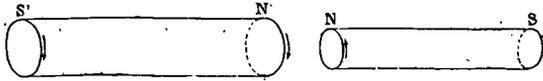


Fig. 836.

Action d'un courant rectiligne sur un solénoïde. — Un solénoïde horizontal; mobile autour d'un axe vertical et traversé par un courant, s'oriente, et son axe prend la direction de l'aiguille de déclinaison. Au-dessus du solénoïde, parallèlement à son axe, disposons un fil conducteur, ou l'un des côtés d'un cadre multiplicateur.

Quand le conducteur fixe est traversé par un courant, le solénoïde s'écarte de sa position d'équilibre, et si le courant est assez fort pour que l'action directrice terrestre soit négligeable, l'axe du solénoïde se met en croix avec le conducteur. Dans leurs parties voisines, le courant du conducteur et les courants du solénoïde sont alors parallèles et de même sens (fig. 820). Le pôle nord se porte à gauche du courant.

Actions mutuelles d'un aimant et d'un solénoïde. — En résumé, un solénoïde se dirige sous l'action de la Terre comme un aimant; deux solénoïdes agissent l'un sur l'autre comme deux aimants; enfin un courant dévie un solénoïde comme il dévie un aimant.

En raison de cette analogie de propriétés des aimants et des solénoïdes, il était naturel d'essayer l'action mutuelle d'un aimant et d'un solénoïde. On constate que si l'on présente à un pôle de solénoïde un pôle de même nom d'un aimant, il y a répulsion, tandis que si l'on met en présence deux pôles de noms contraires il y a attraction (fig. 819).

981. Assimilation des aimants aux solénoïdes. — Ampère s'est appuyé sur ces analogies des aimants et des solénoïdes qu'il avait démontrées, pour formuler une théorie de l'aimantation.

D'après Ampère, un courant électrique préexiste autour de chaque particule d'une substance magnétique. Ces courants sont primitivement dirigés au hasard *dans des sens divers* et n'exercent pas d'action extérieure. Quand un barreau magnétique est soumis à une influence magnétisante, les courants particuliers s'orientent et sont tous amenés à circuler dans le même sens et leurs plans deviennent parallèles; un barreau aimanté se comporte alors comme un faisceau de petits solénoïdes ayant tous leurs pôles de même nom vers la même extrémité du barreau.

Dans un solénoïde, les pôles se trouvent rigoureusement aux extrémités de l'axe tandis que dans un aimant les pôles siègent à une certaine distance des extrémités (858). Ampère admet que, par les actions mutuelles des courants particuliers, les axes des solénoïdes se courbent et s'écartent de l'axe géométrique du barreau au voisinage des extrémités.

Les *pôles nord* des aimants et des solénoïdes sont à la gauche des courants ou encore, si l'on se place en face du pôle nord d'un solénoïde ou d'un

aimant, les courants circulent dans le sens inverse; si l'on se place en face du pôle sud, on les voit circuler dans le sens direct.

Dans le fer doux, l'orientation n'est que temporaire, les courants particuliers reprennent très rapidement leurs positions primitives quand l'action magnétisante a cessé. Dans l'acier trempé, l'orientation se maintient en grande partie.

Cette hypothèse substitue aux champs magnétiques des champs galvaniques dus à des courants. En partant de l'assimilation des solénoïdes aux aimants, il est également possible de substituer des champs magnétiques aux champs galvaniques : c'est ce que nous avons fait dans notre chapitre sur l'électromagnétisme. C'est habituellement préférable.

982. Action extérieure d'un aimant ou d'un faisceau de solénoïdes. — Si l'on considère une section d'un barreau aimanté, les courants particuliers, par cela même que les courants sont de même sens, ont des directions opposées dans leurs parties contiguës et se neutralisent. Les courants du pourtour extérieur restent seuls efficaces et produisent par leur ensemble un courant circulaire unique enveloppant le barreau aimanté (fig. 837). Un barreau aimanté agira à l'extérieur comme une série de courants perpendiculaires à l'axe magnétique circulant sur la surface extérieure du barreau et formant un solénoïde unique.

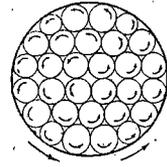


Fig. 837.

Rotation d'un aimant par un courant. — Dans une large éprouvette remplie de mercure flotte un aimant cylindrique NS, lesté à sa partie inférieure par la platine P et dépassant de quelques millimètres le niveau du

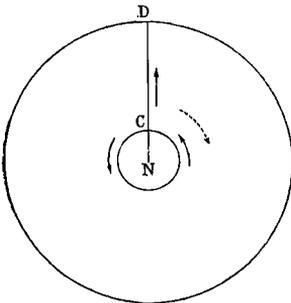


Fig. 838.

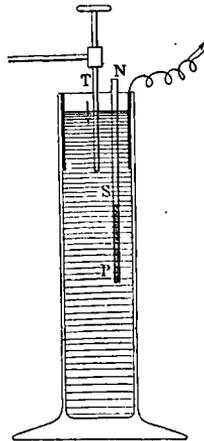


Fig. 839.

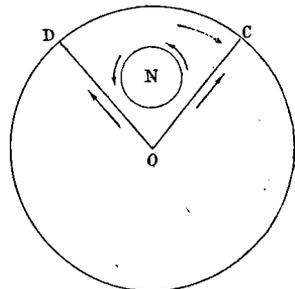


Fig. 840.

mercure. A son extrémité supérieure, l'aimant est creusé d'une petite cavité qui contient une goutte de mercure et dans laquelle plonge une pointe reliée

à l'un des pôles d'une pile. L'autre pôle de la pile communique avec un anneau de cuivre qui plonge dans le mercure près de la paroi de l'éprouvette. Le courant arrive par la pointe, traverse la partie supérieure de l'aimant et retourne à la pile par le mercure et l'anneau métallique. Quand le courant passe, l'aimant tourne autour de son axe. Le sens de la rotation dépend du pôle qui surnage et de la direction du courant.

Supposons que c'est le pôle nord de l'aimant qui surnage et que le courant de la pile va du centre à la périphérie. Le pôle nord équivaut à un courant décrivant la circonférence de l'aimant dans le sens inverse. Le courant CD attire la partie de l'aimant située à gauche de C et repousse la partie située à droite de C (loi des courants angulaires), il y a donc rotation de l'aimant dans le sens de la flèche figurée en pointillé (fig. 838).

Si l'on dispose l'expérience en plongeant la pointe dans le mercure et en laissant flotter l'aimant à côté (fig. 839), on voit l'aimant tourner autour de la pointe. La rotation a lieu dans le même sens que précédemment, si c'est le pôle nord qui surnage et si le courant marche encore du centre à la périphérie, car OC attire le courant de l'aimant et OD le repousse (fig. 840).

Rotation d'un courant par un aimant. — Soit un aimant fixé verticalement et ayant son pôle sud en haut. Un conducteur vertical dans lequel passe un courant ascendant est mobile autour de l'axe de l'aimant (fig. 841). En menant la perpendiculaire commune OO' au courant de l'aimant et au courant vertical, on voit que CO repousse O'B tandis que OD l'attire : de là une rotation du courant vertical en arrière du plan de la figure ; à mesure que le conducteur AB tournera, les autres parties du pôle sud produiront une rotation dans le même sens. La partie O'A du conducteur vertical située au-dessous de O' prendrait un mouvement de rotation inverse et se porterait en avant du plan de la figure. Si cette seconde

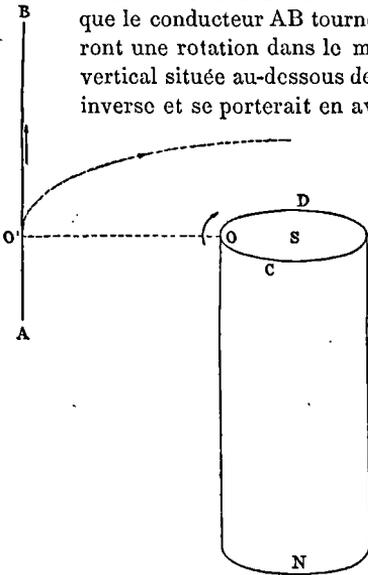


Fig. 841.

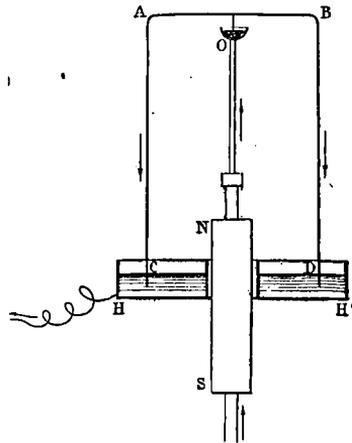


Fig. 842.

partie du conducteur est très petite, la première rotation l'emporte. Dans le cas où le conducteur serait prolongé jusqu'à la partie inférieure de l'aimant,

les actions des deux pôles seraient contraires et il n'y aurait aucune rotation.

Appareil (fig. 842). — Le courant arrive par une tige verticale en laiton qui supporte, à l'aide d'une coupe O en acier contenant du mercure, un conducteur OAC et OBD ; ce conducteur est terminé en C et D par deux pointes qui plongent dans un vase annulaire renfermant du mercure par lequel le courant retourne à la pile. La tige verticale occupe l'axe d'un barreau aimanté tubulaire que l'on élève légèrement quand le courant passe.

Le conducteur mobile tourne d'une façon continue, le sens de sa rotation change avec le pôle de l'aimant que l'on fait agir sur lui. Dans la figure 842, le pôle nord est en haut et le courant mobile est descendant ; la rotation a lieu en arrière du plan de la figure, comme dans la figure 841.)

GALVANOMÈTRES

983. On appelle galvanomètres *des appareils électromagnétiques construits pour mettre en évidence l'existence d'un courant, en déterminer le sens et en mesurer l'intensité.*

Si l'on répète l'expérience d'Ørsted (970), la déviation de l'aiguille aimantée fait conclure à l'*existence d'un courant*. On en détermine le *sens* en appliquant la règle d'Ampère (pôle nord à gauche du courant).

Sans le magnétisme terrestre, le moindre courant passant dans un conducteur parallèle à un aimant le mettrait en croix avec ce conducteur.

Quand l'aimant reste soumis à l'action de la Terre, l'angle qu'il fait avec le méridien magnétique *croît avec l'intensité* du courant et ne devient voisin de 90° que si le courant est très intense. La grandeur de la déviation permet de mesurer l'intensité.

En s'en tenant à la disposition de l'expérience fondamentale d'Ørsted (fig. 805), l'angle d'écart de l'aiguille aimantée serait inappréciable pour un courant faible ; mais on augmente l'effet du courant par l'emploi d'un *multiplicateur* et on diminue l'action antagoniste de la Terre en rendant l'aiguille aimantée *astatique*.

On donne le nom de **galvanomètres** aux appareils qui servent à la comparaison des intensités et on appelle spécialement **boussoles** et **ampèremètres** les appareils destinés aux évaluations en ampères.

Multiplicateur. — C'est un cadre rectangulaire aplati placé verticalement et sur lequel s'enroule un grand nombre de fois un fil

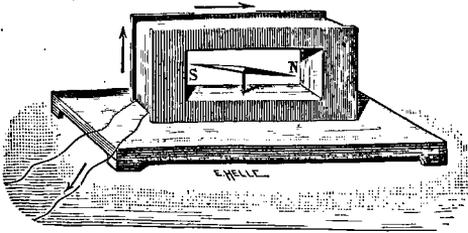


Fig. 843.

métallique isolé. Les extrémités du fil se terminent à deux bornes auxquelles aboutit le circuit traversé par le courant (fig. 843). L'aiguille est mobile horizontalement autour d'un axe vertical passant par le centre du cadre.

L'action du courant est ainsi multipliée, car si l'on dirige suivant le courant le personnage conventionnel d'Ampère, en lui faisant constamment regarder l'aimant (fig. 844), sa gauche se maintient du

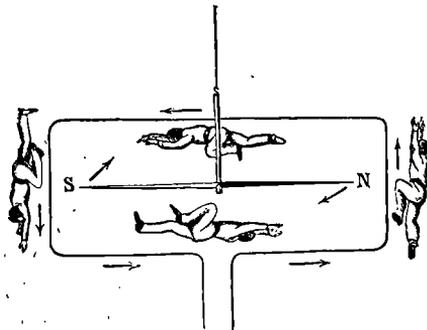


Fig. 844.

même côté du cadre; par conséquent, *toutes les parties du cadre portent le pôle nord du même côté.*

Toutefois, la distance des spires à l'aimant augmente avec leur nombre, et l'action du multiplicateur n'est pas proportionnelle au nombre des spires; en outre, l'addition au circuit du fil enroulé sur le cadre a pour effet de

diminuer l'intensité et par conséquent l'effet de chacune des spires.

Quand un galvanomètre est destiné à mesurer un courant dans un circuit très résistant et qu'on peut augmenter le nombre des spires sans accroître sensiblement la résistance totale, on enroule sur le cadre un très grand nombre de spires de fil fin. Si le circuit n'a qu'une faible résistance, le fil enroulé sur le cadre ne doit offrir qu'un petit nombre de spires de gros fil (926).

Aimant astatique — L'action directrice de la Terre décroît si l'on diminue l'aimantation de l'aimant, mais l'action du courant diminue proportionnellement; en effet, la déviation change peu avec le magnétisme de l'aimant.

Pour diminuer l'action directrice de la Terre sans affaiblir l'action du courant, on a recours à deux procédés.

Aimant compensateur. — On dispose un barreau aimanté de telle façon qu'il exerce sur l'aiguille une action contraire à l'action de la Terre et à peu près égale. Ce peut être un aimant NS placé dans le plan horizontal de l'aiguille *ns* (fig. 845), ou un aimant porté au-dessus du cadre par une tige à laquelle on le fixe. Dans ce dernier cas, l'aimant a ordinairement la forme d'un arc de cercle (fig. 846) qui permet



Fig. 845.

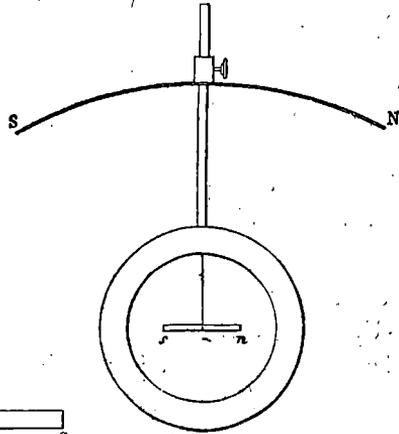
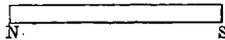


Fig. 846.

de placer au besoin ses deux pôles en prolongement des deux pôles de l'aiguille aimantée.

Système astatique. — Souvent, au lieu d'une seule aiguille aimantée mobile, on emploie un système de deux aiguilles parallèles liées invariablement à une même tige métallique rigide. Les deux aiguilles tendent à prendre des orientations opposées, car leurs pôles de noms contraires *a* et *b* se regardent. Si le système des deux aiguilles occupait tout entier l'intérieur du multiplicateur, l'action de celui-ci serait diminuée comme l'action de la Terre, mais on place l'une des aiguilles à l'intérieur et l'autre au-dessus et

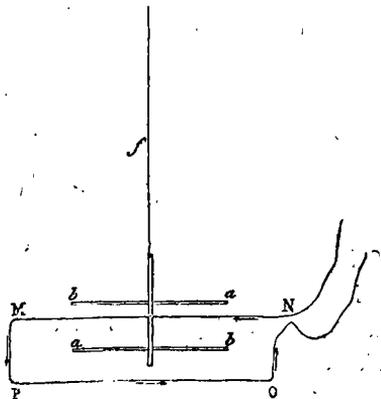


Fig. 847.

en dehors (fig. 847). Les quatre côtés du cadre poussent en avant le pôle nord de l'aiguille intérieure. Sur l'aiguille extérieure l'action du côté le plus rapproché MN fait tourner l'aiguille dans le même sens, et, vu la proximité, cette action est supérieure à l'action des trois autres côtés qui est inverse. L'aiguille extérieure accroît donc l'action du courant plus qu'elle ne la diminue.

Un pareil système suspendu à un fil de soie sans torsion serait indifférent à l'action magnétique terrestre si les deux aiguilles avaient une aimantation identique, et le moindre courant mettrait les aiguilles en croix avec le cadre. Habituellement, l'une des aiguilles est un peu plus fortement aimantée; de là une légère force directrice égale à la différence des actions exercées par la terre sur chacune des aiguilles.

984. Galvanomètre de Nobili. — *Description* (fig. 848 et 849).

— Un fil de cuivre recouvert de soie blanche est enroulé sur un multiplicateur de cavité très réduite supportant un cercle divisé que parcourt l'aiguille supérieure. Les extrémités de ce fil de cuivre aboutissent à deux bornes métalliques assujetties sur une planchette isolante et auxquelles on fixe par des vis de pression les fils f et f' conducteurs du courant.

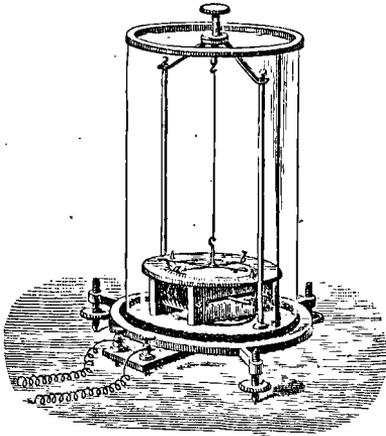


Fig. 848.

Deux aiguilles ayant chacune 5 à 6 centimètres de longueur forment un système astatique suspendu par un fil de cocon fixé supérieurement à un crochet qu'on peut faire monter ou descendre légèrement par le bouton g , ce qui permet de faire reposer l'aiguille supérieure sur le cercle divisé pour le transport de l'instrument.

Le multiplicateur et le système astatique sont protégés par une cage de verre qui les met à l'abri des poussières et des courants d'air.

Observation. — Pour faire une observation, on soulève les aiguilles et afin que leur mouvement se fasse librement, on agit sur les vis

calantes du trépied de l'instrument jusqu'à ce que la tige métallique qui supporte les aiguilles occupe exactement le milieu de l'ouverture pratiquée pour leur livrer passage au centre du cercle. L'aiguille supérieure est alors dirigée sur une division quelconque du cercle;

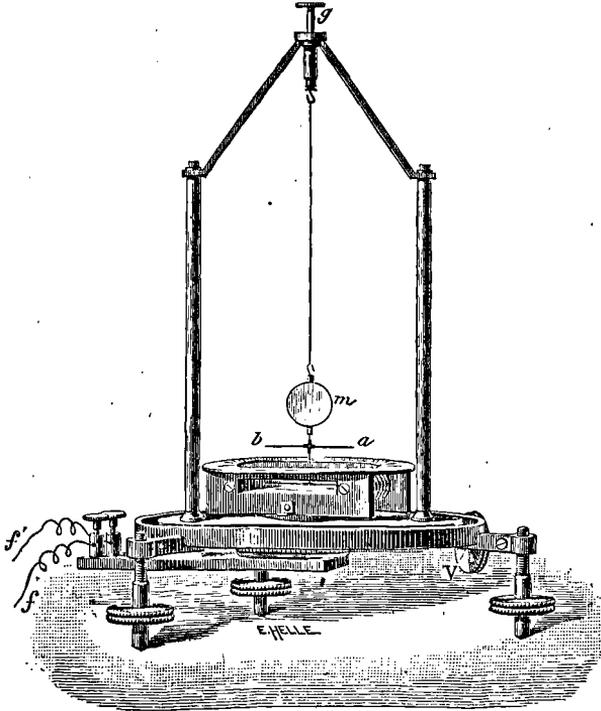


Fig. 849.

en faisant tourner le cadre multiplicateur autour d'un axe vertical, on amène le zéro du cercle divisé au-dessous d'un index qui prolonge l'aiguille aimantée.

Pour déterminer le sens d'un courant sans avoir à rechercher le sens de l'aimantation des aiguilles, on fait passer dans l'instrument un courant de direction connue. A cet effet, on forme un petit couple voltaïque avec de l'eau ordinaire où plonge un fil de zinc et un fil de cuivre, et on relie ses deux pôles aux bornes du galvanomètre. Un courant de même direction que le courant de ce couple voltaïque produit une déviation de même sens.

985. Lecture par réflexion. — Avec la forme aplatie du multiplicateur, il n'y a pas de relation simple entre la déviation de l'aiguille

et l'intensité, et il faudrait établir par une graduation directe une table donnant l'intensité du courant correspondant à chaque déviation.

On évite cette graduation en n'opérant que sur des écarts angulaires très faibles qui sont *proportionnels aux intensités* (908). On observe avec précision les faibles déviations, en les amplifiant par la méthode de la réflexion (620). La tige qui soutient le système astatique se prolonge au-dessus de l'aiguille supérieure et porte un petit miroir vertical *m* habituellement concave (fig. 849).

Sous une règle divisée horizontale *G* portée par une colonne *S* se trouve en face du miroir (fig. 850) une ouverture circulaire occupant le centre de courbure du miroir concave et livrant passage à un faisceau de lumière; un fil fin de platine servant de réticule est tendu verticalement au centre de l'ouverture. Un miroir plan *K* (fig. 851) mobile autour de deux axes perpendiculaires, permet de diriger sur le miroir concave le faisceau lumineux d'une

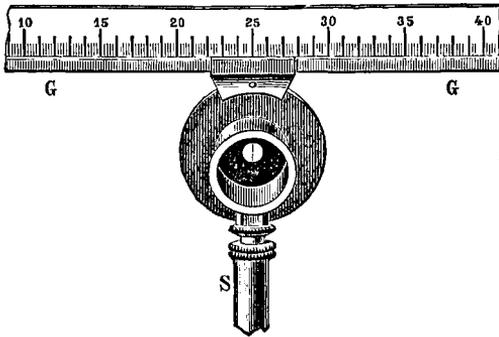


Fig. 850.

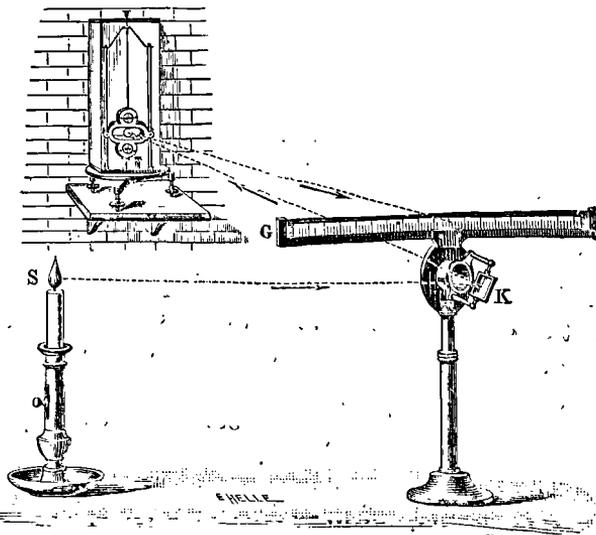


Fig. 851.

lampe. On obtient par réflexion sur l'échelle *G* un *cercle lumineux traversé par un trait noir*, image obscure du fil. Au repos, l'image du fil se fait au-dessus de lui sur l'échelle transparente, elle se meut sur la règle quand l'aiguille est déviée. Placé derrière la règle qui est transparente, l'observateur suit les déplacements du trait noir sur les divisions (fig. 851).

L'angle dont tourne le rayon réfléchi est double (620) de l'angle de rotation du miroir (fig. 852).

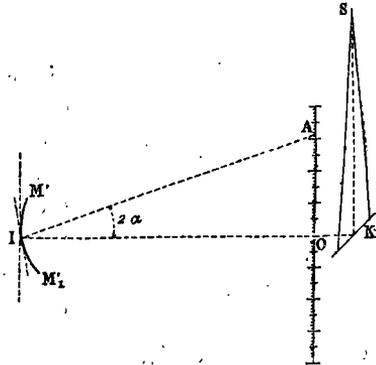


Fig. 852.

986. Amortissement. — Sous l'action du courant, l'aiguille du galvanomètre prend une position d'équilibre, mais elle ne s'y fixe qu'après de nombreuses oscillations. De même, elle ne revient au zéro que longtemps après que le courant a cessé de passer. La résistance de l'air ne s'oppose qu'imparfaitement au mouvement des pièces mobiles. On abrège la durée des expériences en amortissant les oscillations. Le cercle divisé sur lequel se déplace l'aiguille supérieure est un cercle épais de cuivre rouge dans lequel le mouvement de l'aiguille fait naître des courants d'induction qui s'opposent à son mouvement (1010).

Le galvanomètre de la figure 853 possède un système astatique dont les deux aiguilles fortement aimantées sont reliées par des traverses en aluminium extérieures au cadre du multiplicateur, ce qui permet de supprimer la fente destinée à introduire l'aiguille intérieure dans le cadre. Le fil est enroulé sur un cadre en cuivre rouge qui amortit rapidement les oscillations en agissant par induction sur l'aiguille intérieure (1010). Ce galvanomètre a un miroir plan; il a été employé précédemment dans les expériences sur le rayonnement calorifique (966).

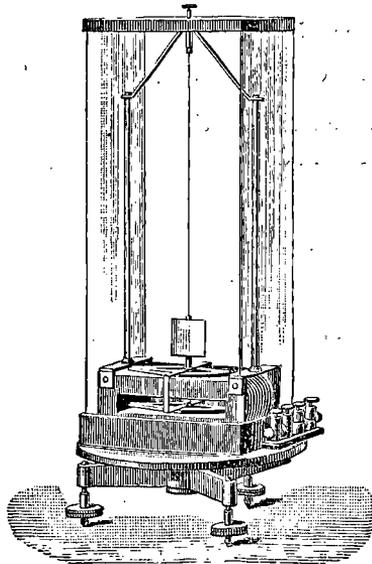


Fig. 853.

987. *Emploi des dérivation*s. — Si l'on a l'imprudence de vouloir mesurer des courants trop forts pour le galvanomètre dont on dispose, le fil du multiplicateur s'échauffe, l'image lumineuse est projetée en dehors de l'échelle graduée, et l'aimantation du système aimanté varie.

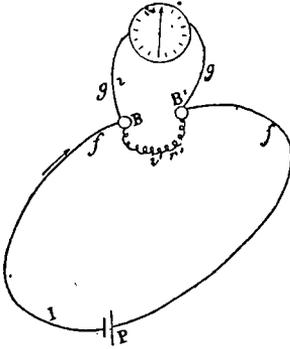


Fig. 854.

On étend les limites entre lesquelles l'appareil peut servir en n'y laissant passer qu'une partie du courant. A cet effet, on établit une dérivation entre les deux bornes B et B' du galvanomètre à l'aide d'un fil métallique de résistance déterminée r' (fig. 854), ce qui ne laisse passer dans le multiplicateur qu'une fraction connue du courant.

On choisit des dérivation

s égales à $\frac{1}{9}$, $\frac{1}{99}$, $\frac{1}{999}$ de la résistance du galvanomètre; en introduisant entre les bornes du galvanomètre une de ces trois dérivations, on réduit la sensibilité à $\frac{1}{10}$, $\frac{1}{100}$, $\frac{1}{1000}$ de la valeur maximum.

Soit en effet I l'intensité du courant dans la partie principale du circuit; désignons par r la résistance du galvanomètre, et supposons une dérivation de résistance $\frac{r}{99}$ intercalée entre ses bornes. Si nous appelons i et i' les intensités des courants dans le galvanomètre et dans la dérivation, les relations

$$I = i + i'$$

$$ir = i' \frac{r}{99} \quad (927)$$

permettront de calculer i .

$$\text{On peut les écrire : } \frac{i}{r} = \frac{i'}{\frac{r}{99}} = \frac{I}{r}$$

$$\text{d'où } i = \frac{I}{100}.$$

Les résistances sont ajustées sur un socle E de manière qu'on puisse à volonté intercaler entre les bornes du galvanomètre une

quelconque des trois dérivations. Dans la disposition représentée (fig. 855), les trois extrémités des fils a_1 , a_2 , a_3 aboutissent ensemble à une plaque M qui porte l'une des bornes B du galvanomètre; à l'aide d'une cheville plantée en o_1 , o_2 ou o_3 , la deuxième extrémité de l'un des fils communique par le disque P avec la borne B'.

Pendant les tâtonnements qui précèdent une mesure, on place la cheville en o , ce qui intercepte tout passage du courant dans le galvanomètre, le courant suivant le chemin sans résistance BoB' .

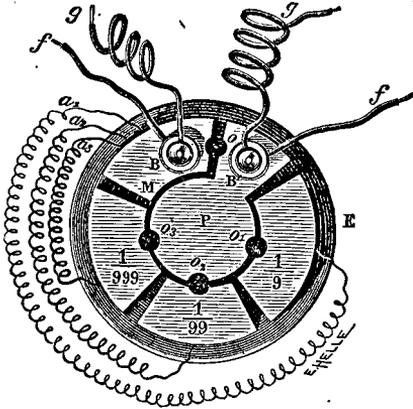


Fig. 855.

988. Galvanomètre à deux cadres. — On obtient une action

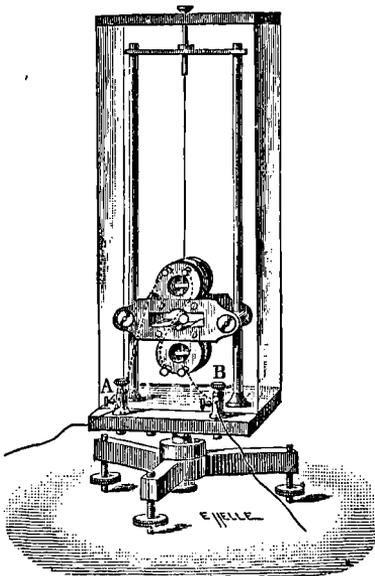


Fig. 856.

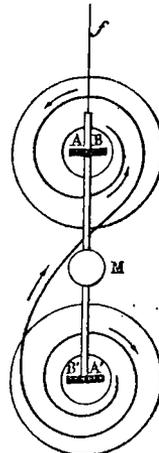


Fig. 857.

du courant plus énergique en plaçant chacune des deux aiguilles du système astatique au centre d'un cadre multiplicateur (fig. 856).

Les actions du courant concordent pour dévier du même côté le système astatique si le courant traverse les deux cadres en sens contraires (fig. 857).

989. Galvanomètre de Deprez et d'Arsonval (fig. 858). — Dans ce galvanomètre l'aimant est fixe et le multiplicateur mobile. Le multiplicateur, soutenu par un fil d'argent qui amène le courant,

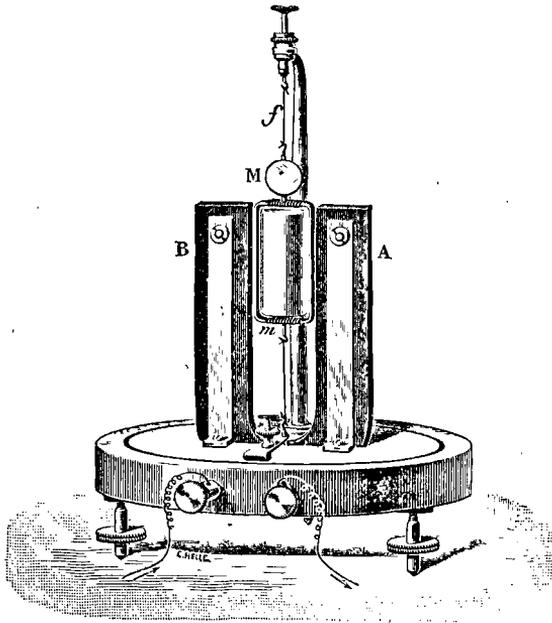


Fig. 858.

est disposé parallèlement à l'aimant qui est un fort aimant en fer à cheval. Quand on fait passer un courant dans le conducteur mobile, celui-ci tend à se mettre en croix avec l'aimant, de telle sorte qu'après la déviation le pôle nord de l'aimant se trouve à gauche du courant. Les déviations sont limitées par la torsion du fil suspenseur d'argent, elles sont mesurées par la méthode de la réflexion.

Pendant le déplacement du conducteur mobile, il s'y développe des courants induits énergiques (si la résistance totale du circuit est faible). Ces courants amortissent les oscillations, car ils s'opposent au déplacement d'après la loi de Lenz (1010). En enroulant le conducteur mobile sur un cadre rectangulaire en argent, les courants

induits développés dans le cadre métallique déterminent l'amortissement même à circuit ouvert.

990. Boussole des tangentes (fig. 859). — La boussole des tangentes donne l'intensité d'un courant en ampères.

Elle se compose d'un multiplicateur vertical *C*, orienté dans le méridien magnétique; en son centre est suspendu horizontalement un petit barreau aimanté.

Le barreau aimanté, de forme rectangulaire, est muni d'un index en aluminium qui lui est perpendiculaire et dont les points parcourent les divisions d'un cercle horizontal gradué. Une plaque épaisse de cuivre rouge *m*, parallèle au barreau, sert à amortir les oscillations; à cet effet, une vis *a* permet de la soulever et de la rapprocher du barreau.

Un fil de cocon, enroulé sur un treuil *b*, soutient le barreau que l'on fait reposer sur la plaque *m* pendant le transport de l'instrument.

Le cercle horizontal *H*, dont le centre se trouve sur l'axe vertical autour duquel peut tourner le cadre *C*, sert à orienter exactement le cadre dans le méridien magnétique.

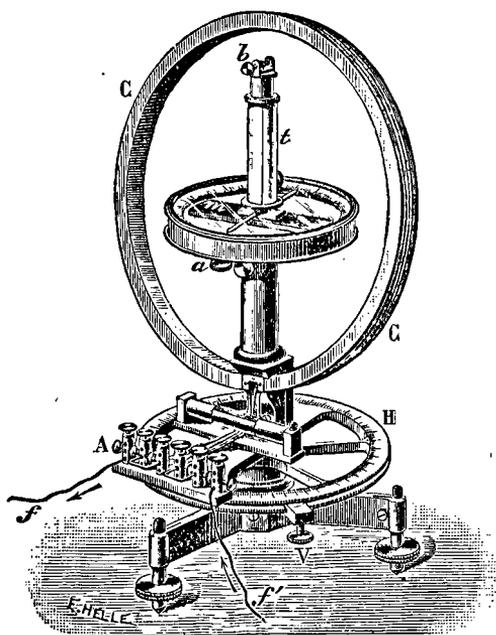


Fig. 859.

L'aimant est dévié quand un courant passe dans le multiplicateur : l'intensité du courant est proportionnelle à la tangente de la déviation.

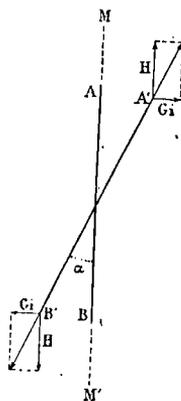


Fig. 860.

Démonstration. — Représentons par *MM'* l'intersection du plan du méridien magnétique avec le plan horizontal dans lequel tourne l'aimant.

Chacun des pôles de l'aimant est soumis à l'action : 1° d'une force F due au courant et perpendiculaire au plan du cadre ; 2° d'une force H due à l'action terrestre et parallèle au cadre.

Les deux forces F et H , qui agissent sur le pôle A' , ont une résultante ; les deux forces, égales et parallèles aux précédentes, qui agissent sur le pôle B' , ont une résultante égale et parallèle à la première. Quand l'aimant a atteint sa position d'équilibre, son axe magnétique a pris la direction commune des deux résultantes.

L'action F du multiplicateur est proportionnelle à l'intensité i du courant et peut être exprimée par Gi , en appelant G l'action exercée sur chacun des pôles lorsque le courant a une intensité d'un ampère. Gi et H forment les deux côtés de l'angle droit d'un triangle rectangle, la déviation α est l'angle aigu opposé à Gi (fig. 860).

$$Gi = H \operatorname{tg} \alpha$$

$$\text{d'où } i = \frac{H}{G} \operatorname{tg} \alpha.$$

Avec un autre courant, si G reste le même pour la déviation α' , $i' = \frac{H}{G} \operatorname{tg} \alpha'$ d'où $\frac{i}{i'} = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \alpha'}$. Les *tangentes des déviations* sont donc proportionnelles aux intensités.

G est une constante *propre à l'appareil*, qui dépend de l'aimantation de l'aiguille et des dimensions du cadre ; la *constance* de G pendant la déviation n'est réalisée que pour des cadres de grandes dimensions par rapport à la longueur de l'aiguille ou pour des déviations très petites, car on peut alors admettre que les pôles de l'aiguille conservent la même position par rapport au cadre dans les déviations successives, et que les diverses parties du courant exercent une action qui reste invariable.

Cas des petites déviations. — On peut dans ce cas écrire :

$$i = \frac{H}{G} \alpha, \quad i' = \frac{H}{G} \alpha'$$

$$\text{et par suite } \frac{i}{i'} = \frac{\alpha}{\alpha'}.$$

On mesure les très petites déviations par la méthode de la réflexion.

Valeur de $\frac{H}{G}$. — On démontre que, pour un cadre circulaire de

grand diamètre recouvert de n spires égales de rayon a , et pour une *petite* aiguille aimantée placée au centre du cadre :

$$G = \frac{2n\pi}{10a}, \quad i = \frac{10aH}{2n\pi} \operatorname{tg}\alpha;$$

i est exprimé en ampères, a en centimètres et H en unités magnétiques.

$$i = \frac{10aH}{2n\pi} \alpha \quad \text{pour de petites déviations.}$$

Dans les expériences où l'on a besoin de connaître l'intensité d'un courant en ampères, on fait usage d'une boussole des tangentes à cadre circulaire dont le rayon et le nombre des spires sont exactement connus.

C'est ainsi qu'on a opéré pour déterminer avec précision et une fois pour toutes la masse d'hydrogène ou de métal séparée par le passage d'un coulomb (942). Cette détermination une fois faite, on peut obtenir expérimentalement la constante d'une boussole quelconque en intercalant en même temps dans un circuit traversé par un courant cette boussole et un voltamètre à azotate d'argent.

Si nous désignons par m la masse d'argent déposée en un temps t , par I l'intensité du courant en ampères, l'équation

$$\frac{m}{It} = \frac{108}{96600} \quad (943)$$

$$\text{donnera : } I = \frac{m}{t} \cdot \frac{96600}{108} = \frac{H}{G} \operatorname{tg}\alpha;$$

l'observation de m et de α permettra de calculer $\frac{H}{G}$.

(991. **Ampèremètres.** — En faisant passer un même courant dans une boussole des tangentes B et dans un galvanomètre G , on pourra calculer, d'après les tangentes des déviations de la boussole, les intensités en ampères qui correspondent aux angles d'écart successifs de l'aiguille du galvanomètre.

Si la sensibilité du galvanomètre est beaucoup plus grande que celle de la boussole, le galvanomètre est placé en dérivation (fig. 861).

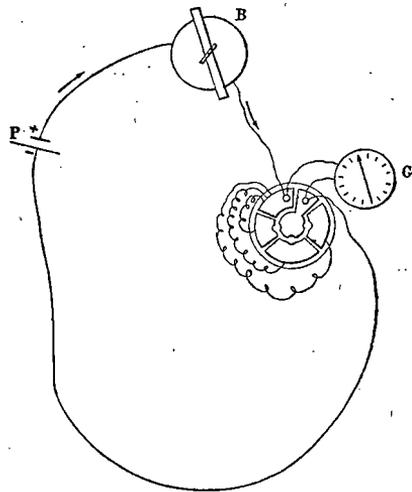


Fig. 861.

Habituellement, les galvanomètres industriels ou *ampèremètres* (fig. 862) sont formés d'une aiguille de fer doux aa' placée au centre du champ magnétique de deux aimants NS, N'S'; l'aiguille de fer doux s'aimante par influence et se dirige suivant les lignes de force du champ magnétique, c'est-à-dire parallèlement à la ligne des pôles. Autour de l'aiguille de fer

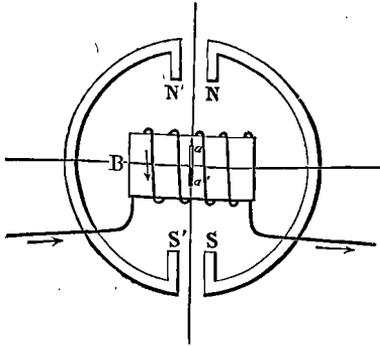


Fig. 862.

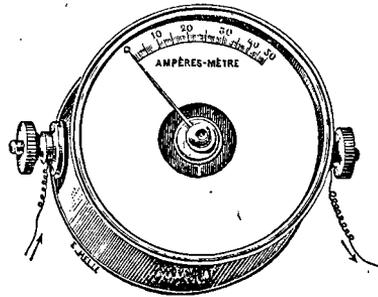


Fig. 863.

doux est enroulé un fil conducteur sur une bobine B; quand un courant traverse ce fil, l'aiguille tend à se placer suivant l'axe de la bobine, c'est-à-dire suivant la direction des lignes de force du courant, et comme l'action des aimants s'oppose à l'action du courant, l'aiguille ne s'oriente suivant l'axe de la bobine que si l'intensité du courant est très forte. Le cadran est gradué en ampères (fig. 863).

On gradue les *ampèremètres* en dirigeant un courant bien constant à la fois dans l'ampèremètre et dans un voltamètre à azotate d'argent. La masse m d'argent déposée en t secondes donne l'intensité I en ampères par la relation $\frac{m}{It} = \frac{108}{96\,600}$; on observe la déviation correspondante de l'ampèremètre, et on dresse un tableau indiquant les déviations en regard des intensités. Dans les ampèremètres, le fil de la bobine est *gros et court*, afin que l'appareil puisse rester intercalé dans un circuit sans apporter de résistance appréciable.

992. Voltmètres. — Un galvanomètre peut servir à mesurer les différences de potentiel entre deux points d'un circuit traversé par un courant. Il remplace dans ce cas un électromètre.

Plaçons-le en G (fig. 864), en *dérivation* entre deux points A et B d'un circuit; d'après la loi d'Ohm, le produit ri de l'intensité i du courant par la résistance r du galvanomètre est égal à la différence $a - b$ de potentiel entre A et B.

Si le galvanomètre était parcouru par une fraction appréciable du courant, la différence de potentiel ainsi obtenue ne serait pas la même que celle qui existait avant la mise en dérivation du galvanomètre, car la résistance de l'ensemble ADB et AGB est plus faible que la résistance primitive ADB.

Mais si le fil enroulé sur le cadre du galvanomètre est *très long et très fin* de façon à offrir une très grande résistance par rapport à ADB, la différence de potentiel entre A et B ne varie pas sensiblement. Le galvanomètre est alors appelé *voltmètre*. Un voltmètre ne diffère d'un ampèremètre que par la section du fil enroulé sur la bobine.

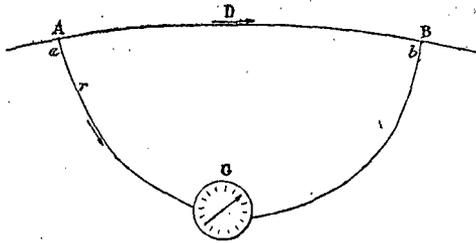


Fig. 864.

Pour *graduer un voltmètre*, on y fait passer des courants d'intensités variables, connues en ampères; en multipliant par la résistance intérieure du voltmètre en ohms, le produit donne en volts la différence de potentiel entre A et B qui correspond à la déviation observée de l'aiguille.)

Applications. — 1° Quelle résistance faut-il placer en dérivation aux bornes d'un galvanomètre de 792 ohms de résistance, pour réduire sa sensibilité à $\frac{1}{100}$?

2° En traversant un voltamètre à azotate d'argent, un courant dépose en une heure 6 grammes d'argent, une boussole des tangentes intercalée dans le même circuit donne une déviation de 45° ; quelle est la constante K de la boussole?

3° Une boussole des tangentes dont la résistance est 100 ohms, est parcourue par un courant qui produit une déviation de 45° . Quelle sera la nouvelle déviation si la boussole est munie d'une dérivation qui réduit sa sensibilité à $\frac{1}{100}$, la résistance de la pile étant 10 ohms?

4° La résistance d'un circuit étant 4 ohms, la déviation d'une boussole faisant partie du circuit est de 60° ; on intercale un fil de platine dans le circuit, la déviation tombe à 45° . Quelle est la résistance du fil de platine?

5° Un courant de 0,85 ampère parcourt le cadre d'une boussole des tangentes sur lequel sont enroulés trois tours de fil. Le cadre ayant 30 centimètres de diamètre et la composante horizontale du magnétisme terrestre au lieu de l'observation étant 0,196, quel sera l'angle de déviation?

6° Une boussole des tangentes donne une déviation de 30° à Hambourg où $H = 0,182$; quelle déviation donnera-t-elle à Trieste pour le même courant? A Trieste $H' = 0,220$.

7° Le circuit d'une pile renferme une résistance de 200 ohms et un galvanomètre de résistance inconnue. Ce galvanomètre marque une déviation de 2° quand on a inséré une dérivation de 10 ohms entre ses bornes. Cette dérivation étant supprimée, il faut remplacer la résistance de 200 ohms par 2200 ohms pour ramener la déviation à 2° . Quelle est la résistance du galvanomètre?

UNITÉS ÉLECTROMAGNÉTIQUES

993. Nous allons rappeler les définitions qui se rapportent aux unités choisies pour exprimer les grandeurs les plus fréquemment employées en électricité dynamique.

Ces grandeurs sont au nombre de 5 : intensité I , quantité Q , force électromotrice E , résistance R , capacité C ; elles sont liées entre elles par quatre relations que nous avons établies :

$$\begin{aligned} Q &= It \\ JW &= EIt \quad (1) \\ I &= \frac{E}{R} \\ Q &= CE. \end{aligned}$$

On ajoute une cinquième relation qui sert à définir l'unité d'intensité $10\mu l = sI$ (972). Les unités sont choisies de façon à rendre dans ces équations les coefficients de proportionnalité égaux à l'unité (135).

Unité d'intensité. — L'unité d'intensité d'un courant est appelée *ampère*. On choisit pour unité d'intensité l'intensité que doit avoir un courant qui parcourt le contour d'une surface de 1 centimètre carré pour que le moment de l'aimant équivalent soit égal à $\frac{1}{10}$, μ étant exprimé en unités magnétiques et l en centimètres.

L'unité d'intensité de courant est ainsi liée à l'unité de masse magnétique. Il en est de même des unités relatives aux quatre autres grandeurs, car elles se déduisent des relations (1) et dépendent de l'unité d'intensité. De là vient le nom d'*unités électromagnétiques*.

Unité de magnétisme. — D'après la loi de Coulomb, $F = \frac{\mu\mu'}{d^2}$, l'unité de magnétisme est la quantité de magnétisme que devrait renfermer un pôle pour exercer dans l'air sur un autre pôle identique distant de 1 centimètre une action égale à une dyne (856).

Unité de quantité (définie d'après la relation $Q = It$). — C'est la quantité d'électricité qui traverse en une seconde une section transversale d'un circuit parcouru par un courant dont l'intensité est un ampère⁽¹⁾. Cette unité de quantité est appelée *coulomb*. Un coulomb sépare dans un voltamètre $\frac{1}{96600}$ de gramme d'hydrogène (909).

(1) On démontre qu'un courant d'un ampère parcourant une circonférence de un centimètre de rayon exerce une action égale à $\frac{2\pi}{10}$ dynes sur un pôle ayant l'unité de magnétisme et situé au centre de la circonférence. Cette action est perpendiculaire au plan du cercle (971); une portion de ce courant ayant un centimètre de longueur et appartenant à cette circonférence exerce sur ce pôle une action égale à $\frac{1}{10}$ de dyne.

Un courant d'un ampère débite 3600 coulombs par heure (cette quantité s'appelle *ampère-heure*).

Unité de force électromotrice (définie d'après la relation $JW = EIt$). — L'unité de force électromotrice est appelée *volt*. C'est la différence de potentiel que doivent présenter les extrémités d'un conducteur traversé par un ampère pour que le travail électrique développé en une seconde dans ce conducteur soit égal à un joule ⁽¹⁾.

La force électromotrice d'un élément Daniell est égale à 1^r,1. C'est la différence de potentiel aux deux pôles de l'élément. C'est aussi le nombre de joules que développe un coulomb en parcourant le circuit de l'élément.

Avec ces unités d'intensité et de force électromotrice, le *travail électrique* développé en une seconde dans un conducteur parcouru par un courant constant est représenté en joules par un produit E volts \times I ampères (hauteur de chute \times débit).

Unité de résistance (définie d'après la relation $I = \frac{E}{R}$). — L'unité de résistance est appelée *ohm*. C'est la résistance que doit avoir un conducteur pour qu'il présente une différence de potentiel d'un volt quand il est parcouru par un courant d'un ampère.

L'ohm peut être représenté matériellement; c'est la résistance d'une colonne de mercure pur à 0°, de 106,3 centimètres de longueur, et de 1 millimètre carré de section. Un ohm vaut environ 50 mètres de fil de cuivre recuit de 1 millimètre de diamètre.

Un *mégohm* vaut un million d'ohms, un *microhm* est la millionième partie d'un ohm.

Unité de capacité (définie d'après la relation $Q = CE$). — L'unité de capacité est le *farad*. C'est la capacité d'un conducteur auquel il faut donner une charge d'un coulomb pour élever son potentiel d'un volt. La charge d'un conducteur évaluée en coulombs est égale au produit de sa capacité en farads par son potentiel en volts.

Un *microfarad* est la millionième partie d'un farad.

Le farad peut être représenté matériellement.

(1) Plus généralement, un volt est la *force électromotrice d'un électromoteur* qui communique une énergie d'un joule à un coulomb traversant son circuit. La force électromotrice d'un élément de pile est en même temps égale à la différence de potentiel aux deux pôles de l'élément en circuit ouvert.

Les noms attribués aux unités des diverses grandeurs précédentes rappellent les physiciens qui ont le plus contribué à la formation de la science électrique: Volta, Ampère, Coulomb, Ohm, Faraday.

AIMANTATION PAR LES COURANTS

994. Aimantation de l'acier. — Un courant électrique produit autour de lui un champ magnétique. Un corps magnétique placé dans ce champ s'aimante comme il s'aimanterait dans un champ magnétique dû à un aimant. *L'axe magnétique de l'aimant formé est dirigé suivant les lignes de force du champ.*

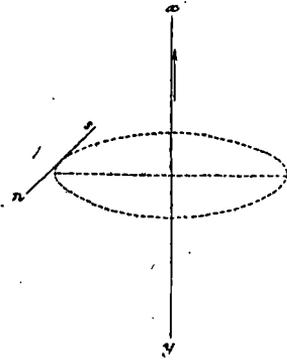


Fig. 865.

Si l'on met une aiguille d'acier en croix avec un courant électrique, celui-ci transforme l'aiguille en un aimant dont les pôles se placent comme ceux d'un aimant libre soumis à l'action du courant (970), le pôle nord de l'aimant créé étant à la gauche du courant (fig. 865).

Si le barreau est placé suivant l'axe d'un cadre rectangulaire ou circulaire recouvert de fil parcouru par un courant, toutes les spires agissent en concordance (983); l'aimantation augmente avec le nombre des spires et avec l'intensité du courant. D'après cela, on détermine une aimantation énergique en plaçant le barreau à l'inté-

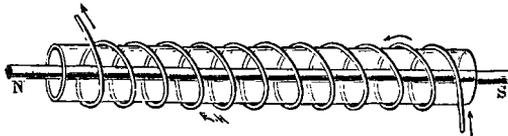


Fig. 866.

rieur d'un tube de verre creux sur lequel est enroulé en hélice un fil traversé par un courant. Les lignes de force du champ magnétique du courant sont parallèles à l'axe de la spirale à l'intérieur de celle-ci;

le sens de l'aimantation est tel que les lignes de force de l'aimant prennent la direction des lignes de force de la spirale magnétisante.

Les pôles du noyau aimanté sont de même signe que ceux des mêmes extrémités de la bobine magnétisante (fig. 866). *Le pôle nord se trouve à l'extrémité de la bobine en face de laquelle on doit se placer pour voir le courant circuler en sens inverse du mouvement des aiguilles d'une montre.* Si l'on change le sens du courant, on change aussi le sens de l'aimantation.

Points conséquents. — Si, après avoir enroulé d'abord le fil conducteur dans un certain sens, on change le sens de l'enroulement

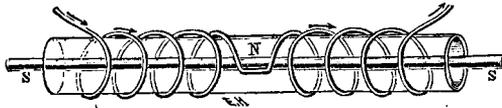


Fig. 867.

(fig. 867), une aiguille d'acier placée dans le tube pendant le passage d'un courant présente, outre les pôles des extrémités, autant de points conséquents qu'il y a de changements de sens.

995. Aimantation du fer doux. — Un barreau de fer doux, placé dans l'intérieur d'une bobine parcourue par un courant, s'aimante comme un barreau d'acier; mais son aimantation cesse presque entièrement avec le courant.

Électroaimants. — La propriété que présente le fer doux de s'aimanter *temporairement* dans une bobine pendant le passage du courant, est utilisée dans la construction des électroaimants.

Un électroaimant consiste en un noyau de fer doux sur lequel s'enroule un fil de cuivre dont les différentes spires sont bien isolées les unes des autres par une enveloppe de soie et dont les extrémités sont reliées aux pôles d'une pile. Dès que le courant passe, le barreau s'aimante, un pôle nord prend naissance à l'une des extrémités, un pôle sud à l'autre extrémité. *L'aimantation cesse avec le courant d'excitation.*

Une des formes les plus usuelles des électroaimants est la forme de fer à cheval. Un fil de cuivre isolé s'enroule sur chacune des extrémités et passe d'une branche à l'autre sans recouvrir la partie courbe. L'enroulement doit avoir lieu sur les deux branches de façon que les actions soient concordantes. Sur le noyau redressé le sens de l'en-

roulement paraîtrait le même, mais il offre des sens contraires à un observateur qui voit à la fois les deux extrémités (fig. 868).

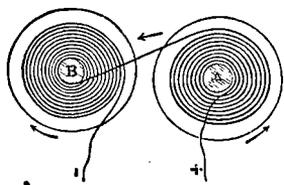


Fig. 868.

Les électroaimants peuvent acquérir une puissance *bien supérieure* à celle des barreaux d'acier ; ils servent à produire les champs magnétiques les plus intenses.

En outre, leur aimantation peut être modifiée à volonté, en ouvrant, fermant, diminuant, augmentant, renversant le courant. La figure 869 représente un électroaimant entre les pôles duquel est suspendu par un fil

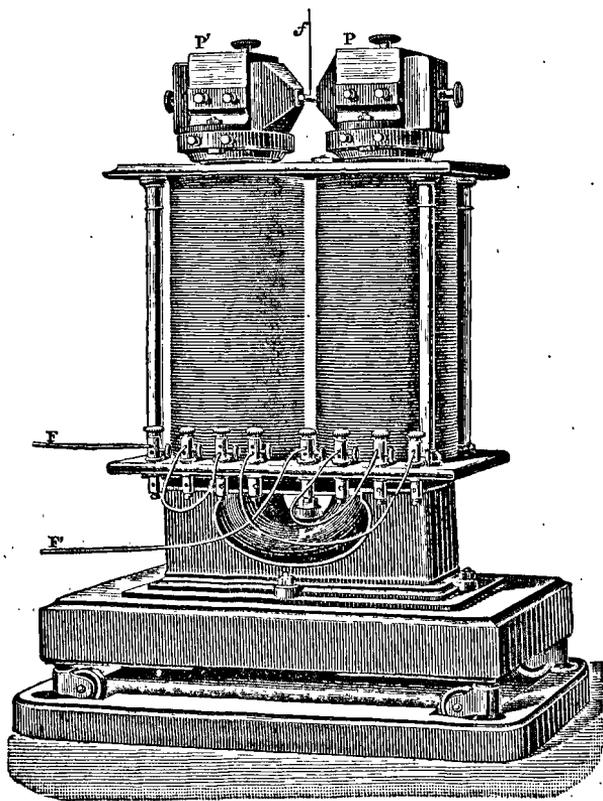


Fig. 869.

f un barreau de bismuth qui se dirige perpendiculairement aux lignes de force magnétiques (866).

On rend manifeste la puissance des électroaimants en réunissant.

les deux pôles par une pièce de fer doux K ou *armature* à laquelle on peut faire porter une charge considérable lorsque le courant passe

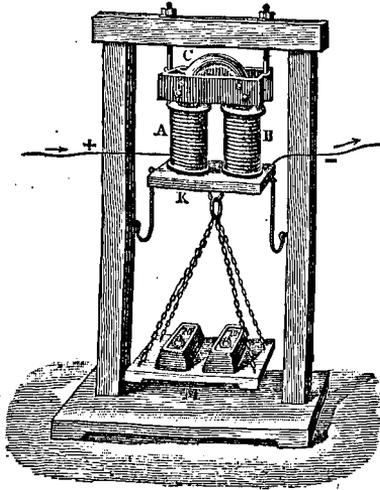


Fig. 870.

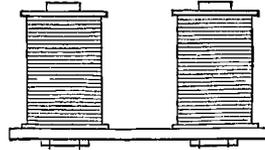


Fig. 871.

dans la bobine magnétisante (fig. 870).

Au lieu de courber en fer à cheval le barreau de l'électroaimant, on se contente souvent de fixer sur une traverse de fer doux, appelée *culasse*, deux noyaux de fer doux parallèles (fig. 871); on enroule le fil du courant successivement sur chacun des noyaux.

Magnétisme rémanent. — On nomme ainsi une aimantation faible que conserve le fer d'un électroaimant après l'interruption du courant. Il se présente surtout avec les fers qui ne sont pas très purs. Quand l'armature vient en contact direct avec le noyau de l'électroaimant, le magnétisme rémanent empêche l'armature de se détacher. On évite cette adhérence en interposant une feuille de carton entre l'électroaimant et son armature.

Loi des électroaimants. — Quand le noyau est loin de sa saturation, le degré d'aimantation d'un électroaimant est proportionnel à la force magnétisante du courant qui circule dans la bobine. Cette *force magnétisante* est indépendante de la section du fil et de sa nature; elle est proportionnelle à l'intensité I du courant et au nombre n des spires constituant la bobine. Un courant de 25 ampères circulant dans 4 spires développe la même force magnétisante qu'un seul ampère parcourant 100 spires. Dans les deux cas la force magnétisante est dite de 100 *ampères-tours* (le produit nI se nomme le nombre d'ampères-tours). $\psi = \mathcal{K}nI$

Choix du fil d'un électroaimant. — Si l'on intercale un électroaimant dans un circuit dont la force électromotrice et la résistance sont données, l'électroaimant agit par son fil pour augmenter la résistance du circuit et diminuer

l'intensité du courant; il en résulte que l'accroissement du nombre des spires n'a pas toujours pour résultat d'augmenter la puissance de l'électroaimant. Dans un circuit très résistant, l'accroissement du nombre des spires ne donne lieu qu'à une faible diminution de l'intensité et il y a alors avantage à employer des hélices magnétisantes à fil long et fin. Dans un circuit peu résistant l'effet magnétisant de chaque spire éprouvera une diminution très notable si l'on accroît beaucoup leur nombre.

996. Flux de force d'un électroaimant. Perméabilité magnétique. — L'introduction d'un barreau de fer doux dans une bobine parcourue par un courant a pour effet d'augmenter considéra-

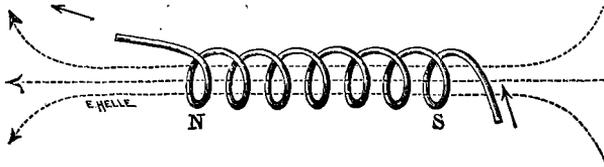


Fig. 872.

blement le nombre des lignes de force ou le *flux de force* qui traverse la bobine (fig. 872 et 873).

Par analogie avec ce qui se passe pour un solénoïde (975) sans noyau de fer, où les lignes de force sont des *courbes fermées* traver-

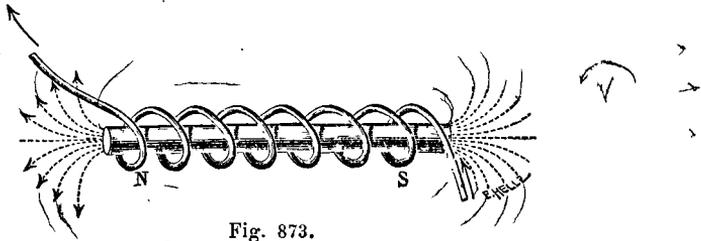


Fig. 873.

sant l'intérieur en ligne droite, on admet ici que les lignes de force extérieures à l'électroaimant se continuent dans le noyau en suivant son axe, exactement comme elles traversent un solénoïde sans noyau. Ce flux mesure l'intensité de l'aimantation (887).

Supposons un noyau de diamètre suffisant pour remplir *exactement* une bobine, on appelle *coefficient de perméabilité* du fer le rapport entre le flux qui traverse la bobine lorsqu'elle renferme le noyau et le flux qui la traversait avant l'introduction du noyau.

Le coefficient de perméabilité du fer varie de 100 à 3000.

Par exemple, dans une bobine longue, on démontre que le flux de

force (exprimé en unités magnétiques) est égal à $\frac{4\pi nIS}{10l}$, avant l'introduction d'un noyau : n étant le nombre total des spires, l la longueur de la bobine, S sa section, I l'intensité du courant en ampères; après l'introduction d'un barreau de même section, le flux devient $\frac{4\pi nIS\mu}{10l}$; μ est le coefficient de perméabilité magnétique.

(997. Comparaison d'un solénoïde et d'un aimant creux. — Un cylindre de fer doux placé à l'intérieur d'un solénoïde traversé par un courant s'aimante comme le solénoïde (fig. 874), son pôle sud siégeant à la même

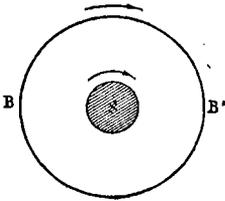


Fig. 874.

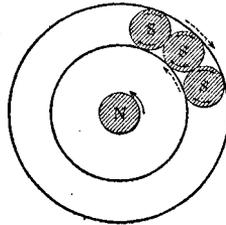


Fig. 875.

extrémité que le pôle sud du solénoïde, mais le même cylindre de fer doux introduit dans un aimant creux s'aimante en sens inverse de l'aimant.

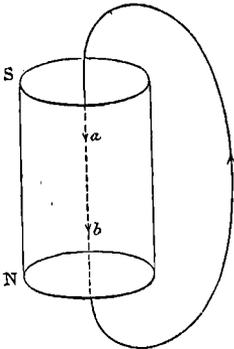


Fig. 876.

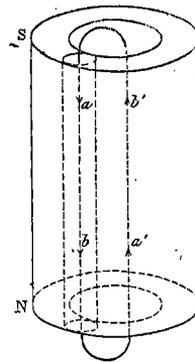


Fig. 877.

Cette différence s'explique par l'assimilation d'un aimant à un *faisceau* de solénoïdes (981). Les courants intérieurs de l'aimant creux, les plus voisins du fer doux introduit, sont en effet opposés aux courants extérieurs (fig. 875).

La considération des lignes de force magnétiques conduit à la même conséquence.

La direction des lignes de force qui détermine le sens de l'aimantation est inverse à l'intérieur du solénoïde (en *ab*) (fig. 876) et à l'intérieur d'un aimant creux (en *a'b'*) (fig. 877).

998. Circuit magnétique. — On admet que les lignes de force des électroaimants forment des courbes fermées (883) : on donne le nom de circuit magnétique au trajet qu'elles parcourent. Le flux de force qui parcourt un circuit magnétique est le même dans tout ce circuit; il est lié à la force magnétisante et à la composition du circuit par une relation qui a la forme de la loi d'Ohm :

$$\Phi = K \frac{nI}{\sum \frac{l}{\mu s}}$$

cette relation exprime que le flux magnétique est égal au quotient de la force magnétisante KnI par la résistance magnétique.

La résistance magnétique est la somme des résistances magnétiques du circuit; si le circuit est formé d'un anneau d'égale section sur toute sa circonférence, de longueur l , de section s , et de perméabilité μ , sa résistance magnétique est $\frac{l}{\mu s}$; la résistance est $\sum \frac{l}{\mu s}$, si le circuit comprend diverses portions de longueurs, sections et perméabilités différentes.

A cause de sa faible perméabilité, un intervalle d'air réduit dans une forte proportion le flux magnétique qui parcourt un circuit magnétique (925).

999. Différence entre un aimant et un électroaimant. — Dans un aimant permanent en acier, le flux magnétique est fixe. Quand on approche une armature d'un aimant permanent en fer à cheval, le flux de force parcourt l'armature au lieu de s'épanouir dans l'air à la sortie des branches.

Dans le cas d'un électroaimant, pour une même force magnétisante, le flux n'est pas fixe. En approchant une armature d'un électroaimant, on diminue la résistance magnétique du circuit (998), et on augmente ainsi notablement le flux qui passe à travers le noyau de l'électroaimant.)

APPLICATIONS DES ÉLECTROAIMANTS

1000. Sonnerie électrique à trembleur. — *Description.* — Un électroaimant en fer à cheval est assujéti sur une planchette verticale. En face de ses pôles est disposée une armature de fer doux *e* que supporte une lame métallique élastique fixée inférieurement. L'armature se prolonge par une tige munie d'un marteau *M* qui peut frapper un timbre *T*. Au repos, le fer doux se trouve à une petite distance de l'électroaimant, et la lame élastique le maintient appuyé contre un ressort *r* qui établit la communication avec l'un des pôles

d'une pile. La lame élastique communique avec l'autre pôle de la pile par le fil de l'électroaimant (fig. 878).

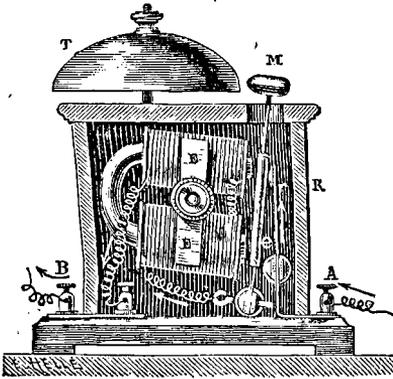


Fig. 878.

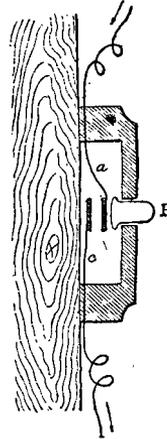


Fig. 879.

Fonctionnement. — Quand le circuit de la pile est fermé, le courant arrive en A, passe par le ressort *r* et la pièce de fer doux *e*, traverse le fil de l'électroaimant et retourne à la pile par B ; mais le passage du courant aimante l'électroaimant qui attire le fer doux *e* et l'écarte du ressort *r*. Le courant est alors interrompu, l'électroaimant se désaimante, et l'attraction cesse ; par l'action de la lame élastique, le contact se rétablit entre le fer doux et le ressort, ce qui ferme de nouveau le circuit et ainsi de suite. On obtient une succession de chocs contre le timbre qui peut servir d'avertissement.

Pour faire fonctionner la sonnerie d'un point situé à distance, on la fait communiquer avec la pile par un fil qui passe en ce point et y présente une interruption ; il suffit, pour produire un appel, de fermer le circuit en appuyant sur un bouton P qui met en contact les deux tronçons *a* et *c* du fil (fig. 879).

1001. Télégraphie électrique. — C'est sur le fait de l'aimantation du fer doux par le passage d'un courant et de sa désaimantation lors de l'interruption qu'est fondé le télégraphe électrique.

L'ensemble d'un télégraphe électrique comprend : 1° une *pile* ; 2° des fils métalliques ou *fils de ligne* reliant les stations ; 3° un *manipulateur* servant à produire les signaux ; 4° un *récepteur* recevant les signaux.

Pile. — On se sert de piles formées d'un grand nombre d'éléments Daniell disposés *en série*. Ces éléments donnent un courant très constant ; leur résistance est sans inconvénient, car le circuit télégraphique est lui-même habituellement résistant (926, I).

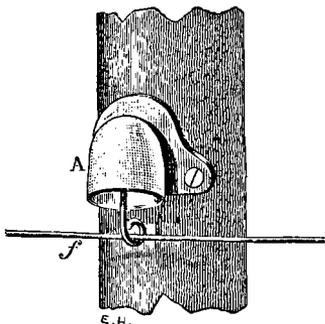


Fig. 880.

Fil de ligne. — Au lieu de fil de cuivre, dont le prix est élevé et la résistance à la rupture insuffisante, on emploie souvent un fil de fer de 4 millimètres de diamètre. Ce fil *f* réunit le manipulateur de la station de départ au récepteur de la station d'arrivée. Il est fixé sur des poteaux (fig. 880) à l'aide de pièces isolantes en porcelaine *A*. La résistance de ce fil est de 10 ohms environ par kilomètre.

Manipulateur de Morse (fig. 881). — C'est un interrupteur de courant de forme très simple. Il consiste en un levier métallique mobile autour d'un axe horizontal *A* qui est en communication permanente avec le fil de ligne

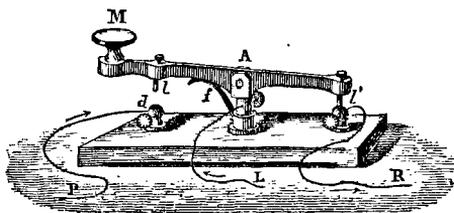


Fig. 881.

L ; une borne *d* fixée sur le socle de l'appareil communique avec le pôle positif de la pile. Un ressort *f* maintient le levier à distance de la borne *d*. Quand on appuie sur la poignée *M*, le levier s'abaisse, et une pointe métallique *l* vient toucher la borne *d* et fermer le circuit. En appuyant sur la poignée pendant un temps variable, on envoie dans le fil de ligne un courant plus ou moins long.

En appuyant sur la poignée pendant un temps variable, on envoie dans le fil de ligne un courant plus ou moins long.

Récepteur de Morse (fig. 882). — C'est l'appareil qui inscrit les signaux envoyés par le manipulateur. Il se compose d'un levier horizontal *MN*, dont une extrémité porte une pièce de fer doux *D* qui sert d'armature à un électroaimant vertical. Le levier oscille autour d'un axe fixe *O*, et se termine par une pointe *p* qui lui est adaptée obliquement (fig. 883). Quand le courant passe dans l'électroaimant, celui-ci s'aimante, attire l'armature et fait basculer le levier autour de son axe ; la pointe sèche *p* de l'extrémité du levier est soulevée contre un

ruban de papier AC emmagasiné sur un dévidoir et entraîné entre deux cylindres pleins E et F qui tournent autour de leurs axes par l'action d'un appareil d'horlogerie contenu dans la boîte K. Par la

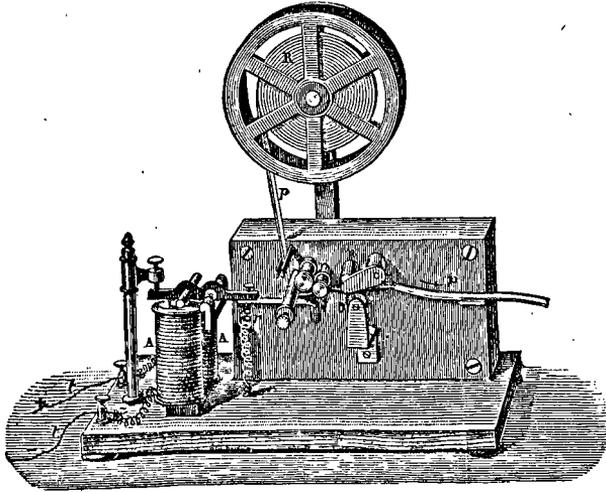


Fig. 882.

pression de la pointe, la bande de papier s'appuie contre une petite roue *m* ou *molette* imprégnée d'encre d'imprimerie qui trace sur le papier des traits d'une longueur variable avec la durée de l'attraction

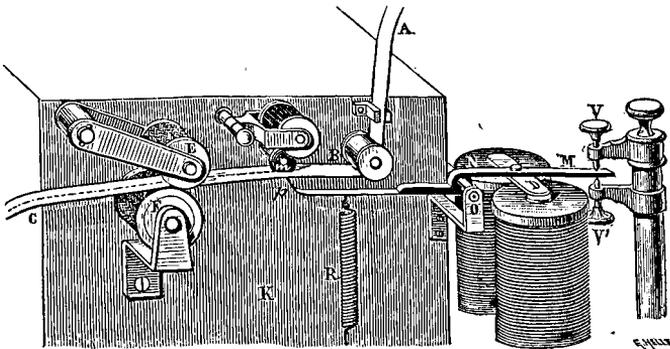


Fig. 883.

de l'armature. La molette est encrée par un tampon en feutre qui repose sur elle. Le guide B, très mobile sur son axe, maintient la bande A tendue au-dessous de la molette.

L'électroaimant se désaimante dès que le courant n'y passe plus. Un ressort antagoniste R maintient alors la pointe p à distance de la bande de papier en ramenant le levier à sa position normale.

Pour que le jeu du levier n'ait pas trop d'amplitude, on le limite à l'aide de vis V et V' entre lesquelles vient buter le prolongement du levier.

Signes. — On n'emploie que deux signes différents : le *point* qui correspond à un passage du courant extrêmement court, et le *trait*, plus étendu, auquel on donne toujours la même longueur. En combinant ces deux signes de différentes manières, on forme un alphabet de convention. Les mots sont séparés par un intervalle plus grand que les signes qui forment les lettres.

Les signaux Morse peuvent être entendus sans être inscrits. Le seul choc de l'armature contre les butoirs produit un son intelligible pour l'employé exercé qui sait distinguer les signaux longs et les signaux courts. Dans le cas où l'inscription de la dépêche n'a pas d'utilité, le récepteur peut ainsi être réduit à un électroaimant muni de son armature.

Communication par un seul fil. — Un seul fil suffit pour établir une communication télégraphique entre deux stations. A la station de départ, on joint le pôle négatif de la pile à la terre par une plaque de cuivre qui plonge dans l'eau d'un puits. Le pôle positif va au manipulateur. Un fil de ligne *isolé* réunit le manipulateur au récepteur de la station d'arrivée. A la sortie du récepteur, le fil se termine par une plaque de cuivre plongeant aussi dans l'eau d'un puits. Cette disposition procure l'économie de la moitié du fil, et a aussi l'avantage de permettre l'emploi de piles moins puissantes, car la terre offre moins de résistance au courant qu'un fil métallique ayant la longueur de la ligne.

Installation des postes télégraphiques (fig. 884). — Deux stations télégraphiques sont réunies par un fil de ligne. Chacune des stations comprend une pile, un récepteur et un manipulateur, et peut successivement lancer ou recevoir une dépêche.

Si le manipulateur est au repos à la station B et abaissé à la station A, le courant passe de la pile P au levier b , puis en i au fil de ligne ll' , gagne le récepteur de la station B en passant par i' et d' et enfin se rend au sol. Le contact c' est attiré, et la pointe p' appuie contre la molette m' . Dans ces conditions, la station B *reçoit une dépêche*.

Si le manipulateur était au repos à la station A et abaissé à la station B, le courant de la pile P' irait animer l'électroaimant du récepteur de la station A; la station B *enverrait une dépêche*.

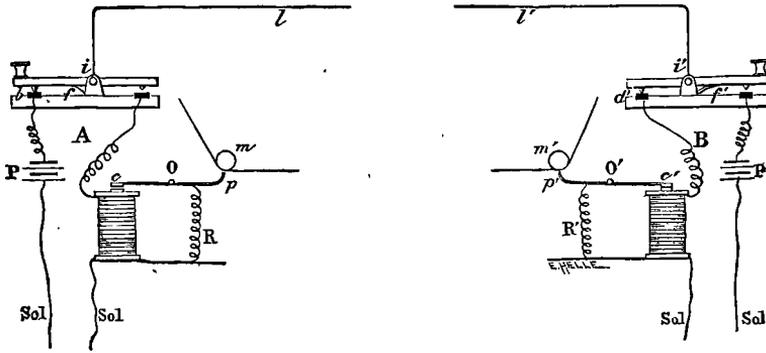


Fig. 884.

Câbles souterrains et sous-marins. — Le fil des lignes souterraines est formé de plusieurs fils de cuivre tordus ensemble et recouverts d'une couche épaisse de gutta-percha que protège une enveloppe de plomb.

Les câbles des lignes sous-marines (fig. 885) sont formés d'un faisceau de sept fils de cuivre C assemblés en cordelette, recouverts d'une épaisse couche isolante G et protégés par un revêtement extérieur de fils de fer F. Ces derniers sont environnés chacun d'un ruban de chanvre goudronné et tournés en spirale autour du noyau du câble.

Un câble sous-marin forme un vaste *condensateur* dont le conducteur central est l'armature interne, et l'enveloppe métallique protectrice l'armature externe. Ce conducteur doit se charger avant que le courant puisse parvenir au récepteur. Il en résulte un grand ralentissement dans la transmission. On prend dans ce cas un récepteur très sensible : c'est un galvanomètre à miroir. Un manipulateur à la station de départ met le fil de ligne en communication tantôt avec le pôle positif, tantôt avec le pôle négatif de la pile, ce qui donne des déviations à droite et à gauche que l'on fait correspondre au point et au trait de l'alphabet Morse pour former avec les mêmes conventions les lettres de l'alphabet.

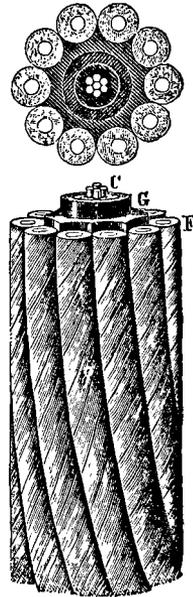


Fig. 885.

Transmetteur multiple. — Pour augmenter le nombre des dépêches transmises en un temps donné, on fait usage de transmetteurs multiples qui permettent d'envoyer en même temps plusieurs dépêches par le même fil.

A la station de départ, un distributeur met tour à tour en communication avec le fil de ligne pendant des temps très courts six manipulateurs manœuvrés chacun par un employé; six dépêches se suivent sur la ligne.

A la station d'arrivée, un distributeur répartit entre six récepteurs distincts les portions respectives de chacune des dépêches.

Applications. — 1° Une bobine a 50 centimètres de longueur et 2 centimètres de diamètre; elle est couverte de 300 tours de fil; on y fait passer un courant de 2 ampères. Quelle est la valeur du flux de force intérieur?

2° Dans quel rapport croît le moment magnétique d'un électroaimant, si l'on porte le nombre des tours de fil de 200 à 750, l'intensité du courant ne variant pas?

3° Le courant d'une pile de 12 éléments Daniell disposés en série traverse un fil télégraphique de 120 ohms. Quelle est l'intensité? Résistance intérieure d'un élément, 0,6 ohms; force électromotrice 1,1 volts.

4° La résistance spécifique de la gutta-percha étant $2 \cdot 10^{14}$, calculer le nombre de coulombs qui traverseront en un siècle une lame de gutta-percha de 1 centimètre d'épaisseur et de 1 mètre carré de surface, dont les deux faces sont recouvertes d'étain et reliées aux deux pôles d'une pile de 100 éléments Daniell.

5° On a 54 éléments de force électromotrice 1v,1 et d'une résistance de 2 ohms; comment faut-il les grouper pour avoir le courant maximum dans une ligne télégraphique de 12 ohms?

6° Un fil de ligne a une résistance de 100 ohms entre deux stations S et S'. En S il est relié à une pile d'une force électromotrice de 50 volts et d'une résistance intérieure de 10 ohms; en S' il se termine par un récepteur d'une résistance de 20 ohms. Au milieu du fil, un accident a établi une communication imparfaite avec le sol d'une résistance de 10 ohms. — Quelle était l'intensité du courant avant l'accident? Quelle sera l'intensité I_1 du courant entre la pile et le lieu de l'accident? Quelle sera l'intensité i_1 du courant auprès du récepteur?

INDUCTION

On donne le nom de *courant induit* à un courant *développé* dans un circuit, *sous l'influence de courants ou d'aimants*.

INDUCTION PAR LES COURANTS

1002. Soient deux conducteurs parallèles B et B' (fig. 886). Le premier B est intercalé dans un circuit *inducteur* qui renferme une pile P et un interrupteur *g*; le second B' appartient à un circuit *induit* fermé sur lui-même sans pile et comprenant un galvanomètre G.

I. **Induction par fermeture ou ouverture.** — Quand on établit un courant dans le conducteur B en fermant son circuit, un courant

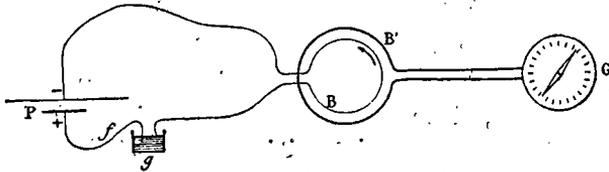


Fig. 886.

de durée très courte circule dans B' en sens inverse du courant inducteur. Ce courant inverse est appelé *courant induit de fermeture*.

L'aiguille du galvanomètre n'est déviée que momentanément; elle revient au zéro et demeure fixe aussi longtemps que le courant reste établi sans changement en B.

Si l'on interrompt le courant inducteur, l'aiguille du galvanomètre est déviée de nouveau dans le circuit B'. Ce *courant induit de rupture*, de durée très courte, est **direct**, ou de même sens que le courant inducteur.

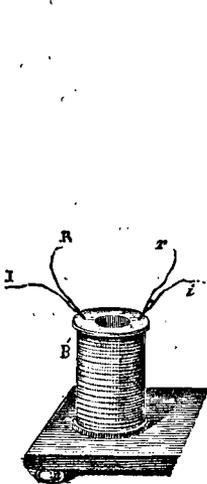


Fig. 887.

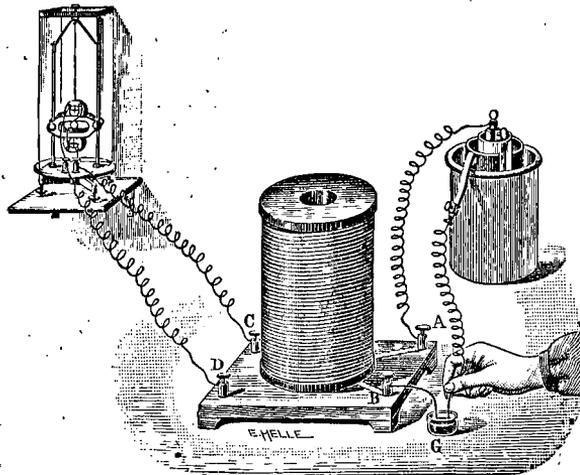


Fig. 888.

Les phénomènes sont aisés à produire avec des circuits inducteur et induit formés chacun d'un fil très long, recouvert de soie et enroulés sur une même bobine B' (fig. 887). Dans la figure 888, le circuit de la pile communique par les bornes A et B à la bobine

inductrice, le fil de la bobine induite est relié au galvanomètre par les bornes C et D. Les courants induits croissent avec l'intensité du courant inducteur et avec la longueur des fils enroulés sur la bobine.

II. Induction par accroissement ou diminution d'intensité.

— Si le circuit inducteur comprend une résistance que l'on peut faire varier rapidement, il se produit dans le circuit induit un courant inverse quand on augmente l'intensité du courant inducteur, un courant direct quand on diminue son intensité.

Le premier groupe d'expériences était un cas particulier du second ; en effet, fermer un courant inducteur, c'est faire croître son intensité à partir de zéro ; l'ouvrir, c'est réduire son intensité à zéro.

III. Induction par approche ou éloignement. — Le courant inducteur étant établi, si l'on éloigne la bobine induite, elle devient

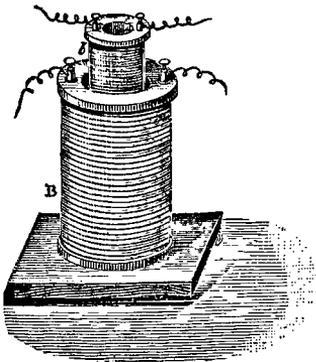


Fig. 889.

siège d'un courant induit direct qui dure aussi longtemps que le mouvement d'éloignement. Par le rapprochement des bobines, la bobine induite devient le siège d'un courant induit inverse qui dure aussi longtemps que le mouvement de rapprochement. L'expérience se fait soit avec une bobine *b* qui s'engage dans une autre de plus grand diamètre B (fig. 889), soit avec deux spirales plates.

L'aiguille du galvanomètre se maintient au zéro tant que la distance des deux bobines demeure constante.

En résumé, tout courant qui *commence, augmente d'intensité* ou *s'approche* fait naître dans un circuit voisin parallèle un courant induit **inverse** du sien.

Tout courant qui *finit, diminue d'intensité* ou *s'éloigne* fait naître dans un circuit parallèle un courant induit **direct**.

INDUCTION PAR LES AIMANTS

1003. Puisqu'un aimant se comporte comme un solénoïde, l'induction par les aimants résulte de l'induction par les courants.

I. Induction par approche ou éloignement. — A l'intérieur d'une bobine creuse reliée à un galvanomètre, introduisons par son pôle sud un solénoïde communiquant avec une pile. La bobine est alors parcourue par un courant induit inverse de celui du solénoïde (fig. 890). Un courant induit direct y prend naissance quand on retire le solénoïde. C'est ce que nous avons constaté plus haut.

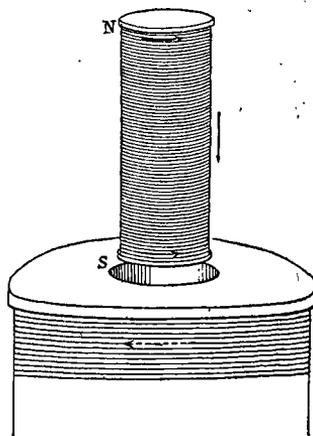


Fig. 890.

Remplaçons le solénoïde par un aimant. Si l'aimant est introduit dans la bobine par son pôle sud, le courant induit a le même sens qu'avec le pôle sud d'un solénoïde, il est inverse des courants particuliers de l'aimant (981). On a un courant induit direct en éloignant l'aimant.

II. Induction par aimantation ou désaimantation. — Un courant induit prend encore naissance dans une bobine quand on

aimante un noyau de fer doux qui occupe son axe; ce courant induit est inverse des courants du noyau. L'aimantation du noyau peut être produite en approchant de son extrémité un des pôles d'un aimant (fig. 891). On a un courant induit direct si on fait disparaître l'aimantation du noyau en éloignant l'aimant.

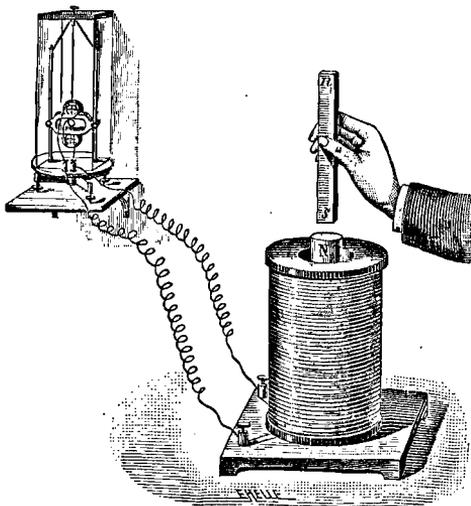


Fig. 891.

On peut encore produire l'aimantation d'un noyau de fer doux en le logeant dans une bobine à deux fils, dont l'un sera parcouru par un courant et jouera le rôle d'hélice magnétisante, et dont l'autre servira de fil induit. Les courants particuliers du fer doux et ceux de l'hélice magnétisante qui l'entoure

sont de même sens ; ils *ajoutent leurs effets* inducteurs sur la bobine induite.

Relativement au courant de l'hélice magnétisante, les courants induits sont directs à l'ouverture, inverses à la fermeture ; on constate qu'*avec le noyau* de fer doux intérieur les courants induits sont *beaucoup plus intenses* que ceux qui sont dus à l'action de l'hélice inductrice seule.

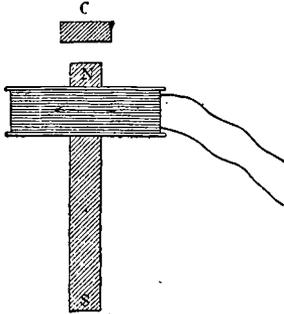


Fig. 892.

III. Induction par variation d'un aimant. — Un aimant a été placé dans l'axe d'une bobine qui joue le rôle de bobine induite et est reliée à un galvanomètre. Si l'on approche du pôle un contact de fer doux C, celui-ci s'aimante et renforce par réaction les pôles de l'aimant. De là un courant induit inverse dans la bobine (fig. 892). Si l'on éloigne le contact

de fer doux, un courant induit direct circule dans la bobine.

INDUCTION D'UN COURANT SUR SON CIRCUIT

1004. En variant d'intensité, un courant exerce une induction non seulement sur un circuit voisin, mais aussi sur son propre circuit. Cette induction est surtout marquée lorsque le circuit renferme une bobine de fil conducteur enroulé en hélice.

Extracourants de fermeture et d'ouverture. — Un courant, qui *commence* dans une spire, fait naître par induction dans les spires voisines un *courant de sens contraire*. L'effet est le même que si, pendant la période d'établissement, un courant se retranchait du courant principal et diminuait son intensité. Ce courant se nomme *extracourant de fermeture*.

A l'ouverture du circuit, la cessation du courant dans une spire fait naître dans les spires voisines un courant de même sens. L'effet est le même que si un courant de même sens s'ajoutait au courant principal et augmentait son intensité. Ce courant se nomme *extracourant d'ouverture*.

L'induction d'un circuit sur lui-même se nomme **self-induction** ⁽¹⁾.

Démonstration expérimentale. — Voici comment on peut mettre en évidence les courants de self-induction ou extracourants.

L'équilibre a été établi dans un pont de Wheatstone (fig. 893), avec quatre résistances égales dont l'une S est formée d'un fil enroulé sur une bobine. L'aiguille d'un galvanomètre placé dans le pont se maintient au zéro pendant le passage *permanent* du courant qui vient de la pile.

A l'ouverture du circuit en O, l'aiguille du galvanomètre est déviée par un extracourant direct qui prend naissance dans la bobine S et parcourt le galvanomètre de D en C. A la fermeture en O, un extracourant inverse produit une déviation de sens contraire.

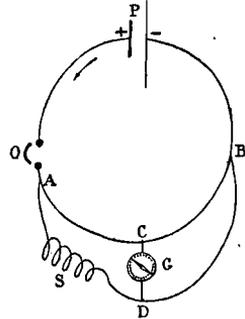


Fig. 893.

Les extracourants ne prennent pas seulement naissance à l'ouverture et à la fermeture du circuit, mais à toute variation du courant.

En apparence, les choses se passent comme si la bobine qui est le siège de la self-induction diminuait de résistance à l'interruption du courant ⁽²⁾ et augmentait au contraire de résistance à la fermeture.

1005. Effets de l'extracourant d'ouverture. — C'est à l'extracourant d'ouverture qu'est dû le renforcement de l'étincelle et de la commotion à la rupture d'un circuit qui renferme une bobine.

Supposons un circuit comprenant un long fil intercalé entre les pôles d'une pile; il se manifeste d'ordinaire une faible étincelle à la rupture. Si l'on *enroule* le fil sur une bobine, l'intensité du courant permanent ne change pas, puisque la résistance du circuit n'a pas varié, cependant l'étincelle qui jaillit à la rupture est beaucoup *plus forte* que précédemment.

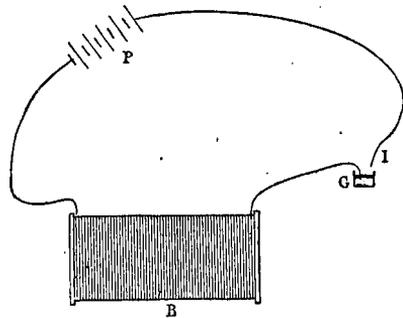


Fig. 894.

(1) L'analogie des courants électriques et des courants liquides se poursuit dans les courants de self-induction. A partir de l'instant où un courant d'eau est établi, il faut un certain temps pour que la vitesse d'écoulement prenne sa valeur définitive. Quand l'écoulement est brusquement interrompu, le courant ne disparaît pas instantanément, un choc violent a lieu en vertu de la vitesse acquise.

(2) Dans la fraction qui exprime l'intensité d'après la loi d'Ohm, il revient en effet au même de considérer le numérateur (force électromotrice) comme augmentant, ou le dénominateur (résistance) comme diminuant.

Le circuit qui renferme la bobine étant fermé, si l'on prend dans les mains les deux extrémités du fil interpolaire primitivement réunies en I, et si on les écarte brusquement (fig. 894), de façon que le corps de l'opérateur ferme le circuit, on éprouve une commotion bien supérieure à celle qui est ressentie avant l'enroulement du fil.

La self-induction est accrue par les conditions qui favorisent l'induction ; aussi l'étincelle et la commotion sont-elles renforcées à la rupture, quand un noyau de fer doux a été introduit dans l'axe de la bobine.

Expériences de self-induction. — On peut montrer la production des courants de self-induction par la disposition suivante (fig. 895).

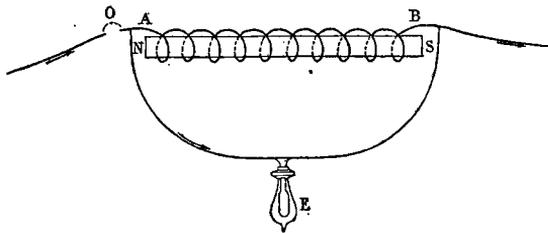


Fig. 895.

Un courant se bifurque en A et se partage entre une lampe à incandescence E et une bobine à noyau de fer. Les résistances sont réglées pour que la lampe ne s'illumine que faiblement pen-

dant le passage permanent du courant. Si on ouvre le circuit en O, la lampe s'éclaire vivement un instant ; cela est dû à un extracourant direct qui prend naissance dans la bobine et traverse la bobine et la lampe.

Le courant permanent étant établi, sans noyau dans la bobine, et la lampe brillant d'un faible éclat, la lampe s'éclaire vivement si on introduit brusquement un noyau de fer, comme si la résistance de la bobine éprouvait un brusque accroissement.

La bobine contenant le noyau, la lampe peut s'éteindre un instant quand on retire le noyau, comme si la résistance de la bobine éprouvait une brusque diminution.

EFFETS DES COURANTS INDUITS

1006. Les courants induits produisent *tous les effets des courants des piles* : effets calorifiques, chimiques, lumineux.

Ils suivent les mêmes lois. La force électromotrice qui prend nais-

sance dans une spire induite est indépendante des forces électromotrices des autres spires. La force électromotrice totale est la somme des forces électromotrices partielles. La loi d'Ohm s'applique à un courant induit comme à un courant de pile.

Les potentiels se distribuent dans un circuit induit comme dans un circuit de pile. La relation

$$a - b = ir$$

convient à un conducteur traversé par un courant induit comme à un conducteur traversé par un courant de pile.

Les courants induits produisent des effets magnétiques à distance comme les courants des piles. L'*impulsion* de l'aiguille d'un galvanomètre mesure la quantité d'électricité d'un courant de très courte durée; la déviation fixe due à des courants qui se succèdent rapidement mesure la quantité totale d'électricité qui circule.

Les courants induits créent donc un champ magnétique et donnent naissance à des effets d'aimantation. Ils donnent aussi naissance à des effets d'induction.

Inductions d'ordres successifs. — Soient quatre bobines, B, C, D, E (fig. 896) recouvertes chacune de deux fils parallèles, le deuxième fil de B (fil induit) est relié par les conducteurs *f* et un interrupteur à pointes au

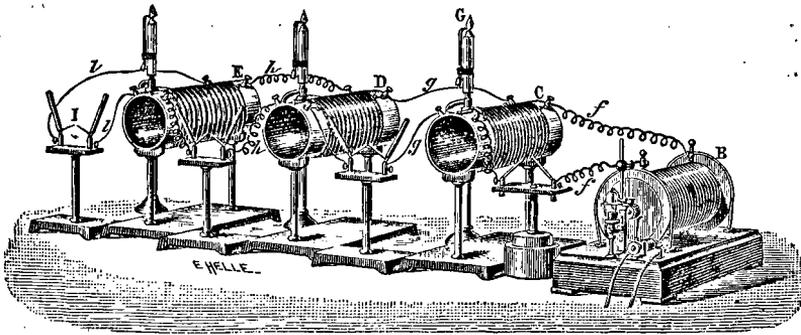


Fig. 896.

premier fil de C (fil inducteur), le deuxième fil de C (induit) par les conducteurs *g* et un interrupteur à pointes au premier fil de D (inducteur), le deuxième fil de D (induit) par les conducteurs *h* et un interrupteur à pointes au premier fil de E (inducteur); le deuxième fil de E est fermé sur lui-même par les conducteurs *l* et un dernier interrupteur à pointes I⁽¹⁾.

(1) Outre les interrupteurs horizontaux tels que I, on voit sur la fig. 896 des interrupteurs à fils verticaux dont l'étincelle éclate dans un courant de gaz d'éclairage qui sort des becs G et l'enflamme.

Si l'on ouvre le courant dans le premier fil de B, il s'y comporte comme un courant inducteur : le courant induit développé dans le deuxième fil circule dans le premier fil de C, développe un courant induit dans le deuxième fil ; ce nouveau courant va passer dans le premier fil de D, et fait naître un courant induit dans le deuxième fil ; ce courant induit se rend dans le premier fil de E, et agit enfin sur le deuxième fil de E ; ce dernier courant induit pourrait à son tour agir par induction.

Quand on vient à établir le courant inducteur en B, il se produit de même des courants induits dans toutes les bobines successives. Le nombre des courants qui prennent ainsi naissance va en doublant pour chaque bobine.

Lorsqu'un courant est produit dans le fil induit de B et circule dans le premier fil de C, il engendre dans le premier fil de C un courant inverse quand il commence, et un courant direct quand il finit. Ces deux courants sont dits de *deuxième ordre*. Chacun de ces courants de deuxième ordre engendre à son tour deux courants dans le deuxième fil de D, ce qui fait quatre courants de *troisième ordre*. Il y aura huit courants de *quatrième ordre* dans le deuxième fil de E.

LOI DE LENZ

1007. Un circuit parcouru par un courant induit exerce des actions électromagnétiques sur le système inducteur. *Le sens du courant induit est tel que son action électromagnétique s'oppose au mouvement qui produit l'induction.* C'est la *loi de Lenz* ⁽¹⁾. Vérifions-la sur des cas particuliers.

1° Le courant induit qui prend naissance dans le rapprochement d'un circuit inducteur et d'un circuit induit parallèle est de sens contraire au courant inducteur ; il s'oppose donc au mouvement d'approche.

2° On approche de l'extrémité d'une bobine le pôle sud d'un aimant : le courant induit qui prend naissance dans la bobine est inverse des courants de l'aimant ; il présente donc une face sud au pôle sud de l'aimant, ce qui provoque une répulsion et contrarie le mouvement.

La loi de Lenz permet ainsi de prévoir le sens d'un courant induit. Elle fait en outre connaître la source à laquelle le courant induit doit son énergie.

(1) La loi de Lenz est un cas particulier d'une loi générale d'après laquelle *tout système élastique s'oppose aux déformations qu'on lui fait subir*, et d'autant plus que l'effort qu'on exerce sur lui est plus puissant.

1008. Source de l'énergie électrique d'un courant induit.

— Pour vaincre la résistance qu'un courant induit oppose par son action électromagnétique au mouvement du système inducteur, il faut dépenser du travail. D'après le principe de la conservation de l'énergie (504), ce travail *ne peut pas disparaître*; en effet, il entretient l'énergie électrique du courant induit. Cette énergie électrique est convertie à son tour en énergies variées dans le circuit induit.

Le travail dépensé dans le fonctionnement des machines magnéto-électriques nous présentera plus loin une application importante de cette transformation d'un travail mécanique en énergie électrique par l'intermédiaire des courants d'induction (1023).

1009. Courants d'induction dans les masses métalliques.

— **Expérience de Foucault** (fig. 897). — Le déplacement relatif d'un courant ou d'un aimant et d'une masse métallique détermine dans

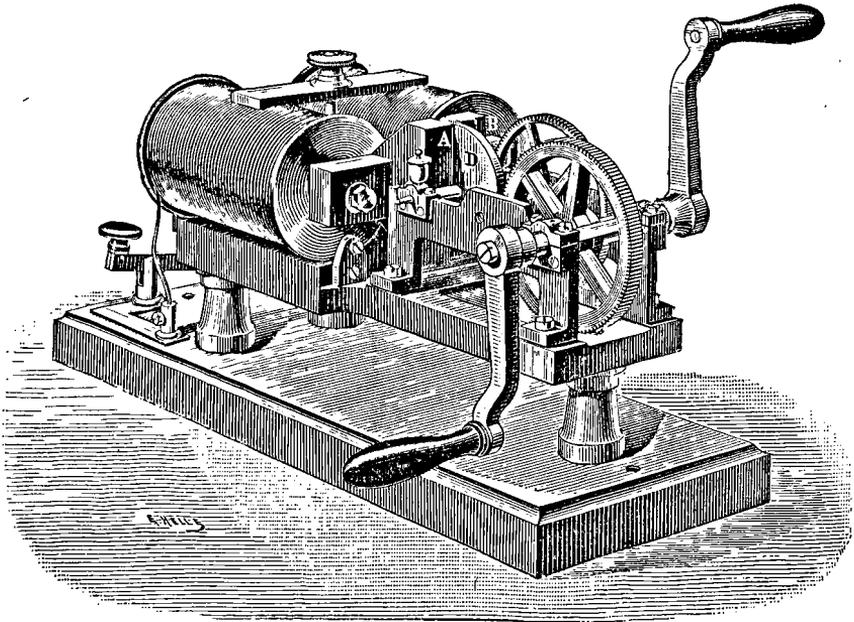


Fig. 897.

cette masse des courants d'induction. Ces courants induits s'opposent au déplacement, d'après la loi de Lenz, et absorbent une énergie mécanique *qu'on retrouve intégralement* sous forme d'énergie calorifique dégagée dans la masse métallique. Voici sur ces phénomènes d'in-

duction une expérience très démonstrative due à Foucault. Entre les deux pôles très rapprochés A et B d'un électroaimant on fait tourner un disque métallique plein D. Tant que l'électroaimant n'est pas aimanté, le disque tourne très aisément. Si l'on vient à faire passer un fort courant dans la bobine de l'électroaimant, le disque métallique en mouvement devient le siège de courants induits qui prennent naissance dans sa masse et s'opposent à son déplacement d'après la loi de Lenz. La résistance électrique du disque étant très faible, ces courants sont intenses, et leurs réactions électromagnétiques considérables. Le maintien de la rotation du disque exige alors une grande dépense de travail mécanique. Les courants induits échauffent le disque dans lequel ils circulent; la chaleur produite est équivalente au travail dépensé.

On peut déterminer le travail τ dépensé pour N tours d'une rotation uniforme du disque lorsque l'électroaimant n'agit pas. Lorsque l'électroaimant est aimanté, il faut pour N tours dépenser un travail mécanique T bien supérieur à τ . La différence $T - \tau$ est transformée en chaleur *sans perte* par l'intermédiaire de l'énergie électrique des courants induits du disque. Il y a proportionnalité entre le nombre W de calories dégagées et le travail $T - \tau$. On a $T - \tau = JW$. J est l'équivalent mécanique de la calorie, 4,17; $T - \tau$ est exprimé en joules et W en petites calories.

1010. Amortissement des oscillations d'une aiguille aimantée.

— Les oscillations d'un barreau aimanté s'éteignent très vite quand ce barreau oscille au voisinage d'une masse de cuivre. Les courants induits produits dans la masse de cuivre par le déplacement de l'aimant exercent sur l'aimant une action électromagnétique qui s'oppose à son mouvement. On met à profit ce phénomène pour réduire la durée des oscillations des aiguilles des galvanomètres (986).

LOIS DE L'INDUCTION

Un aimant et un courant produisent un champ magnétique dans l'espace qui les environne. Les phénomènes d'induction résultent de la variation de l'intensité de la force magnétique dans la région occupée par le circuit induit. La considération du flux de force qui émane du système inducteur et caractérise son degré d'aimantation permet de formuler d'une façon simple les conditions de production des courants induits, de préciser leur sens et de calculer la valeur de leur force électromotrice.

1011. Conditions de production des courants induits. —

Un circuit fermé situé dans un champ magnétique, c'est-à-dire en présence d'un système de masses magnétiques ou de circuits traversés par des courants, embrasse une portion du flux de force issu du système magnétique, et le flux intercepté varie avec la position relative du système magnétique et du circuit.

A toute variation du flux de force intercepté par un circuit correspond la production dans ce circuit d'un courant électrique induit dont la durée est égale à la durée de la variation du flux.

Le flux magnétique peut être dû à un courant aussi bien qu'à un aimant puisqu'un courant fermé équivaut à un feuillet magnétique (972), et engendre un flux de force dirigé à travers le feuillet de sa face négative à sa face positive (883).

Les courants de self-induction sont compris dans la loi qui vient d'être énoncée, puisque les variations d'intensité d'un courant modifient l'aimantation du feuillet équivalent, et par conséquent le flux de force enveloppé par son contour.

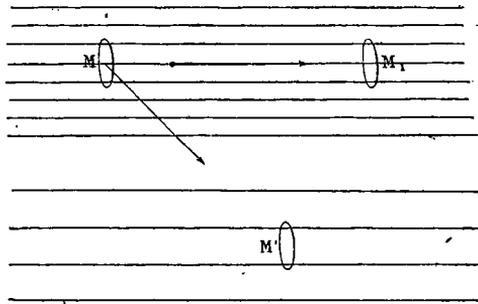


Fig. 898.

Tout déplacement ou toute déformation d'un circuit qui ne modifie pas la valeur du flux de force qu'il embrasse ne donne pas lieu à un courant induit. C'est ainsi qu'un circuit n'est le siège d'aucun courant induit s'il est transporté *parallèlement à lui-même* de M en M₁ dans un champ magnétique uniforme (886), c'est-à-dire dans un espace où les lignes de force sont équidistantes et parallèles (fig. 898).

Dans un champ magnétique variable, on obtiendra un courant en transportant un circuit d'une position M à une autre parallèle M' où le flux est différent (fig. 898).

1012. Sens des courants induits. — Le sens des courants induits se détermine en appliquant la loi de Lenz. Il est commode de substituer au courant induit l'aimant équivalent : *les pôles de cet aimant devront être orientés de façon à contrarier l'action magnétique qui produit l'induction.*

Exemples. — 1° Approchons d'un pôle nord N un contour fermé

(fig. 899); en passant de MM' en $M_1M'_1$, le contour est vu de N sous un angle qui va en augmentant; il intercepte donc sur les lignes de force qui divergent du pôle (885) un flux croissant, il est par conséquent parcouru par un courant induit. Comme d'après la loi de Lenz, le courant induit doit être repoussé par le pôle dont il s'approche, sa face positive ou nord doit regarder le pôle N.

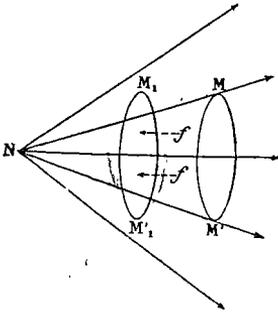


Fig. 899.

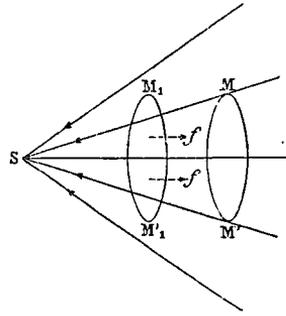


Fig. 900.

2° Approchons le circuit MM' d'un pôle sud S (fig. 900); la face sud du courant induit devra, d'après la loi de Lenz, être dirigée vers le pôle sud.

3° Approchons un circuit MM' de la face positive ou nord d'un courant parallèle LL' (fig. 901); le circuit induit devra être repoussé, il présentera donc sa face positive au circuit inducteur.

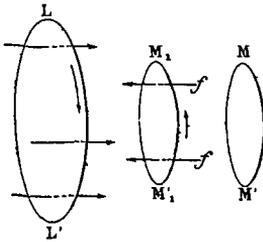


Fig. 901.

Dans ces divers exemples, le *flux magnétique qui prend naissance dans le circuit induit* (ou dans l'aimant équivalent) par la production même du courant induit, et qui va intérieurement de sa face négative vers sa face positive, est de même sens que le *flux inducteur si celui-ci décroît, et de sens contraire si le flux inducteur croît*. Plus brièvement, le courant induit s'oppose par le flux qu'il produit à la variation du flux inducteur.

Pour obtenir cet énoncé simple, le flux intercepté par un circuit doit être considéré comme allant en croissant si sa valeur algébrique augmente (flux positif croissant ou flux négatif décroissant en valeur absolue); le flux est considéré comme allant en décroissant si sa valeur algébrique diminue.

Dans le premier cas (fig. 899), le flux induit *diminue le flux inducteur croissant* enveloppé par le circuit induit.

Dans le second cas (fig. 900), le flux induit *augmente le flux inducteur décroissant* intercepté par le circuit induit.

Dans le troisième cas (fig. 901), le flux inducteur intercepté par le circuit induit est divergent et croissant, le flux induit *diminue le flux inducteur croissant*.

(Considérons encore un circuit traversé par un courant : rompons brusquement le courant, le flux disparaît dans un temps très court ; il se produit dans le circuit même un courant induit qui *augmente le flux décroissant* ; ce courant est direct, c'est le courant de self-induction de rupture.

Si nous rétablissons le courant interrompu, il se produit un courant induit qui *diminue le flux croissant* ; il est inverse, c'est le courant de self induction de fermeture.

Cette façon d'envisager le flux induit s'étend à la détermination du sens du courant induit dans des cas où la forme de l'aimant équivalent serait moins directement observable.)

(1013. Induction par la Terre. — Appliquons la règle précédente à l'étude de l'induction par la Terre. Dans notre hémisphère, les lignes de force magnétiques plongent ; à Paris, elles font actuellement un angle d'environ 65° avec l'horizontale.

Comme le champ magnétique terrestre est uniforme, nous savons qu'il ne se produit pas de courant induit dans un cadre transporté parallèlement à lui-même (1011).

Mais il se produira un courant induit dans le cadre si nous le faisons passer de la position A parallèle aux lignes de force, à la position B où le flux enveloppé est maximum. Le flux induit aura une direction *opposée à celle du flux terrestre qui est croissant*, et le cadre tournera vers le sol sa face négative. Si l'on revient de la position B à la position A, un nouveau courant induit parcourra le cadre pendant le mouvement, tournant vers le sol sa face positive (fig. 902.)

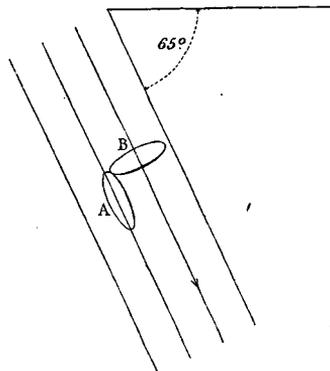


Fig. 902.

(1014. Valeur de la force électromotrice induite. — La force électromotrice d'induction ou l'énergie développée par un coulomb (933) par-

courant le circuit s'exprime d'une façon simple en fonction des flux de force interceptés par le circuit induit.

La force électromotrice créée dans un circuit est à chaque instant proportionnelle à la variation par seconde du flux de force qui le traverse.

C'est l'énoncé de la loi générale de l'induction dans un circuit fermé.

L'intensité moyenne d'un courant induit dans un circuit de résistance R pendant un temps θ est exprimée en ampères par

$$i = \frac{1}{10^8} \frac{\Delta\varphi}{\theta} \cdot \frac{1}{R}.$$

R est évalué en ohms; φ est exprimé en unités magnétiques, c'est un produit de dynes par des centimètres carrés;

la quantité d'électricité mise en mouvement pendant ce temps est :

$$q = i\theta = \frac{1}{10^8} \frac{\Delta\varphi}{R}.$$

La quantité totale d'électricité mise en mouvement pendant la durée du courant induit sera :

$$q + q' + q'' + \dots = i\theta + i'\theta' \dots = \frac{1}{10^8} \frac{\Sigma\Delta\varphi}{R} = \frac{1}{10^8} \frac{(\varphi_1 - \varphi_2)}{R}.)$$

La quantité totale d'électricité qui circule dans un circuit induit s'obtient en divisant par la résistance du circuit *la différence des flux de force* enveloppés par le circuit au commencement et à la fin du

courant, elle est représentée en coulombs par : $Q = \frac{1}{10^8} \frac{(\varphi_1 - \varphi_2)}{R}$

Cet énoncé comporte comme conséquences tous les phénomènes d'induction. Nous allons les résumer.

1015. Résumé des phénomènes d'induction. — 1° La quantité totale d'électricité d'un courant induit ne dépend que de la valeur de la variation du flux de force intercepté; elle ne dépend ni de la durée de la variation, ni de la façon dont elle a lieu. Ainsi la quantité d'électricité engendrée par le déplacement d'un circuit induit dans un champ magnétique *ne dépend que des positions extrêmes du circuit*; elle ne dépend pas du trajet parcouru.

2° La nature du conducteur n'influe que par la résistance qu'il introduit dans le circuit.

3° Si le circuit est déjà traversé par un courant, le courant induit s'ajoute au courant primitif ou s'en retranche suivant son sens.

4° Des variations de flux de force égales et contraires produisent la même quantité absolue d'électricité, mais les sens des courants induits sont contraires, puisque la variation totale du flux est nulle et que par conséquent la quantité totale d'électricité mise en circulation dans l'ensemble des deux transformations doit être nulle.

5° Les flux de force interceptés à l'ouverture et à la fermeture d'un même courant inducteur étant égaux et de signes contraires, les courants induits correspondants, direct et inverse, mettent en circulation des quantités d'électricité égales et contraires.

6° L'ouverture d'un courant inducteur produit dans un circuit induit la même quantité d'électricité que son éloignement à l'infini, car le circuit induit cesse dans les deux cas d'être traversé par le flux de force du courant inducteur.

De même, la fermeture d'un courant inducteur équivaut à son rapprochement de l'infini à sa position actuelle.

7° Le flux de force d'un courant inducteur étant proportionnel à son intensité, les courants induits d'ouverture et de fermeture seront proportionnels à cette intensité.

8° Une diminution Δi de l'intensité du courant inducteur agit comme l'éloignement à l'infini d'un circuit identique au circuit inducteur traversé par un courant Δi .

Une augmentation Δi de l'intensité, a pour effet de superposer au circuit inducteur un circuit identique venu de l'infini et traversé par un courant Δi .

9° Comme l'ouverture et la fermeture d'un circuit peuvent avoir lieu dans un temps beaucoup plus court que son éloignement ou son rapprochement, les intensités moyennes du courant d'ouverture et du courant de fermeture seront supérieures aux intensités des courants obtenus avec le même courant inducteur par approche ou éloignement.

10° Quand une bobine est traversée par un courant, ce courant détermine un flux de force dirigé intérieurement du pôle sud au pôle nord de la bobine ; si l'on ouvre le circuit, ce flux disparaît, à cette disparition du flux correspond la production d'un courant de self-induction direct. La variation du flux est beaucoup plus grande (996) s'il y a un noyau de fer doux dans l'axe de la bobine. L'ouverture pouvant être très brusque, la variation du flux est rapide et la force électromotrice induite considérable.

A la fermeture du circuit, la variation du flux est la même qu'à l'ouverture, d'où il résulte que les quantités d'électricité mises en

mouvement par les deux courants de self-induction sont égales.

11° C'est au moment où la variation du flux de force qui traverse le circuit induit est la plus rapide que l'intensité du courant induit est la plus grande. Comme à un maximum ou à un minimum correspond une variation nulle pendant un temps très court, la force électromotrice d'induction est nulle au moment où le flux de force passe par un maximum ou par un minimum.

12° La décharge oscillatoire d'un condensateur donnant lieu à des variations d'intensité extraordinairement rapides (1042), les courants induits dus à ces décharges auront une force électromotrice extrêmement élevée.)

Applications. — 1° Une spire circulaire de 30 centimètres de diamètre est placée verticalement dans un champ magnétique uniforme dont la force est égale à 0,2; le cadre étant d'abord perpendiculaire aux lignes de force, on le fait tourner de 90°. Quelle est la quantité d'électricité mise en circulation dans la spire, la résistance de cette spire et du galvanomètre qui complète le circuit étant 2 ohms?

2° Un cadre est placé verticalement dans un champ magnétique uniforme dont la force est horizontale; le cadre étant d'abord perpendiculaire aux lignes de force, on le fait tourner brusquement de 90°; un galvanomètre à réflexion placé dans le circuit indique une impulsion de 52 minutes.

On recommence la même opération dans un autre champ magnétique uniforme où la force est encore horizontale et égale à 0,196; on obtient une impulsion de 36 minutes.

Les impulsions étant proportionnelles aux quantités d'électricité, quelle est la force du premier champ magnétique?

3° L'un des fils d'une bobine cylindrique à deux fils communique avec les deux pôles d'une pile et l'autre fil avec un galvanomètre. En ouvrant le circuit de la pile, le galvanomètre accuse une impulsion de 14 minutes.

On recommence l'opération en plaçant dans la bobine un noyau de fer de même diamètre; le courant induit donne une impulsion de 50'10'.

Quel est le coefficient μ de perméabilité magnétique du fer?

BOBINE D'INDUCTION

1016. La bobine d'induction, appelée aussi *bobine de Ruhmkorff*, produit des courants induits de haut potentiel par les variations rapides de l'intensité du champ magnétique d'un électroaimant.

Description. — La bobine d'induction ne diffère d'un appareil de démonstration à deux fils (fig. 887) que par les dimensions relatives des deux fils.

Le *fil inducteur* est un gros fil de cuivre isolé, enroulé sur une bobine cylindrique de petit diamètre; il a 2 à 3 millimètres de diamètre et au plus 100 mètres de longueur. On y fait passer le courant de quelques accumulateurs ou de quelques éléments Bunsen à large

surface et par conséquent de très faible résistance. Un interrupteur détermine des ouvertures et des fermetures rapides du courant inducteur.

Autour de la bobine inductrice, et séparé d'elle par un tube d'ébonite, est enroulé un fil de cuivre fin, recouvert de soie et verni, d'un très grand nombre de spires. Ce fil est le *fil induit*; son diamètre ne dépasse pas $\frac{1}{4}$ ou $\frac{1}{5}$ de millimètre, mais sa longueur peut être très considérable ⁽¹⁾.

La bobine inductrice est traversée suivant son axe par un *noyau de fer doux*. Ce noyau a pour effet d'augmenter considérablement (996) le flux de force intercepté par les spires de la bobine induite (1011). Tandis que dans la construction des électroaimants ordinaires on emploie un noyau de fer massif, ici le noyau est formé d'un faisceau de fils de fer fins, isolés les uns des autres, dont l'aimantation et la désaimantation ont lieu plus rapidement qu'avec un noyau plein.

Fonctionnement. — Toute fermeture du circuit inducteur fait naître dans le circuit induit un courant inverse, et toute ouverture y développe un courant direct (1002, I). Ces deux courants sont de très courte durée.

La force électromotrice qui prend naissance dans chaque spire du fil induit croît avec le *flux de force* qu'elle enveloppe, et avec la *rapidité* (1014) d'apparition et de disparition de ce flux. La somme des forces électromotrices est proportionnelle au nombre de spires. Chacune des spires de la bobine induite se comporte comme un élément de pile, et, pour obtenir un effet maximum dans un circuit très résistant, il convient de multiplier le plus possible le nombre des spires (926, I).

Propriétés des courants d'ouverture et de fermeture. — Si les deux extrémités du fil induit sont réunies par un conducteur, et si une ouverture du circuit inducteur suit une fermeture, le fil induit est traversé par *deux courants de sens contraires qui sont égaux*. Cette égalité résulte du mode de production des deux courants qui sont dus à l'apparition et à la disparition d'un même flux de force (1015, 4°); elle est d'ailleurs confirmée par l'observation. En effet, séparément, les courants d'ouverture et de fermeture produisent des

(1) On a construit des bobines d'induction dont le fil induit avait 500 kilomètres. Elles donnaient des étincelles de plus d'un mètre de longueur.

déviation égales et contraires de l'aiguille d'un galvanomètre⁽¹⁾; quand ces deux sortes de courants se succèdent rapidement dans un circuit fermé, ils n'exercent aucune action sur l'aiguille d'un galvanomètre, ils ne produisent pas de décomposition apparente dans un voltamètre à sulfate de cuivre; dans un voltamètre à eau, les deux gaz hydrogène et oxygène sont séparés en quantités égales à chaque pôle.

Ainsi, deux courants direct et inverse successifs mettent en mouvement une même quantité d'électricité et produisent par conséquent la même déviation de l'aiguille d'un galvanomètre, mais *la différence de potentiel maximum* que peut atteindre chacun d'eux est très différente; elle est beaucoup plus grande pour le courant direct ou d'ouverture. Cela provient de ce que le courant de self-induction de fermeture retarde l'établissement du courant inducteur, ce qui prolonge le courant induit de fermeture. A la rupture, il ne peut circuler d'extracourant de rupture puisque le circuit s'ouvre, le courant inducteur cesse presque instantanément; la disparition du flux de force inducteur est donc *beaucoup plus rapide* que son établissement.

Les courants induits directs sont capables de traverser sous forme de brillantes étincelles un intervalle d'air ménagé entre les extrémités du fil induit; dans les bobines de petite et de moyenne dimension, les courants inverses ne passent pas. On n'a alors d'étincelle induite qu'à la rupture du courant inducteur.

Pôles positif et négatif d'une bobine d'induction. — Les courants inverses étant arrêtés *par une interruption*, il en résulte que, *sans appareil redresseur*, le courant qui se propage suivant les étincelles a une direction constante, celle du *courant induit direct*. On peut donc parler des pôles positif et négatif d'une bobine d'induction comme de ceux d'une machine électrostatique.

1017. Description des divers organes. — Interrupteur. — L'interrupteur des petites bobines d'induction fonctionne habituellement par le jeu même de l'appareil.

Interrupteur à marteau (fig. 903). — Le noyau de fer F placé dans l'axe de la spirale inductrice attire un contact de fer doux *m* appelé

(1) En raison de la rapidité d'un courant induit, son action sur une aiguille aimantée est comparable à un choc et la déviation de l'aiguille ne renseigne ni sur la durée ni sur le mode de variation du courant. Un courant induit qui agit pendant un temps très court, mais atteint une grande intensité, exerce le même effet sur une aiguille aimantée qu'un courant d'intensité moindre, mais de plus longue durée si la *quantité d'électricité* que ces deux courants très rapides ont fait séparément circuler est la même.

marteau, qui repose sur une pièce métallique E dite *enclume* et ferme le circuit. Quand le courant passe, le noyau attire le contact *m*, et le circuit se trouve ouvert entre le marteau et l'enclume : par cela même, l'aimant se désaimante. Un ressort *r* ramène le contact sur l'enclume ; le courant rétabli réaimante le fer doux, etc.

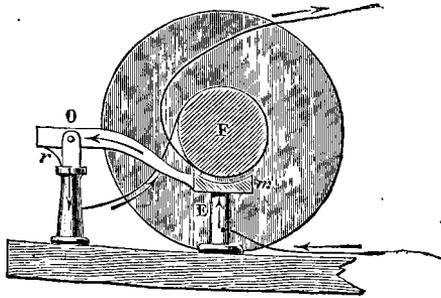


Fig. 903.

Interrupteur à trembleur (fig. 904). — Le courant inducteur arrive par le support AB, et passe dans une lame élastique qui porte un contact en fer doux *c* ; il gagne ensuite la vis *V*, dont la pointe *i* touche la lame élastique et se rend dans le fil inducteur ; le noyau s'aimante, attire le contact, ce qui produit une interruption en *i*. L'élasticité du ressort lui fait reprendre sa position primitive, ce qui ferme de nouveau le circuit.

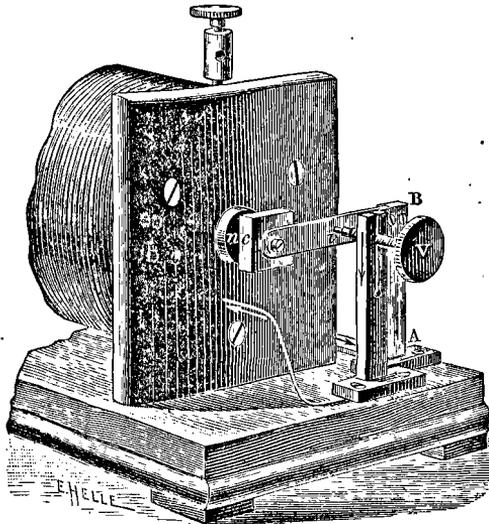


Fig. 904.

Interrupteur de Foucault (fig. 905). — L'étincelle qui éclate entre le trembleur et la vis prolonge la durée de l'interruption du courant ; Foucault a rendu cette interruption *plus brève* en la produisant avec une pointe de platine qui sort d'un godet à mercure.

Le marteau *c* forme l'extrémité d'un levier transversal porté par un ressort vertical *a*, l'autre extrémité est terminée par une pointe en platine *p* qui plonge dans un godet à mercure. Le courant inducteur arrive par une borne A, traverse la spirale inductrice, monte le long

du ressort *a*, et passe à la pointe *p* par l'une des branches du levier ; du godet à mercure il aboutit à la borne B. Le circuit étant fermé, le

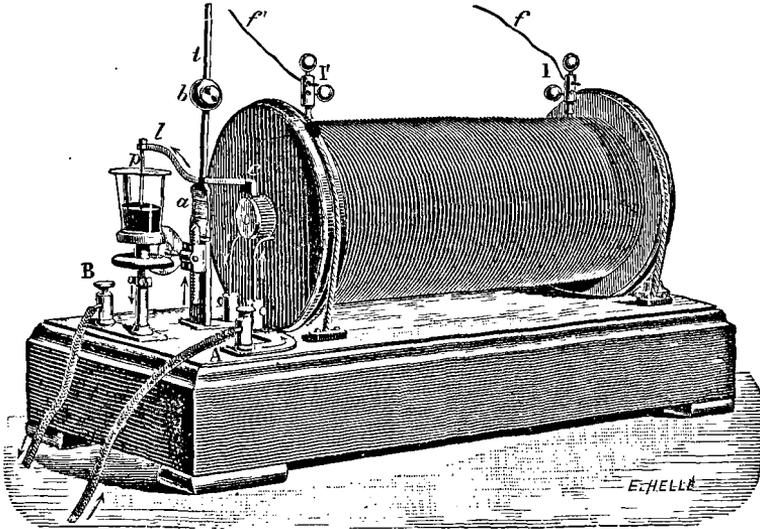


Fig. 905.

noyau attire le marteau *c*, ce qui soulève l'extrémité opposée *l* du levier et fait sortir la pointe du godet. Le courant étant interrompu, l'action du ressort ramène la pointe dans le mercure et ferme de nouveau le circuit. On réduit l'étincelle de rupture entre la pointe de platine et le mercure en recouvrant le mercure d'une couche d'eau ou d'alcool qui refroidit

les vapeurs métalliques de l'étincelle ; la *rapidité* de l'interruption se trouve encore accrue, et par conséquent la *force électromotrice maximum* du courant induit.

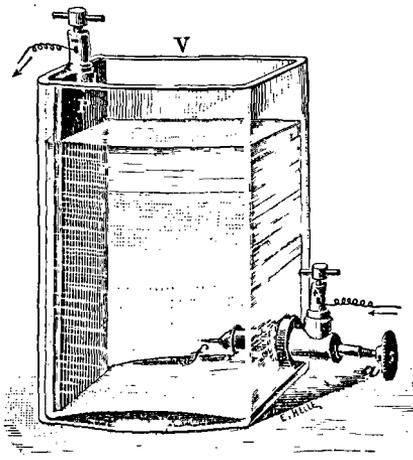


Fig. 906.

Interrupteur électrolytique de Wehnelt (fig. 906). — L'interrupteur de Wehnelt est un voltamètre à eau acidulée par l'acide sulfurique et à électrodes inégales. L'électrode

positive est un fil de platine de très petite surface, l'électrode négative est une plaque de plomb de grande surface. Ce voltamètre se comporte comme un voltamètre ordinaire lorsque des courants faibles le traversent. Le dégagement gazeux d'oxygène devient *intermittent* quand l'intensité du courant augmente suffisamment, et il prend une forme explosive. La rapidité des interruptions croît avec l'intensité du courant, et le fil de platine s'entoure d'une auréole lumineuse rose. Le nombre des interruptions atteint facilement 500 et 1000 par seconde.

Condensateur. — A la rupture du circuit inducteur, un courant de self-induction de même direction que le courant qui finit, *prolonge sa durée* et retarde la désaimantation du noyau. Il en résulte plus de lenteur dans la variation du flux de force enveloppé par les spires induites, et une diminution de la force électromotrice induite.

Entre deux points A et B, de part et d'autre de l'interruption du courant, on intercale en dérivation un condensateur de très grande surface C, formé de feuilles d'étain et de papier paraffiné superposées (fig. 907). Les feuilles conductrices impaires sont réunies en d, et communiquent en A avec l'une

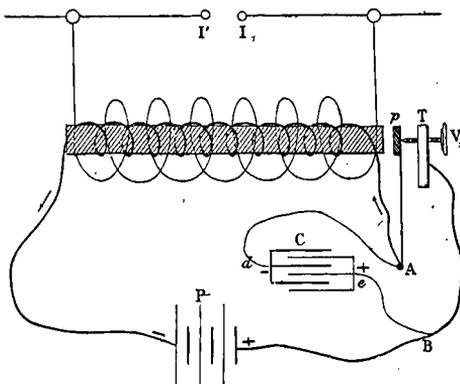


Fig. 907.

des extrémités du fil inducteur; les feuilles paires, réunies en e, aboutissent en B à l'autre extrémité.

A la rupture du courant inducteur, le condensateur se charge. Sa grande capacité empêche la différence de potentiel à l'interruption entre le contact p et la pointe de la vis V de devenir aussi forte; l'étincelle de self-induction diminue. L'électricité accumulée dans le condensateur ne pouvant pas franchir l'interruption, l'électricité positive de la décharge suit les spires de la bobine en *sens inverse* du courant inducteur, ce qui contribue à désaimanter plus rapidement le noyau de fer doux.

En faisant usage d'une bobine à condensateur mobile, on reconnaît

que les étincelles de la bobine induite *augmentent beaucoup de longueur* par l'adjonction du condensateur au circuit inducteur.

Cloisonnement de la bobine induite. — Les spires sont soigneusement isolées.

Il ne convient pas d'enrouler le fil induit en spirale sous forme de couches superposées qui passent d'une extrémité à l'autre de la bobine et reviennent au point de départ. En effet, pendant le passage du

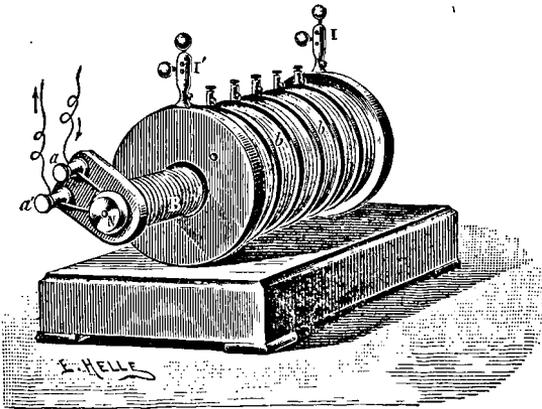


Fig. 908.

courant induit, les potentiels s'échelonnent tout le long du circuit et deux spires superposées, séparées par une grande longueur de fil, offriraient une différence de potentiel considérable et capable de rompre la gaine isolante, ce qui rendrait inutile la couche comprise entre les deux points ainsi réunis.

On compose la bobine induite d'un grand nombre de spirales plates isolées, perpendiculaires à l'axe de la bobine, disposées en série et séparées les unes des autres (fig. 908). De cette façon, la différence du potentiel entre deux fils superposés reste petite, car la longueur de fil qui les sépare est faible.

1018. Usages de la bobine d'induction. — La bobine d'induction est toujours employée avec une interruption dans le circuit induit, et elle donne un flux d'étincelles dues au courant induit direct. La résistance gazeuse du trajet de l'étincelle étant incomparablement plus grande que la résistance du fil induit de la bobine qui est elle-même très grande, la différence de potentiel aux deux pôles reste à peu près aussi forte que si le circuit était complètement ouvert.

Le courant des étincelles n'a qu'un débit très faible et ne produit que des actions chimiques et magnétiques minimales, mais il offre des différences de potentiel très élevées.

Avec mille éléments de pile associés en série on ne peut obtenir en rapprochant les pôles que de très petites étincelles ; entre les extrémités du fil d'une grande bobine d'induction, les étincelles ont pu atteindre dans l'air à la pression ordinaire une longueur d'un mètre.

Les effets de la bobine d'induction sont ceux des machines électrostatiques, et ils peuvent être beaucoup plus puissants, car le débit est ici considérable.

La bobine d'induction est utilisée pour obtenir des étincelles dans l'analyse spectroscopique, enflammer des mines à distance, charger des bouteilles de Leyde, produire des effets lumineux à travers des gaz raréfiés, exercer des actions physiologiques.

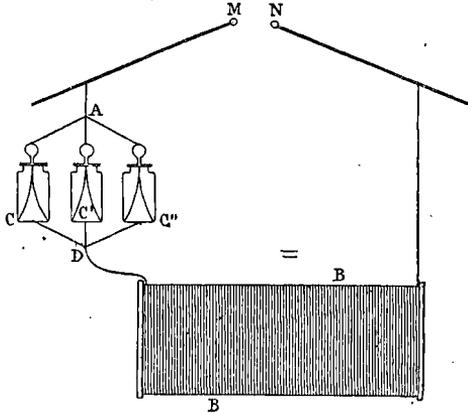


Fig. 909.

Charge d'une bouteille de Leyde ou d'une batterie.

— La différence de potentiel aux deux extrémités du fil induit change constamment de signe, de telle sorte qu'une batterie ne se chargerait pas si l'on mettait simplement ses armatures en communication avec les deux extrémités du fil induit, mais si l'on ménage dans le circuit induit une interruption entre M et N (fig. 909), le courant induit direct passe seul, et la bouteille se charge. A chaque étincelle de l'interrupteur MN, la batterie reçoit la même quantité d'électricité.

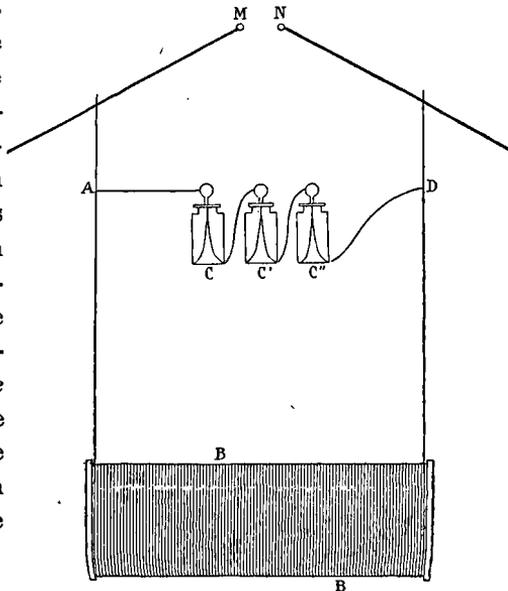


Fig. 910.

Condensateur en dérivation. — Si les pointes entre lesquelles éclate l'étincelle communiquent séparément avec les armatures d'un condensateur (fig. 910), on accumule une grande quantité d'électricité dans les armatures avant que la différence de potentiel entre M et N soit suffisante pour donner lieu à l'étincelle. Le nombre des étincelles en un temps donné est moindre que sans condensateur, et leur bruit se trouve considérablement renforcé.

1019. Phénomènes lumineux. — Le passage de la décharge d'une bobine d'induction dans les gaz raréfiés donne lieu à des effets intéressants. Les expériences ont d'abord été réalisées avec un *tube de Geissler*. A chacune des extrémités du tube, un fil conducteur de platine soudé au verre (fig. 563) fait légèrement saillie à l'intérieur et communique avec les deux pôles d'une bobine d'induction. Ces fils de platine s'appellent les électrodes du tube. A une pression de 2 ou 3 millimètres de mercure, la décharge passe beaucoup plus facilement que dans l'air à la pression ordinaire; l'intervalle compris entre les électrodes s'illumine et prend une coloration qui varie avec le gaz. La colonne lumineuse se fractionne en une série de zones alternativement brillantes et obscures (*stratification*).

Si le vide est plus parfait, la colonne lumineuse diminue de longueur, et l'électrode négative ou *cathode* s'entoure d'un petit espace obscur. Pour une pression d'environ un millionième d'atmosphère (*tube de Crookes*), la décharge de la bobine passe beaucoup plus difficilement que dans un tube de Geissler, l'espace obscur de la cathode remplit presque tout le tube; en même temps, la paroi du verre opposée à la cathode s'échauffe, devient fluorescente et prend un éclat verdâtre dû aux variations émises par la cathode et formant les *rayons cathodiques*.

Si le vide est poussé plus loin encore, l'étincelle de décharge ne passe plus, tous les phénomènes disparaissent.

Rayons X. — A la fin de 1895, le professeur Röntgen, de Wurtzbourg, ayant enfermé un tube de Crookes dans une boîte en carton, remarqua qu'un écran fluorescent placé dans le voisinage s'illuminait dès que le tube entraînait en activité. Cette fluorescence n'était pas due à la lumière verte dont brillait la paroi du tube opposée à la cathode, puisque cette lumière ne pouvait traverser la boîte; elle provenait de rayons nouveaux pour lesquels certaines substances opaques, telles que le carton, se montrent transparentes. Ces rayons, dont l'origine est encore controversée et qui sont appelés *rayons X*, paraissent prendre naissance au moment où les rayons cathodiques viennent frapper la surface intérieure du verre de l'ampoule de Crookes; après avoir

traversé le verre, ils présentent des propriétés spéciales. Ils se propagent

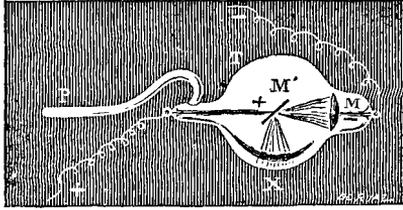


Fig. 911.

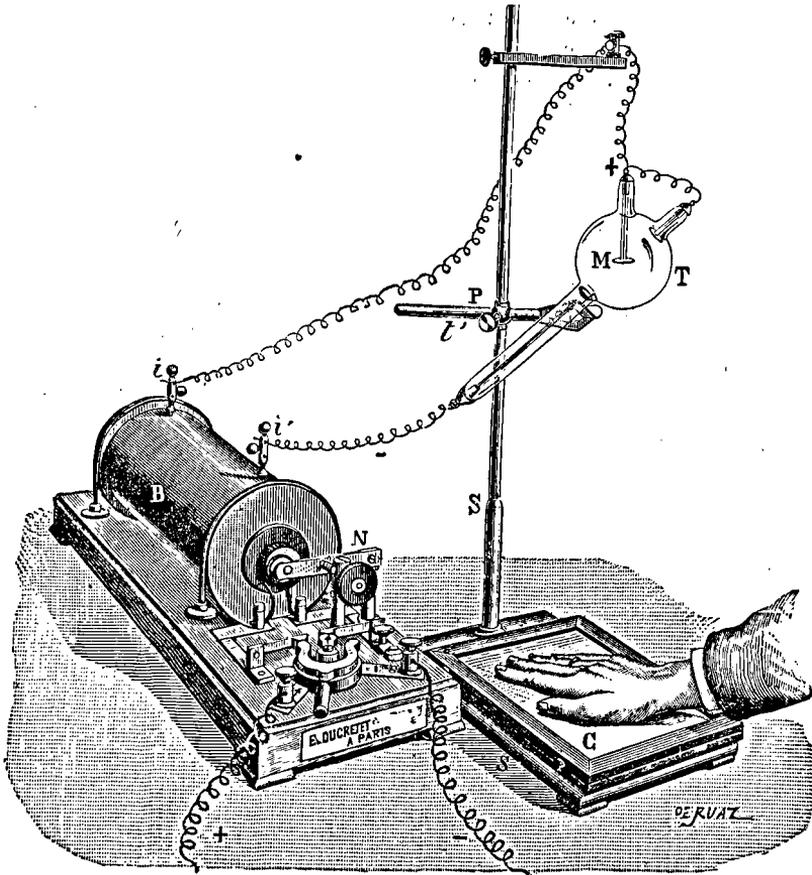


Fig. 912.

facilement à travers l'air, le papier, le diamant, le bois, etc.; ils sont arrêtés

par le verre, par les métaux. Ils impressionnent les plaques photographiques. Tandis qu'ils passent aisément à travers les muscles des animaux, ils sont arrêtés d'une façon beaucoup plus complète par les os. C'est cette différence inattendue qui a conduit à des applications importantes pour le diagnostic chirurgical.

On donne le nom de *radiographie* à l'épreuve photographique qu'on obtient par les procédés ordinaires des corps interposés sur le trajet d'un faisceau de rayons X; on appelle *radioscopie* l'observation directe de ces mêmes corps quand on fait tomber sur un écran fluorescent les rayons qu'ils laissent passer, au lieu de les recevoir sur une plaque photographique.

Pour réaliser ces expériences, on envoie le courant de quelques accumulateurs dans le circuit inducteur d'une bobine d'induction; le fil induit est relié par ses extrémités avec les électrodes d'un tube de Crookes d'une construction particulière (fig. 911). La cathode est un miroir sphérique concave M qui concentre les rayons cathodiques qu'il émet sur un plan de platine M', incliné à 45° sur l'axe du miroir. De là partent des rayons qui traversent le verre et viennent impressionner une plaque photographique ou provoquer la fluorescence d'un écran sur lequel on a tamisé de la poudre de *platino-cyanure de baryum*.



Fig. 913.



Fig. 914.

En interposant la main (fig. 912) entre le tube et une plaque photographique enveloppée de papier noir, on a une épreuve radiographique; cette épreuve représente une silhouette résultant d'une ombre portée; en remplaçant la plaque sensible par un écran fluorescent et en regardant la main à travers l'écran, on voit distinctement le squelette formant ombre au milieu

des muscles qui se laissent mieux traverser et constituent la pénombre. Toute déformation du squelette devient ainsi nettement visible.

Les applications chirurgicales de ce mode d'investigation se comprennent d'elles-mêmes. La figure 913 représente une main d'enfant sans lésions, la figure 914 représente une main d'adulte. Les taches noires qui apparaissent sur le métacarpien du médius et sur le métacarpien du petit doigt, ainsi que celles qu'on voit disséminées dans l'espace interdigital compris entre l'index et le pouce, se rapportent à des fragments de verre qui avaient pénétré dans cette main par un accident de laboratoire, et dont quelques-uns, ceux qu'on aperçoit ici, n'avaient pu être extraits. Tout autre moyen de recherche serait impuissant à les déceler. On comprend qu'un fragment de métal, logé dans les tissus ou incrusté dans les os, est mis en évidence de la même manière.

Ajoutons qu'un conducteur électrisé et chargé d'électricité positive ou négative, soustrait à l'influence du champ électrostatique qui entoure l'ampoule de Crookes, se décharge quand on l'expose aux rayons X.

1020. Transformateurs. — La bobine d'induction peut être considérée comme un transformateur d'énergie. Elle convertit un courant de grand débit et de différence de potentiel faible en un courant de débit très petit, mais de différence de potentiel extrêmement grande. S'il n'y avait pas de perte dans la transformation, l'énergie ne varierait pas; le produit EIt correspondant à l'énergie développée par le premier courant serait égal au produit $E'I't$ du deuxième.

On peut effectuer la transformation *inverse*. En faisant passer dans le fil fin d'une bobine les courants induits d'une autre bobine, on recueille dans le gros fil un courant de grande intensité et de faible différence de potentiel. Cela résulte des principes que nous avons appliqués en faisant la théorie de la bobine d'induction. Au moment de la fermeture et de la rupture des courants primaires qui circulent dans le fil fin, les spires du fil fin déterminent dans le gros fil la production des courants induits; les courants induits dus aux très nombreuses spires du fil fin s'ajoutent dans le gros fil et donnent ainsi lieu à un débit important; quant à la force électromotrice, elle ne peut être que faible puisqu'elle est la somme des forces électromotrices relatives à un petit nombre de spires (spires du gros fil).

Pour construire un transformateur industriel, on enroule sur un tore en fils de fer deux circuits bien distincts, bien isolés l'un de l'autre, *l'un à gros fil*, composé d'un petit nombre de spires, *l'autre à fil fin*, comprenant des spires très nombreuses. Il n'y a dans cet appareil aucune pièce mobile.

La bobine d'induction (1016) est un transformateur à circuit magnétique ouvert. Les transformateurs industriels, tels ceux qui sont employés dans l'éclairage électrique (1037) ont un circuit magnétique fermé.

TÉLÉPHONE

Un téléphone est un appareil magnétoélectrique capable de *transmettre la parole à distance* entre deux stations S et S'. On parle en S dans un transmetteur, et on écoute en S' dans un récepteur. La communication s'effectue par un double fil métallique reliant le transmetteur au récepteur.

1021. Téléphone magnétique. — Le transmetteur et le récepteur sont identiques. Le téléphone de Graham

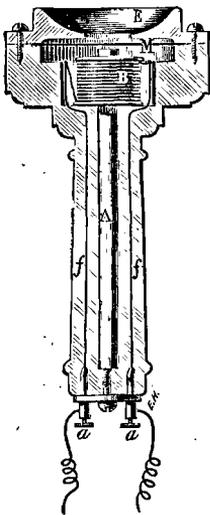


Fig. 915.

Bell consiste en un barreau aimanté droit A, entouré à l'une de ses extrémités polaires d'une bobine B de fil fin recouvert de soie. A une très petite distance de ce pôle, une plaque circulaire de tôle mince M est fixée par ses bords sur une portée pratiquée dans une gaine en bois qui enveloppe l'appareil (fig. 915). Les fils *f* de la bobine du transmetteur se prolongent au delà des bornes *a* par un double fil qui se rend à la bobine du récepteur.

Si on parle à la station S dans le cornet E qui surmonte la plaque du téléphone transmetteur, les vibrations de l'air se communiquent à la plaque M qui se rapproche et s'éloigne alternativement de l'aimant sans le toucher⁽¹⁾, en modifie l'aimantation et fait varier les lignes de force qui traversent la bobine (1003, III). De là une production de courants

induits intermittents qui se propagent dans les deux fils de ligne et vont passer dans la bobine du téléphone récepteur à la station S' (fig. 916). Ces courants produisent des variations correspondantes du magnétisme de l'aimant récepteur et déterminent dans la plaque des vibrations identiques à celles de la plaque du transmetteur. En approchant l'oreille du cornet du récepteur, on entend les sons émis dans le cornet du transmetteur. Pour éviter des courants induits

(1) Une vis permet de régler le téléphone en faisant avancer ou reculer l'aimant par rapport à la plaque vibrante.

étrangers qui troubleraient les communications, les fils de ligne sont formés de deux fils isolés l'un de l'autre et tordus ensemble.

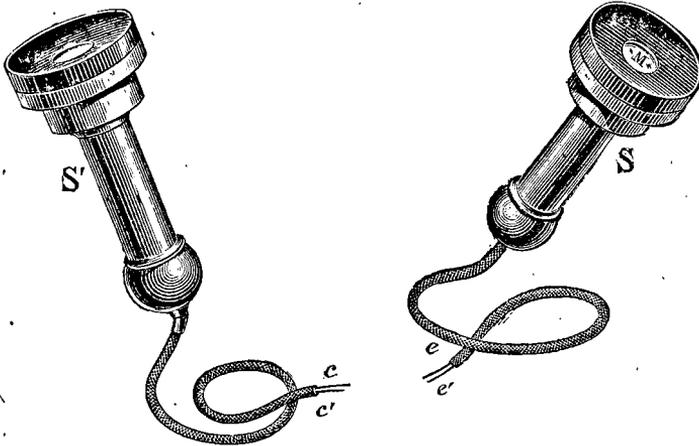


Fig. 916.

Les courants induits du téléphone transmetteur sont très faibles, et le son produit au récepteur est peu intense. Le téléphone à pile donne des sons plus intenses, et permet la transmission à *grande distance*.

1022. Téléphone à pile. — Dans le téléphone à pile, un *courant continu* parcourt le fil de ligne, la voix ne fait que modifier l'inten-

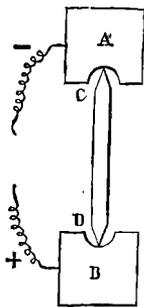


Fig. 917.

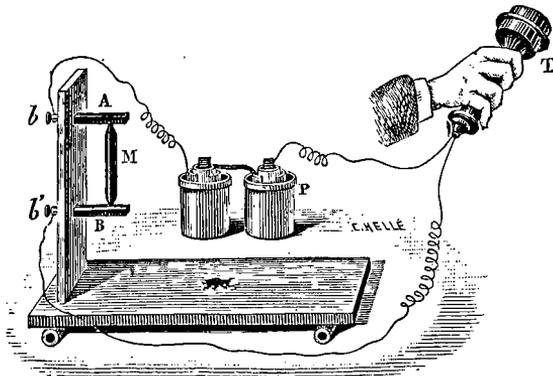


Fig. 918.

sité de ce courant. Un téléphone intercalé dans le circuit d'une pile à courant constant ne fait entendre aucun son. Mais des variations

d'intensité dues aux variations de résistance d'un *microphone* annexé au circuit du téléphone modifient le magnétisme de l'aimant, et font vibrer la plaque. Dans le téléphone à pile, le transmetteur est un microphone et le récepteur un téléphone.

Le **microphone**, imaginé par Hughes, consistait primitivement en un crayon de charbon de cornue CD taillé en pointe à ses deux extrémités et placé en équilibre instable dans deux cavités A et B creusées dans des supports de charbon (fig. 917). Le crayon et les supports de charbon font partie d'un circuit comprenant une pile P et un téléphone magnétique récepteur T. Les supports A et B sont fixés à une mince planchette élastique verticale qui repose elle-même sur un socle (fig. 918), et devant laquelle il suffit de parler pour déterminer de légers déplacements des points de contact du crayon et des supports. Les variations de résistance qui en résultent déterminent des variations de l'intensité du courant et modifient le magnétisme de l'aimant récepteur; la plaque du téléphone reproduit par ses vibrations les sons émis.

Le **transmetteur Ader**, un des plus employés, consiste en une boîte munie d'un couvercle en sapin mince au-dessous duquel se

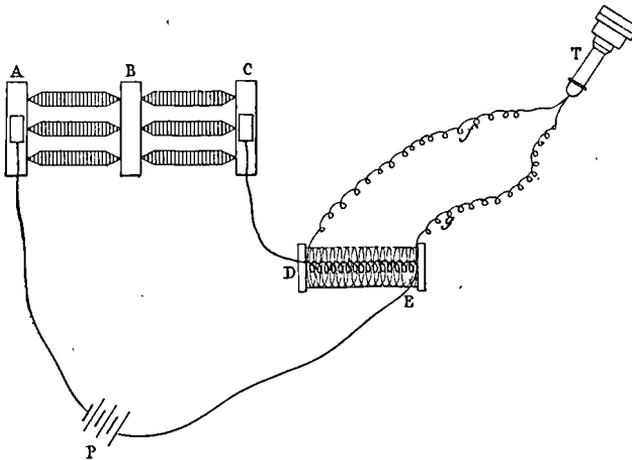


Fig. 919.

trouve le microphone. Ce sont des baguettes de charbon disposées parallèlement pour offrir par leur ensemble moins de résistance au courant de la pile (927); elles s'engagent par leurs extrémités dans des cavités pratiquées à l'intérieur de prismes de charbon A, B, C (fig. 919), et y reposent librement sans serrage. Les sons émis au-

dessus de la boîte mettent en vibration le couvercle et font varier les contacts du microphone.

Emploi d'une bobine d'induction. — Si la ligne est longue et par conséquent très résistante, les variations de résistance du microphone deviennent inappréciables et n'apportent qu'une modification de l'intensité insuffisante pour agir efficacement sur le récepteur. On emploie alors avec avantage une bobine d'induction. Le fil inducteur de la bobine, le microphone transmetteur ABC et la pile P forment un premier circuit de faible résistance; le fil induit de la bobine, les fils de ligne *fg* et le téléphone récepteur T forment un deuxième circuit (fig. 919). Les variations d'intensité provoquées dans le fil inducteur par les vibrations du microphone réagissent par induction sur le fil induit, et y développent des courants variables de grande force électromotrice qui agissent vivement sur le récepteur. Ce système permet de franchir des distances considérables.

MACHINES D'INDUCTION

1023. Les générateurs de courants fondés sur l'induction *transforment du travail mécanique en énergie électrique par l'intermédiaire de l'induction.*

Ces appareils comprennent : 1° un système **inducteur** établissant un champ magnétique; 2° un système **induit** formé de conducteurs que l'on déplace dans un champ magnétique où ils interceptent un flux de force variable et sont parcourus par des courants induits; 3° un **collecteur** employé à recueillir les courants induits.

Les réactions électromagnétiques des courants induits sur le système inducteur déterminent des résistances au mouvement (*loi de Lenz*) qui donnent lieu à une dépense de travail. Ce travail entretient l'énergie électrique développée par induction (1008) et lui est équivalent.

Suivant que les inducteurs sont des aimants permanents ou des électroaimants, le générateur est dit *magnétoélectrique* ou *dynamo-électrique*.

On distingue deux classes d'appareils :

I. Des machines à *courants continus* telles que la machine de Gramme, dont le courant reste à peu près constant, et agit comme le courant d'une pile.

II. Des machines à *courants alternatifs* ou *alternateurs* dont le courant est variable et change de sens à des intervalles de temps égaux et très rapprochés. Nous décrivons la machine de Siemens et la machine de Clarke.

MACHINE DE GRAMME

1024. Description (fig. 920). — Entre les pôles d'un aimant en fer à cheval tourne un **anneau** ou cylindre creux constitué par un

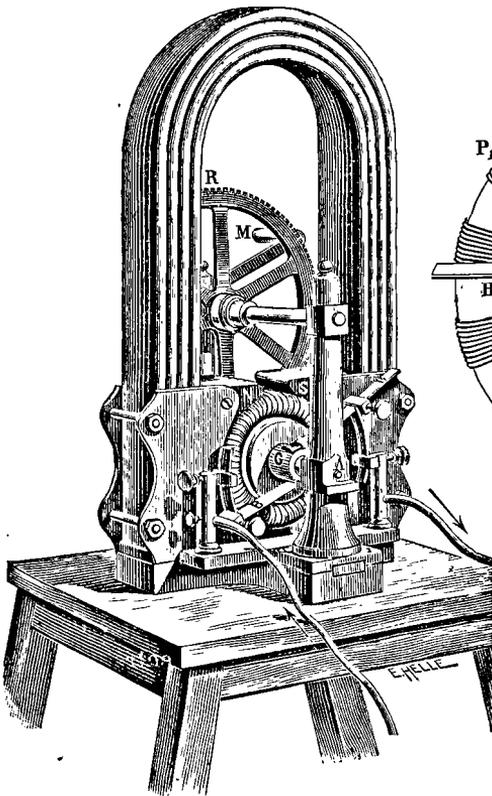


Fig. 920.

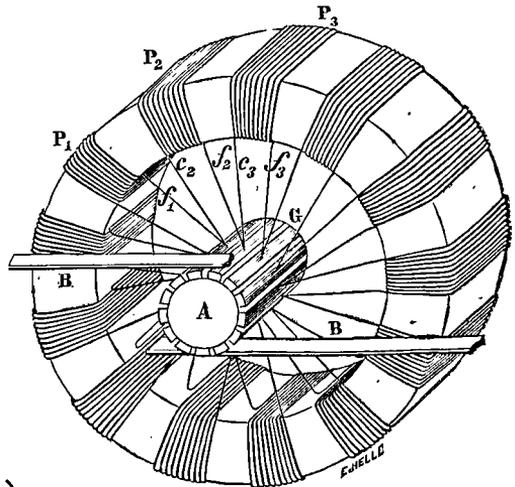


Fig. 921.

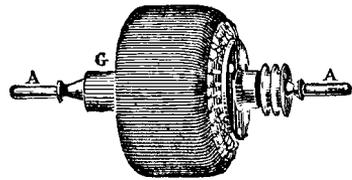


Fig. 922.

faisceau de fils de fer doux, mobile autour de son axe qui est perpendiculaire au plan de l'aimant.

Sur cet anneau est enroulé un fil conducteur isolé formé par un

grand nombre de bobines aplaties $P_1, P_2, P_3 \dots$ renfermant toutes le même nombre de spires et réunies en un circuit unique. L'anneau et les bobines constituent un électroaimant sans solution de continuité (fig. 921).

Le point de jonction de deux bobines consécutives P_2 et P_3 se trouve à la réunion du fil f_2 qui termine P_2 , et du fil c_3 qui commence P_3 ; il est relié à une lame conductrice formant une génératrice d'un cylindre G qui a même axe que l'anneau et fait corps avec lui (fig. 922). Ce cylindre G à génératrices métalliques *isolées* les unes des autres forme le *collecteur*. C'est autour de son axe A que s'opère la rotation.

Deux frotteurs B ou *balais* métalliques s'appuient constamment sur le collecteur et sont en contact avec deux ou trois génératrices du collecteur correspondant aux extrémités du diamètre vertical de l'anneau; ce diamètre est perpendiculaire à la ligne des pôles de l'aimant NS . Chacun des balais est relié à une borne à laquelle s'attache un des fils d'un circuit extérieur.

Fonctionnement. — **Lignes de force du champ magnétique inducteur.** — L'anneau de fer doux s'aimante transversalement par l'influence des deux pôles N et S de l'aimant et présente deux larges pôles contraires à ceux de l'aimant (s en face de N et n en face de S).

Les lignes de force de l'aimant fixe, au lieu de se diriger en ligne droite de son pôle nord à son pôle sud, s'inclinent et se bifurquent pour se rendre au pôle sud en passant circulairement (888)

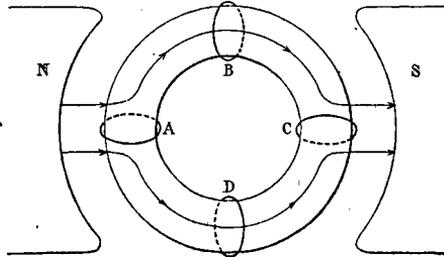


Fig. 923.

à travers la masse de fer de l'anneau (fig. 923). Le flux ne traverse ainsi qu'une petite épaisseur d'air appelée *entrefer*⁽¹⁾, comprise entre les pôles de l'aimant et l'anneau.

(1) Il importe que l'entrefer soit très étroit, afin que le flux magnétique du circuit formé par l'aimant, l'entrefer et l'anneau ne soit pas trop réduit (998) par la résistance de l'air de l'entrefer.

Si l'on suppose les lignes de force d'autant plus serrées que la force magnétique est plus grande, il n'y a pas lieu de figurer de ligne de force dans l'air à l'intérieur de l'anneau où la force magnétique est très faible. Les lignes de force issues des différents points du pôle N présentent leur maximum de concentration dans la section de l'anneau par le plan vertical MM' qui passe par l'axe de rotation (fig. 924).

Malgré la rotation de la masse de l'anneau, en raison de la forme qu'il présente, les lignes de force gardent une situation invariable dans l'espace, *comme si l'anneau ne tournait pas*.

Courants induits dans une spire. — Soit une spire enroulée sur l'anneau et tournant avec lui; son centre décrit une circonférence

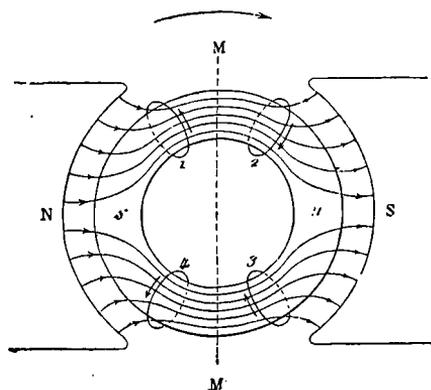


Fig. 924.

dans un plan parallèle aux lignes de force et perpendiculaire à l'axe de rotation. Lorsque la spire est en A, le flux qui la traverse est nul; il augmente ensuite et devient maximum en B; puis le flux diminue et devient nul en C; il croît ensuite, redevient maximum en D, puis nul en A (fig. 923).

Nous allons déterminer le sens du courant induit en étudiant la spire dans quatre positions situées de part et d'autre du plan vertical MM' (fig. 924).

Position 1. — La spire 1 s'éloigne du pôle s de l'anneau (situé en face du pôle nord N de l'aimant fixe); le feuillet magnétique équivalent au courant qui est induit dans cette spire, doit avoir une aimantation telle que son action sur s gêne le mouvement (1007); il doit donc être attiré par le pôle s, et pour cela sa face positive ou nord est dirigée vers le pôle sud de l'anneau. D'après le sens dans lequel un observateur placé devant le pôle nord voit circuler le courant induit (974), ce courant est *centrifuge* (par rapport au centre de l'anneau) sur la partie antérieure de la figure ⁽¹⁾.

(1) On peut encore prévoir le sens du courant dans les diverses positions de la spire mobile, en appliquant la loi de Lenz sous des formes un peu différentes. Par exemple: dans la position 1, le flux inducteur intercepté par la spire 1 va en croissant; par suite, le flux magnétique induit doit être de sens contraire au flux inducteur, et la spire doit tourner sa face négative vers le plan MM' (fig. 912).

Position 2. — La spire 2 s'approche du pôle n de l'anneau; le feuillet magnétique équivalent doit être repoussé, et par conséquent présenter sa face positive au pôle nord de l'anneau (courant centripète sur la partie antérieure de la figure).

Position 3. — La spire 3 s'éloigne du pôle nord de l'anneau, et, pour être attirée, lui présente sa face négative (courant centripète).

Position 4. — La spire 4 s'approche du pôle sud de l'anneau, et, pour être repoussée, lui présente sa face négative (courant centrifuge).

La force électromotrice développée au voisinage du plan MM' est très petite, parce que la variation de flux de force y est la moins rapide pour un angle de rotation déterminé (1015, 11°); la force électromotrice développée est au contraire maximum au voisinage du plan horizontal, c'est-à-dire sur la ligne des pôles ns .

Le courant de la spire est de sens contraire de part et d'autre du plan MM' ; il s'annule en M et M' , il est donc périodique.

Courant induit total. — A un moment donné, si l'on considère toutes les spires qui recouvrent l'anneau, les spires de gauche, telles que 1 et 4, sont le siège de forces électromotrices de même sens, qui diminuent depuis le milieu A jusqu'aux extrémités M et M' ; les spires de droite, telles que 2 et 3, sont le siège de forces électromotrices inverses des précédentes.

Toutes les spires qui sont situées d'un même côté du plan MM' sont donc parcourues par des courants de même sens, qui s'ajoutent, puisque toutes les spires communiquent entre elles. Toutes les spires situées de l'autre côté du plan MM' sont parcourues par des courants contraires aux précédents qui s'ajoutent également.

Tout étant symétrique de part et d'autre du plan MM' , le courant induit total de droite est égal au courant induit total de gauche, et ces deux courants se détruiraient pour une vitesse quelconque de l'anneau si le fil qui entoure l'anneau était simplement fermé sur lui-même. Le cas serait analogue à celui de deux piles de forces électromotrices égales, opposées par leurs pôles de même nom dans un circuit fermé.

Captage du courant par le collecteur. — Deux piles égales et opposées P et P' donnent des courants qui s'ajoutent dans un circuit extérieur AMB (fig. 925). De même, si l'on vient à relier les balais B par un conducteur qui forme un circuit extérieur, les spires de droite et de gauche donnent des courants égaux qui s'ajoutent dans ce

circuit. Les balais sont ainsi les *pôles* de la machine. Une machine de

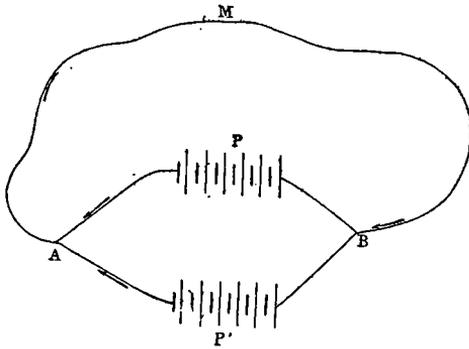


Fig 925.

Gramme donne donc dans un circuit extérieur un courant de sens fixe qui reste constant tant que la vitesse de rotation ne change pas.

Ligne neutre. — La ligne verticale MM' perpendiculaire à la ligne des pôles de l'aimant inducteur est la ligne où le flux qui traverse une spire est maximum : on l'appelle

aussi *ligne neutre*. C'est de part et d'autre de cette ligne les courants de l'anneau changent de sens, et c'est sur les génératrices correspondantes du collecteur qu'on établit le contact des balais.

(1025. Calcul de la force électromotrice. — La quantité d'électricité qui circule en un certain temps dans un circuit induit, s'obtient en divisant par la résistance R du circuit la différence $\Delta\varphi$ des flux de force enveloppés par le circuit au commencement et à la fin du temps considéré (1014).

$$q = \frac{\Delta\varphi}{10^8} \quad q \text{ est exprimé en coulombs, } R \text{ en ohms, } \frac{\Delta\varphi}{10^8} \text{ en volts.}$$

Dans le cas actuel, pour une rotation uniforme, le courant est constant; si nous désignons par I l'intensité moyenne, pour un temps θ quelconque,

$$q = I\theta$$

$$I = \frac{q}{\theta} = \frac{\frac{1}{10^8} \cdot \Delta\varphi}{\theta}.$$

la force électromotrice est proportionnelle à $\frac{\Delta\varphi}{\theta}$.

Le circuit extérieur, intercalé entre les balais, est fixe; il n'y a donc de variation de flux que dans le fil qui entoure l'anneau.

Nous allons calculer $\frac{\Delta\varphi}{\theta}$ en choisissant une valeur de θ pour laquelle $\Delta\varphi$ est aisément obtenu.

Pendant un quart de tour, de durée $\theta = \frac{1}{4n}$, n étant le nombre de tours par seconde, le flux qui traverse une spire varie de 0 à $\frac{\Phi}{2}$ (1), le nombre des

(1) En désignant par Φ le flux total qui se rend d'un pôle à l'autre de l'aimant qui produit le champ magnétique.

spires d'une moitié de l'anneau est $\frac{N}{2}$, si N désigne le nombre total des spires; la variation du flux pour une moitié de l'anneau pendant un quart de tour sera $\frac{N}{2} \cdot \frac{\Phi}{2}$ et la force électromotrice est proportionnelle à

$$\frac{\frac{N}{2} \cdot \frac{\Phi}{2}}{\frac{1}{4n}} = nN\Phi.$$

Elle est proportionnelle au nombre de spires, au nombre de tours par seconde, au flux de force du champ magnétique.)

(1026. Calcul de l'énergie électrique utilisable. — Si l'on représente par une ordonnée E la force électromotrice du générateur, et si l'on développe le circuit total sur une horizontale en attribuant à ses diverses parties des longueurs proportionnelles à leurs résistances, la différence de potentiel aux bornes sera inférieure à E , égale à e (fig. 956), car la résistance ρ de l'anneau détermine une chute de potentiel. D'après la loi d'Ohm, l'intensité est donnée par l'équation :

$$I = \frac{E - e}{\rho}$$

L'énergie dépensée pour faire fonctionner une machine magnéto-électrique comprend, outre l'énergie dissipée par les frottements dans la marche à vide :

1° un travail perdu, correspondant à l'énergie électrique convertie en chaleur dans l'anneau ; 2° de l'énergie disponible aux bornes.

e désignant la différence de potentiel aux bornes à circuit fermé, le travail utilisable par seconde est eI :

$$eI = e \frac{E - e}{\rho}$$

$e + E - e = E$, le produit $e(E - e)$ est donc maximum pour $e = E - e$, d'où $e = \frac{E}{2}$, le travail maximum par seconde est $\frac{E^2}{4\rho}$, le rendement $\frac{eI}{EI} = \frac{e}{E}$ est alors $\frac{1}{2}$.)

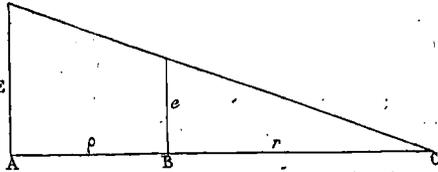


Fig. 926.

Courants de Foucault. — Par suite du déplacement de l'anneau dans le champ magnétique, des courants induits inutilisables se produiraient dans sa masse; on les supprime en formant l'anneau de fils de fer isolés ayant leur plan perpendiculaire à l'axe de rotation, de sorte qu'il ne s'y développe pas de force électromotrice.

1027. Machines industrielles. — Pour rendre la machine de Gramme plus puissante et susceptible d'applications industrielles, on accroît considérablement le flux de force inducteur en substituant à l'aimant fixe un électroaimant.

(Le champ magnétique dû à un aimant permanent n'occasionne aucune dépense tandis que l'emploi d'un électroaimant exige une énergie i^2r , i désignant l'intensité du courant excitateur, et r la résistance du fil de l'électroaimant. Mais, d'autre part, le champ magnétique d'un électroaimant peut devenir très intense, et la force électromotrice induite étant proportionnelle au flux de force inducteur aussi bien qu'au nombre des spires, il devient possible de réduire la longueur du fil de l'anneau et par conséquent sa résistance; on réduit en même temps la perte d'énergie i^2r' dans le circuit induit, i' intensité du courant réduit, r' résistance de l'anneau induit. A égalité de puissance, les machines à électroaimant sont en outre beaucoup moins volumineuses que les machines à aimants permanents et par conséquent moins coûteuses.)

L'électroaimant inducteur se compose de deux noyaux en fer

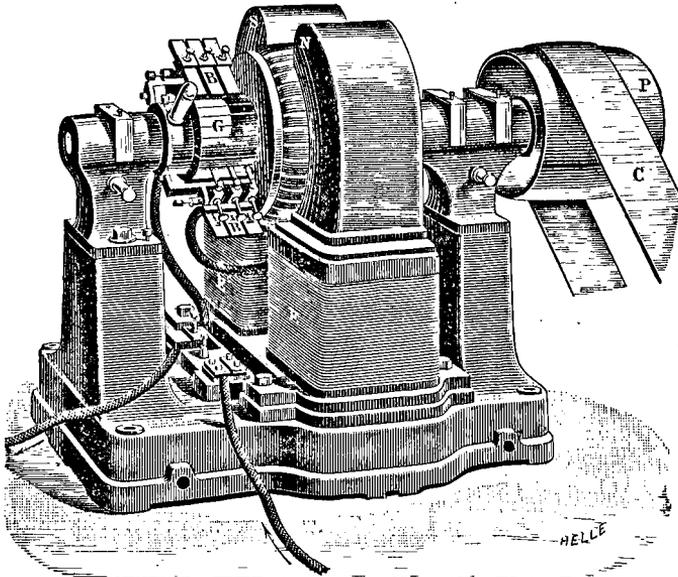


Fig. 927.

autour desquels est enroulé le circuit exciteur, les noyaux sont réunis en bas par une pièce de fer appelée *culasse*; ils sont terminés en haut par des pièces polaires évidées en deux demi-cylindres entre lesquels tourne l'anneau (fig. 927). G est le cylindre collecteur sur lequel frottent les balais B. La poulie P centrée sur l'axe de rotation est entraînée par la courroie C.

Autoexcitation des machines à courants continus. — L'électroaimant E d'une machine à courants continus pourrait être animé par une machine auxiliaire ou *excitatrice*; le circuit inducteur serait ainsi complètement indépendant du circuit induit AB (fig. 928).

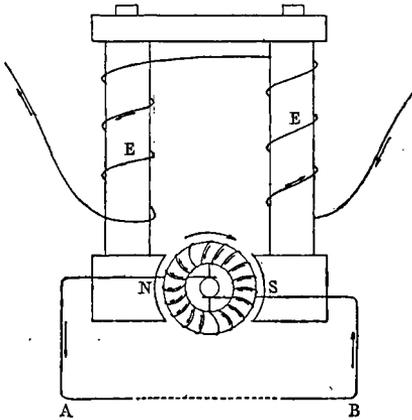


Fig. 928.

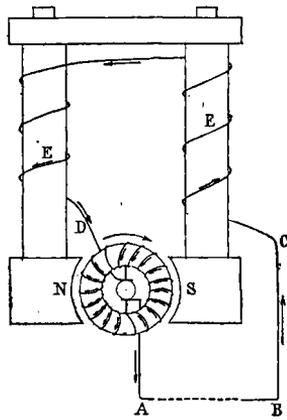


Fig. 929.

On évite la complication qu'entraîne l'emploi d'une machine ou d'une pile auxiliaire en dirigeant dans l'électroaimant le courant produit dans l'armature elle-même. L'armature, l'électroaimant et le circuit extérieur peuvent ainsi ne former qu'un seul circuit (fig. 929); on les dit associés *en série*. La machine est alors *autoexcitatrice*.

Quand l'armature est mise en mouvement, la petite aimantation rémanente que conservent les noyaux de l'électroaimant suffit pour produire par induction dans l'anneau un courant d'abord faible, qui augmente à son tour l'aimantation de l'électroaimant⁽¹⁾ et accroît graduellement le champ magnétique jusqu'à sa valeur de régime. La machine est alors dite *amorcée*.

(1) Les connexions de l'électroaimant inducteur et de l'anneau induit doivent être établies de façon que le courant qui prend naissance dans l'armature en mouvement ait dans l'électroaimant une direction telle qu'il augmente le magnétisme rémanent de son noyau.

Nombre de spires de l'anneau. — Suivant que la machine doit être employée pour l'électrometallurgie ou l'éclairage, sa construction change. En effet, comme dans le cas des piles (926), il convient d'augmenter le nombre des spires de l'anneau si la résistance extérieure est forte (on obtient ainsi une machine à *haut potentiel*), ou de prendre un petit nombre de spires à gros fil si la résistance extérieure est faible (machine à *faible potentiel* et à grand débit). Une spire de l'anneau joue dans la machine le même rôle qu'un élément dans une pile.

Applications. — 1° Dans une machine de Gramme en série, la résistance de l'armature est 0,20 ohm, la résistance de l'électroaimant 0,60 ohm. La résistance extérieure étant 15 ohms, quelle doit être la force électromotrice pour que l'intensité du courant soit 10 ampères ?

2° Une machine de Gramme, à excitation indépendante, donne un courant de 2 ampères avec 800 tours par seconde. Quel devra être le nombre de tours pour fournir un courant de 6 ampères dans le même circuit ?

3° Un ampèremètre placé dans le circuit d'une machine de Gramme marque 6 ampères, un voltmètre relié aux balais à circuit fermé marque 10 volts. La résistance intérieure de la machine étant 2 ohms, quelle est la force électromotrice ?

4° Une machine de Gramme à excitation indépendante a une résistance intérieure de 0,01 ohm et une force électromotrice de 90 volts. Quelle intensité peut-elle produire théoriquement en court circuit ?

5° Une machine de Gramme actionnée par un moteur de 4 chevaux-vapeur fournit 30 ampères avec une différence de potentiel de 70 volts aux balais en circuit fermé. Quelle est la fraction utilisable du travail du moteur ?

6° Un moteur de 4 chevaux-vapeur fait tourner l'anneau d'une machine dynamo-électrique. La résistance intérieure étant 0,025 ohm, la résistance extérieure 0,20, l'intensité du courant 100 ampères, calculer : 1° la fraction du travail moteur convertie en énergie électrique ; 2° la fraction du travail moteur convertie en énergie utilisable ?

7° La résistance de l'armature d'une machine de Gramme à excitation indépendante est 0,1 ohm ; ses pôles sont réunis à une résistance de 100 ohms, puis à une résistance de 5 ohms. Quel est le rapport des quantités de chaleurs dégagées dans les deux cas dans l'armature, en supposant que la machine tourne avec la même vitesse ?

8° La résistance de l'armature d'une machine de Gramme à excitation indépendante est 0,4 ohm. A circuit ouvert, il faut 0,01 cheval-vapeur pour faire faire à l'anneau n tours par seconde ; à circuit fermé, la résistance du circuit extérieur étant 3,6 ohms. il faut 0,1 cheval-vapeur. Combien faudra-t-il de chevaux-vapeur pour avoir la même vitesse de rotation quand la résistance extérieure est 0,1 ohm ?

MOTEURS ÉLECTRIQUES

1028. Réversibilité de la machine de Gramme. — On dépense de l'énergie mécanique (1023) pour faire tourner l'anneau d'une machine de Gramme entre les pôles de l'aimant inducteur ; le courant électrique qui prend naissance dans les spires de l'anneau est recueilli aux deux balais qui frottent sur le collecteur et utilisé dans le circuit extérieur : le travail mécanique dépensé se trouve en partie *converti en énergie électrique*.

Inversement, si par les deux balais, on dirige dans l'anneau un courant suffisamment intense, de même sens que le courant précédemment produit, l'anneau se met à tourner sous l'action des pôles de l'aimant, *en sens contraire* du mouvement qui donnait naissance à ce courant par induction et devient une source de travail mécanique ou un **moteur** capable d'entraîner divers appareils reliés à son axe par une poulie et une courroie. L'énergie électrique du courant est alors en partie *transformée en travail mécanique*.

La possibilité d'obtenir, avec les machines semblables à la machine de Gramme, soit la transformation d'un travail mécanique en énergie électrique, soit la transformation inverse, constitue la *réversibilité* de ces machines.

Le courant qu'on dirige dans l'anneau peut être emprunté à une pile, mais on peut aussi utiliser le courant d'une autre machine de Gramme qu'on appelle alors **génératrice**; la machine qui reçoit le courant et fonctionne comme moteur s'appelle **réceptrice**.

(**Sens de la rotation.** — Pour nous rendre compte du sens du mouvement de rotation que prend l'anneau sous l'influence d'un aimant quand on y fait pénétrer un courant par les balais, supposons que le sens de ce courant est celui du courant induit qui prend naissance quand la machine fonctionne comme génératrice.

Les spires 1, 2, 3, 4 de la figure 930 seront parcourues par des courants dont le sens est marqué par les flèches (le même que dans la figure 924).

La spire 1 ne pouvant être en équilibre stable que si elle s'oriente de façon à embrasser un flux maximum (976), c'est-à-dire normalement aux lignes de force, celles-ci pénétrant par sa face négative, elle tournera pour

cela dans le sens inverse du sens dans lequel on faisait tourner l'anneau dans la figure), afin de se placer en M' dans le plan MM' .

La spire 2 serait en équilibre stable dans le plan MM' en M ; elle sera poussée dans le sens inverse comme la spire 1.

Même sens de rotation pour les spires 3 et 4.

La rotation aura lieu pour toutes les spires *en sens contraire* de la rotation qu'on doit donner à l'anneau pour lui faire produire le même courant, quand la machine fonctionne comme génératrice.)

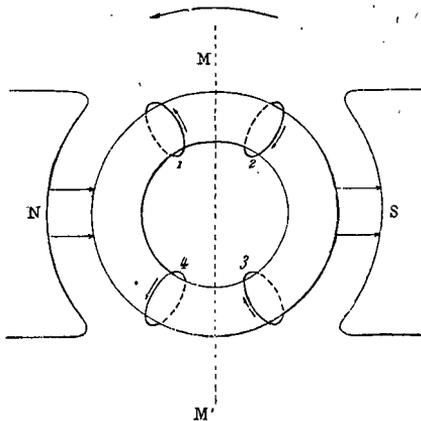


Fig. 930.

Avantages des moteurs électriques. — Une courroie ne peut transporter le travail qu'à de petites distances ; par l'emploi des moteurs électriques, la machine génératrice pouvant être très éloignée de la machine réceptrice, on peut effectuer le *transport du travail à de grandes distances* par des *conducteurs flexibles* qui permettent des changements de direction et de niveau. Les moteurs électriques permettent ainsi d'utiliser des forces naturelles éloignées des centres industriels.

(1029. **Rendement d'un moteur électrique.** — Nous considérerons seulement le cas où la génératrice et la réceptrice sont deux machines identiques, à excitation indépendante de l'armature, ayant des forces électromotrices E et e proportionnelles aux nombres de tours respectifs n et n' des anneaux par seconde.

Si l'on empêche la réceptrice de tourner, toute l'énergie électrique que développe le courant de la génératrice est proportionnelle à la résistance et se transforme en chaleur. Si on la laisse tourner, une force contreélectromotrice e y prend naissance : elle est due à ce que l'armature tourne dans un champ magnétique et devient le siège d'un courant induit qui doit gêner le mouvement ; l'intensité du courant diminue pour cette raison lorsque le régime de marche est établi, elle devient $i = \frac{E - e}{R}$, R résistance totale du circuit. La puissance de la génératrice ou l'énergie qu'elle développe en une seconde est Ei , la chaleur dégagée dans le circuit n'est que $(E - e)i$, la différence ei est le travail effectué dans l'unité de temps par la réceptrice.

On voit qu'une partie de l'énergie électrique dépensée dans le moteur est restituée sous forme d'énergie mécanique, le reste sert à échauffer, en pure perte, suivant la loi de Joule, les conducteurs de la réceptrice.

On appelle *rendement électrique* le rapport

$$\frac{ei}{Ei} \text{ ou } \frac{e}{E}.$$

La puissance de la réceptrice est :

$$ei \text{ ou } \frac{e(E - e)}{R}.$$

La puissance ou le travail par seconde diminue à mesure que e augmente c'est-à-dire quand la vitesse de rotation augmente, car alors e tend vers E ; en même temps que la puissance diminue, le rendement augmente et tend vers 1.

La somme $e + E - e$ étant constante, égale à E , le produit $e(E - e)$ est maximum quand les facteurs sont égaux, ce qui donne $e = \frac{E}{2}$ et $i = \frac{E}{2R}$; la puissance ei est alors $\frac{E^2}{4R}$ et le rendement $\frac{e}{E} = \frac{1}{2}$.

La puissance réellement utilisable, celle que l'on peut mesurer au frein sur la machine, est toujours inférieure à la puissance théorique.

Supposons que la différence de potentiel entre les deux bornes de la réceptrice soit 400 volts, et l'intensité du courant 10 ampères. La puissance électrique disponible dans le récepteur est 4000 watts. Si la résistance de la réceptrice est 3 ohms, il y a $3 \cdot 10^2 = 300$ wats qui disparaissent sous forme de chaleur. Il reste 3700 wats qu'on recueille sous forme mécanique.

Applications. — 1° Une génératrice et une réceptrice ont toutes les deux 10 ohms de résistance, le conducteur qui les réunit a 2 ohms de résistance. A la vitesse de régime, la génératrice présentant une force électromotrice de 200 volts et la réceptrice une force électromotrice de 134 volts, quel est le rendement de la réceptrice ?

2° Un circuit renferme une génératrice et une réceptrice. L'énergie électrique développée par la génératrice absorbe 20 chevaux-vapeur, sa force électromotrice est triple de celle de la réceptrice. Quelle est la puissance de la réceptrice, quelle est la chaleur dégagée en une seconde dans le circuit entier ?

3° On installe à 10 kilomètres d'une génératrice fonctionnant à 150 volts un récepteur qui doit fournir à 130 volts un travail d'un cheval-vapeur; le rendement du récepteur est 0,90. Quel doit être le diamètre d du fil de cuivre qui relie les deux stations, le cuivre ayant une résistance spécifique 1,59 (en microhms) ?

Quel serait le prix de revient de ce fil de cuivre, en supposant qu'il coûte 2 francs 80 le kilo, et que sa densité est 8,8.

MACHINES A COURANTS ALTERNATIFS

1030. Un courant variable qui reprend la même valeur à des intervalles de temps égaux est appelé *périodique* : la **période** est l'intervalle qui sépare deux valeurs égales de l'intensité, la **fréquence** est le nombre de périodes par seconde⁽¹⁾.

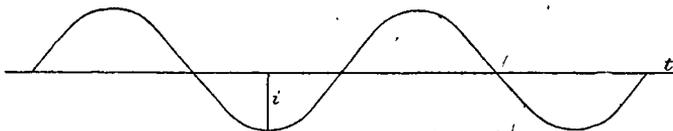


Fig. 931.

Si la période est formée de deux demi-périodes égales pendant lesquelles les intensités sont égales et de *signes contraires*, le courant est dit *alternatif*. En portant le temps sur un axe horizontal et l'intensité du courant sur des verticales, en comptant les ordonnées au-dessus et au-dessous de l'axe horizontal pour des temps qui correspondent aux deux sens successifs du courant, l'intensité d'un courant alternatif est représentée par une courbe analogue à la figure 931.

Pour le fonctionnement continu d'une machine quelconque, et en

(1) Les fréquences ordinairement employées dans les machines à courants alternatifs sont des basses fréquences, elles varient de 40 à 80 périodes par seconde.

particulier d'un générateur de courants induits, les pièces mobiles et les pièces fixes doivent reprendre *périodiquement* la même position relative. Dans ce mouvement, le flux de force repasse par la même valeur après une période ; par suite, dans cet intervalle il augmente, atteint un maximum, diminue, passe par un minimum et reprend enfin sa valeur primitive ⁽¹⁾.

Pendant l'accroissement du flux, le courant induit a un certain sens ; et pendant la diminution, un sens inverse. Au passage par le maximum et par le minimum le courant induit est nul (1015, 11°), car un maximum et un minimum correspondent à des variations nulles.

Une bobine appartenant à un générateur de courants induits, mobile dans un champ magnétique, est donc traversée par des courants qui changent périodiquement de sens. Toutefois, le courant peut être continu dans le circuit extérieur si un commutateur redresse les courants. Dans une machine de Gramme, où le courant change de sens à chaque demi-tour dans une même spire de l'armature, le redressement est réalisé par le collecteur.

Lorsqu'on peut faire usage de courants alternatifs pour l'effet qu'on se propose d'obtenir, un commutateur devient superflu. C'est le cas de l'éclairage électrique.

1031. Machine de Siemens. — Description. — Dans la machine

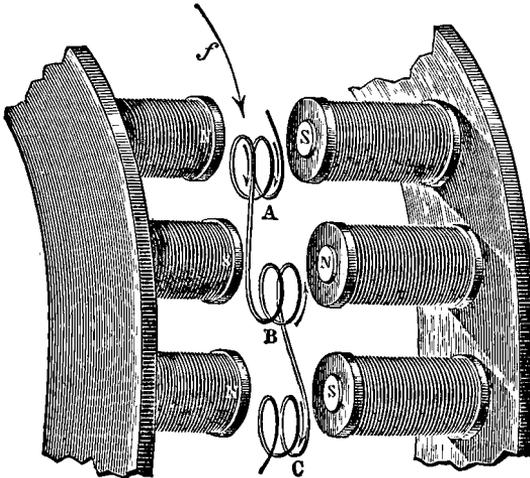


Fig. 932.

de Siemens que nous choisissons pour type, l'induit se compose d'une couronne de bobines plates A, B, C sur lesquelles circule un même fil qui présente un enroulement alternativement inverse, les bobines A, C... étant enroulées dans un sens, et les bobines B, D... en sens contraire. Ces bobines sont

(1) Ou la succession des variations est inverse.

adaptées à un disque en bronze, mobile autour de son axe dans un champ magnétique formé par les pôles de *deux séries parallèles d'électroaimants fixes*, les noyaux de chaque série étant montés sur un bâti circulaire en fonte (fig. 932). Les bobines mobiles forment un induit à disque dont le plan est perpendiculaire à l'axe de rotation. Les pôles en regard de deux électroaimants sont de noms contraires; il en est de même des pôles de deux électroaimants contigus. Ces électroaimants sont donc en nombre pair, ils sont excités par le courant d'une petite machine auxiliaire à courants continus appelée *excitatrice*.

Les bobines du disque mobile sont *en même nombre* que les électroaimants de chaque bâti, et remplissent presque exactement l'espace laissé libre entre les pôles fixes.

Les deux extrémités libres du fil induit aboutissent à deux bagues métalliques isolées, fixées sur l'axe de rotation et sur lesquelles frottent des balais qui conduisent le courant dans le circuit extérieur K (fig. 933).

Représentons l'une des couronnes inductrices fixes en S, N, S₁..., et figurons au-dessus les bobines mobiles 1, 2, 3... entraînées dans le sens de la flèche *f* (fig. 933); la deuxième couronne inductrice fixe serait sur un plan antérieur et projeterait sur les pôles marqués S, N, S₁,

des pôles contraires que nous désignons par N', S', N'₁.

Les flux de force du champ magnétique inducteur sont des lignes de force qui parcourent transversalement l'espace compris entre les deux séries parallèles d'électroaimants fixes d'un pôle N' à un pôle S, de S' à N, de N'₁ à S₁, etc.; ces flux ayant des directions alternativement contraires. Lorsque l'induit tourne, les bobines mobiles coupent ces flux de force dans leur mouvement de rotation.

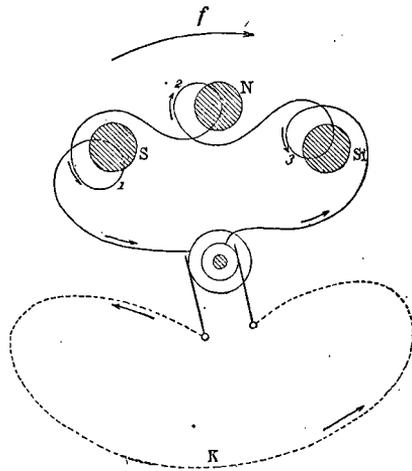


Fig. 933.

• **Fonctionnement.** — Au moment où les bobines impaires sont traversées par un flux positif, les bobines paires le sont par un flux négatif.

Supposons que la bobine 1 s'approche de S dans le sens de la flèche : cette bobine peut être considérée comme devenant un solénoïde ; ce solénoïde se déplace dans un champ magnétique dû au flux de force qui va de N' en S d'avant en arrière, et son aimantation, d'après la loi de Lenz (1007), a un signe tel que sa réaction sur les électroaimants inducteurs gêne le mouvement. Pour cela, en s'approchant du groupe N'S des deux électroaimants en regard, la bobine 1 prend un pôle nord en face de N' et un pôle sud en face de S, ce qui détermine sur elle une répulsion à la fois de N' et de S. Quand la bobine mobile se trouve rigoureusement en face de N' et S, le flux de force qui la traverse est maximum ; par suite, la force électromotrice du courant induit est nulle (1015, 11°), l'aimantation de la bobine mobile pendant un temps extrêmement court est nulle. Quand elle a dépassé le groupe N'S en s'éloignant, son aimantation change de signe comme le courant induit qui la parcourt ; car, d'après la loi de Lenz, elle doit être attirée par le groupe dont elle s'éloigne ; pour cela, elle doit présenter un pôle sud en face de N' et un pôle nord en face de S, ce qui détermine sur elle une attraction à la fois de N' et S.

En résumé, pour la bobine 1, le courant induit a un certain sens en s'approchant de S. Il change de sens en s'éloignant de S et conserve le même sens de S en N ; de N en S, il change de sens. Un courant alternatif correspondant à une période complète se produit entre deux pôles de même nom S et S₁. Il y a 8 périodes par tour si les couronnes fixes portent chacune 16 bobines.

En désignant par N le nombre des bobines d'une des séries d'électroaimants fixes, par n le nombre des tours par seconde, le nombre des périodes par seconde est $\frac{Nn}{2}$.

Les bobines mobiles n'ont pas de noyaux de fer doux. L'introduction de noyaux renforcerait le courant, mais il y aurait dépense d'énergie par l'échauffement dû aux courants induits⁽¹⁾ inutilisables qui prendraient naissance dans leur masse.

En même temps que la bobine 1 s'approche du groupe N'S, la bobine 2 s'approche du groupe suivant S' N ; le flux de force qui traverse la bobine 2 va aussi en croissant, mais il est dirigé d'arrière en avant de N vers S' au lieu d'être dirigé d'avant en arrière ; par induction, la bobine 2 présente un pôle sud en face de S' et un pôle nord en face

(1) Courants de Foucault (1009).

de N. Les courants de 1 et 2 sont donc au même instant de sens contraires; toutefois, ils s'ajoutent en raison du sens inverse de l'enroulement du fil sur ces deux bobines. La bobine 3 se comporte à un même instant comme la bobine 1, la bobine 4 comme la bobine 2. Les courants développés au même instant dans toutes les bobines s'ajoutent donc pour donner un courant total égal à leur somme, en raison du sens inverse de l'enroulement sur les bobines de parité différente.

Calcul de la force électromotrice moyenne d'induction. — Désignons par $H\sigma$ le flux qui traverse la surface σ des spires de la bobine 1 quand elle se projette sur S; le flux peut être représenté par $-H\sigma$ quand cette bobine est venue sur N, la variation totale est $2H\sigma$.

Si θ est la durée du déplacement de S en N, $\frac{1}{10^8} \cdot \frac{2H\sigma}{\theta}$ est en volts la force électromotrice moyenne d'induction.

(1032. **Machine de Clarke** (fig. 934). — **Description.** — Dans la machine de Clarke, le système inducteur est un aimant vertical Λ formé de plusieurs aimants en fer à cheval superposés.

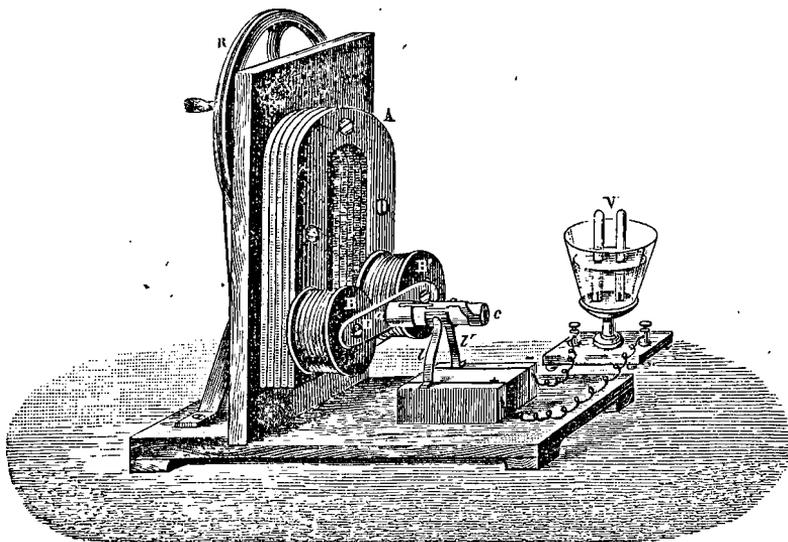


Fig. 934.

Le système induit comprend seulement deux bobines parallèles B et B' à noyau de fer doux, tournant autour d'un même axe qui est perpendiculaire au plan de l'aimant fixe et passe au milieu de la ligne de ses pôles. Les deux noyaux de fer doux sont reliés extérieurement par une traverse en fer.

Le sens de l'enroulement est inverse sur les deux bobines qui forment ainsi un électroaimant unique (995).

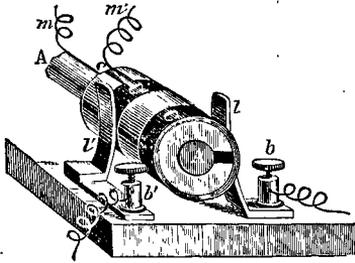


Fig. 935.

Les deux extrémités du fil induit s'engagent dans un cylindre isolant ajusté sur l'axe de rotation et tournant avec lui; l'extrémité m aboutit à l'axe A et communique métalliquement avec une bague C qui entoure une partie du cylindre isolant, et contre laquelle presse un ressort l (fig. 935). L'autre extrémité m' du fil induit communique avec une deuxième bague C' entourant une autre partie du cylindre isolant, et contre laquelle presse également un ressort l' . Les fils du circuit extérieur aboutissent aux bornes b et b' des ressorts.

Fonctionnement. — Représentons par N et S les deux pôles de l'aimant fixe, désignons par 1 et 2 les bobines mobiles, situées dans un plan *antérieur*, et, pour la commodité de la figure, supposons que les deux bagues métalliques auxquelles aboutissent les extrémités

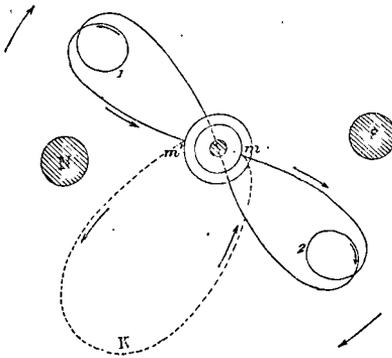


Fig. 936.

m et m' du fil induit et les extrémités du circuit inducteur, ont des diamètres différents. Pendant une demi-révolution, soit au-dessus, soit au-dessous de la ligne horizontale NS des pôles de l'aimant fixe, le sens du courant est invariable dans chaque bobine.

En effet, si la bobine 1 s'éloigne du pôle nord de l'aimant, l'aimantation de son noyau diminue; à cette diminution d'un flux qui va d'arrière en avant (du pôle sud au pôle nord à l'intérieur du noyau), correspond un flux induit de même sens dont le courant parcourt la bobine de telle façon

qu'elle offre un pôle nord en avant; ce courant circule en sens inverse (975) des aiguilles d'une montre ⁽¹⁾ (fig. 936).

Lorsque la bobine s'approche du pôle sud, l'aimantation de son noyau augmente, mais cette aimantation est inverse de la précédente; à cet accroissement d'un flux qui va d'avant en arrière correspond un flux induit de sens

(1) A un moment donné, le courant qui serait produit dans une bobine, *sans noyau*, par son déplacement dans le champ magnétique de l'aimant fixe, a le même sens que le courant induit dû à la variation de l'aimantation du noyau.

Prenons, par exemple, la bobine 1 s'éloignant du pôle nord de l'aimant fixe; on peut la considérer comme devenant un solénoïde dont le courant retarde le déplacement: elle présentera pour cela un pôle sud au pôle nord de l'aimant fixe; en avant nous verrons un pôle nord, c'est-à-dire un courant circulant en sens inverse du mouvement des aiguilles d'une montre.

contraire ou d'arrière en avant, et un courant qui est encore inverse des aiguilles d'une montre.

Le courant s'annule dans une bobine au moment où elle passe devant un pôle, car c'est alors qu'elle est traversée par un flux de force maximum, l'aimantation du noyau étant maximum.

Le courant change de sens en franchissant la ligne des pôles, il est maximum dans les positions perpendiculaires à cette ligne.

A chaque instant, les courants induits sont de sens contraires dans les deux bobines, mais leur enroulement étant inverse les courants s'ajoutent dans le circuit extérieur. Le sens du courant change à chaque demi-révolution des bobines.

Redressement des courants. — On obtient des courants de même sens dans le circuit extérieur en redressant les courants alternatifs par un commutateur. Le cylindre isolant est recouvert par deux demi-bagues que séparent de petits intervalles, et sur lesquelles frottent deux ressorts l et l' (fig. 937). C'est au moment où les bobines franchissent la ligne des pôles de l'aimant inducteur que la communication des bagues avec les ressorts l et l' est intervertie, ce qui fait que les courants conservent le même sens dans la partie extérieure du circuit comprise entre b et b' .

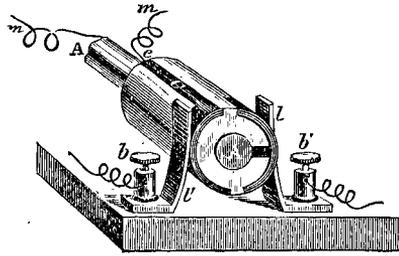


Fig. 937.

Il n'y a plus alors de variable que l'intensité du courant. Dans la figure 934, les courants sont redressés et circulent dans un voltamètre V où ils décomposent l'eau en séparant les éléments : l'hydrogène se dégage dans l'éprouvette qui couvre l'électrode négative.)

EFFETS LUMINEUX DES COURANTS

Les effets lumineux des décharges électriques (833) et ceux de la bobine d'induction (1019) ayant été étudiés antérieurement, nous insisterons ici d'abord sur les effets lumineux des courants continus.

1033. Étincelle de fermeture. — Même avec des piles capables de produire dans un circuit fermé des courants très intenses, la différence de potentiel aux deux pôles d'une pile ouverte (892) est trop faible pour qu'une étincelle éclate quand on rapproche les pôles. Il faut un très grand nombre d'éléments associés en série pour obtenir

à la fermeture une étincelle à travers une mince couche d'air. Avec 1000 éléments Daniell, l'étincelle *de fermeture* est encore à peine visible.

Étincelle de rupture. — Si l'on a mis en contact les deux pôles d'une pile, on obtient une étincelle à *la rupture*, même avec un petit nombre d'éléments. Au moment où les conducteurs vont être séparés, les particules en contact forment un conducteur très résistant qui s'échauffe fortement. L'intervalle compris entre les extrémités qui s'écartent est rempli d'air échauffé et de particules conductrices incandescentes transportées par le courant qui prolongent les conducteurs. Une étincelle éclate, *notablement renforcée* par le courant de self-induction de rupture (1005).

Si le courant est assez fort, l'étincelle persiste et produit une lumière continue, pourvu que les extrémités des conducteurs soient maintenues à une distance suffisamment petite.

1034. Arc voltaïque. — La lumière de l'étincelle de rupture est particulièrement brillante avec des *conducteurs en charbon*. On met en contact deux tiges de charbon, encastrées dans des montures métalliques et communiquant avec les pôles d'une forte pile (de 45 volts au moins); les pointes rougissent, et si le courant est assez intense, on peut les écarter un peu sans que le courant cesse de passer. Les extrémités voisines des charbons brillent d'une belle lumière blanche due à leur incandescence, et entre elles jaillit une lumière violacée ayant la forme d'un arc (fig. 938), ce qui a fait donner à l'ensemble du phénomène lumineux le nom d'*arc voltaïque*. La flamme de l'arc constitue un conducteur incandescent formé par les gaz de la combustion et les particules de charbon transportées d'un pôle à l'autre.

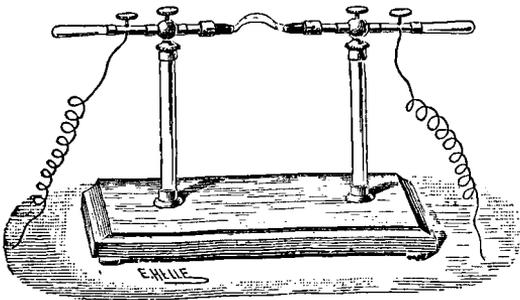


Fig. 938.

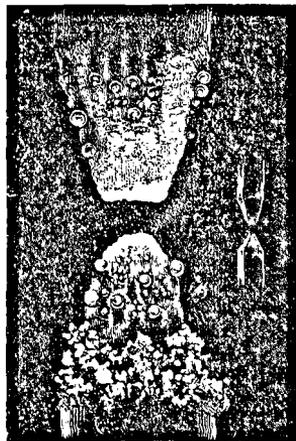


Fig. 939.

En projetant sur un écran avec une lentille l'image de l'arc et des charbons, on voit que l'arc a beaucoup moins d'éclat que les pointes de charbon. En outre, *le charbon positif est plus chaud et plus lumineux* que le négatif, il rougit sur une plus grande longueur.

Dans l'air, les charbons brûlent et s'usent. Si les deux charbons ont le même diamètre, le charbon positif *s'use deux fois plus vite* que le négatif et il *se creuse* en cratère tandis que le négatif se taille en pointe et bourgeonne (fig. 939).

Avec de très forts courants, les pointes de charbon peuvent être écartées de plusieurs centimètres sans que l'arc s'éteigne. Par l'usure l'écart des charbons augmente et, par suite, la résistance de l'arc. A un certain moment, le courant ne passe plus, l'arc s'éteint, et il faut pour le rétablir rapprocher les charbons jusqu'au contact, puis les écarter de nouveau lentement.

Dans le vide, l'usure est moins rapide, mais elle a encore lieu par un *transport de matière* du charbon positif au charbon négatif.

La température de l'arc voltaïque est très élevée. Elle atteint et dépasse 3500°.

La température très élevée de l'arc voltaïque est utilisée dans les fours électriques (fig. 940).

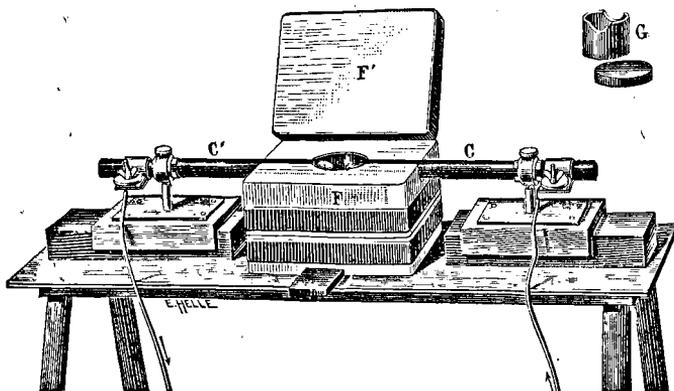


Fig. 940.

La matière soumise à la chaleur de l'arc est placée dans un godet de charbon G sur les bords duquel reposent deux baguettes de charbon horizontales C et C', qui servent d'électrodes, et entre lesquelles l'arc jaillit. Le godet de charbon et les électrodes sont enfermés dans un bloc de chaux ou de pierre calcaire F.

Entre les électrodes tous les métaux se volatilisent, les oxydes sont réduits.

L'intensité des courants a été portée au delà de 1000 ampères, avec une chute de potentiel de 100 volts entre les électrodes, ce qui correspond à une

énergie de 100000 joules par seconde, ou à une puissance de 100000 watts (plus de 130 chevaux-vapeur.)

La lumière émise par l'arc est *très riche en rayons très réfrangibles*; elle paraît bleue par rapport à la lumière du soleil. Au spectroscope, les charbons présentent un spectre continu comme les solides incandescents (710). L'arc donne les raies brillantes des vapeurs qu'il renferme.

ÉCLAIRAGE ÉLECTRIQUE

L'énergie électrique est utilisée pour l'éclairage sous deux formes :

1° L'*arc voltaïque* qui jaillit lorsqu'on écarte l'un de l'autre deux charbons placés dans le circuit d'un fort courant.

2° L'incandescence *sans combustion* d'un filament conducteur et réfractaire plongé dans le vide.

1035. Éclairage par l'arc voltaïque. — Dans l'éclairage par l'arc voltaïque *on met en haut le charbon positif* afin que sa concavité lumineuse envoie ses rayons vers le sol sans être gênée par l'ombre du charbon négatif⁽¹⁾. Les crayons de charbon actuellement employés pour la production de l'arc voltaïque sont formés de charbons pulvérisés et agglomérés. En raison de l'usure des charbons, il faut leur conserver une distance invariable. On a recours pour cela à des *régulateurs*; ce sont des mécanismes qui rapprochent automatiquement les charbons d'une quantité égale à l'usure, et qui maintiennent à peu près constante la longueur de l'arc voltaïque.

Quand on faisait usage de la pile pour produire l'arc voltaïque, on employait des éléments Bunsen que l'on groupait en *série* au nombre de 50 à 100. Actuellement, en raison du prix de revient trop élevé de l'énergie fournie par les piles, on emploie presque exclusivement les machines d'induction à courants continus ou à courants alternatifs.

Avec les courants alternatifs les deux charbons s'usent également et conservent tous les deux une forme conique.

Travail dépensé dans l'arc. — Désignons par e la différence de potentiel aux bornes de la lampe, par i l'intensité du courant qui la traverse, le travail dépensé dans l'arc par le courant est ei .

Soit $e = 50$ volts $i = 15$ ampères.

$ei = 750$ watts, un peu plus d'un cheval-vapeur.

(1) Pour les expériences, de fusion et de volatilisation, le charbon positif est mis en bas et on donne à son extrémité libre la forme d'un creuset.

Bougies électriques (fig. 941). — L'emploi des bougies électriques permet de maintenir l'arc voltaïque sans mécanisme.

Une bougie électrique se compose de deux crayons de charbon de 25 centimètres de longueur et 4 millimètres de diamètre, *parallèles*, séparées par une matière isolante (mélange de sulfate de chaux et de sulfate de baryte). Le courant arrive par la borne B, suit le charbon *c'*, enflamme une amorce de pâte de charbon réunissant les pointes de charbon et redescend par *c* et A. L'arc ne jaillit qu'aux extrémités, le mastic isolant disparaît par la chaleur en même temps que les charbons, et se maintient un peu au-dessous des pointes.

On emploie ici des courants alternatifs avec lesquels les charbons s'usent également vite. Le point lumineux s'abaisse graduellement.

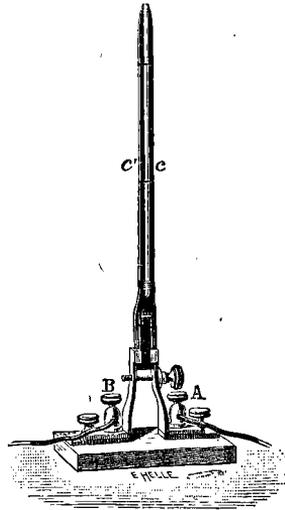


Fig. 941.

Travail dépensé dans une bougie électrique.

Soit $e = 42^v$ $i = 8,5$; on a dans ce cas $ei = 357$ watts.

1036. Éclairage par incandescence. — Par le passage d'un courant électrique on porte un fil conducteur fin à une température assez élevée pour qu'il devienne lumineux.

Lampes à incandescence (fig. 942). — On emploie dans les lampes à incandescence un filament de charbon très mince; à l'air il brûlerait en quelques instants; on le place dans le vide pour éviter sa combustion. Le filament est enfermé dans une ampoule de verre complètement scellée où l'on a fait le vide avec une pompe à mercure. Le courant arrive par deux fils de platine qui traversent les parois de l'ampoule et sont fixés aux deux extrémités du filament de charbon.

Rouge pour de faibles courants, la lumière passe graduellement au blanc pour des intensités crois-

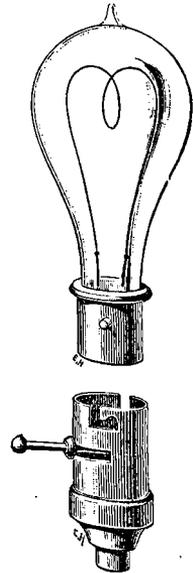


Fig. 942.

santes. Les lampes à incandescence ne dégagent que peu de chaleur et ne contribuent pas à vicier l'atmosphère.

Les filaments se rompent après un certain temps d'usage ; une lampe bien construite a une durée moyenne de 1000 heures.

(**Travail dépensé dans une lampe.** — Soit une lampe de 16 bougies présentant en marche une différence de potentiel de 110 volts aux bornes et traversée par un courant de 0^{amp}55. Le travail absorbé par cette lampe en une seconde sera $110 \cdot 0,55 = 60,5$ joules⁽¹⁾.)

D'après la relation $e = ri$, la résistance de cette lampe sera $r = \frac{e}{i}$
ou $\frac{110}{0,55} = 200$ ohms.

Dans une lampe à incandescence, toute l'énergie dépensée apparaît sous forme de chaleur dégagée suivant la loi de Joule.

Association des lampes en dérivation. — Si les lampes étaient placées en série, la rupture d'un filament arrêterait le courant et éteindrait toutes les lampes ; pour cette raison, on les dispose ordinairement en dérivation (fig. 943) entre deux conducteurs AB et CD.

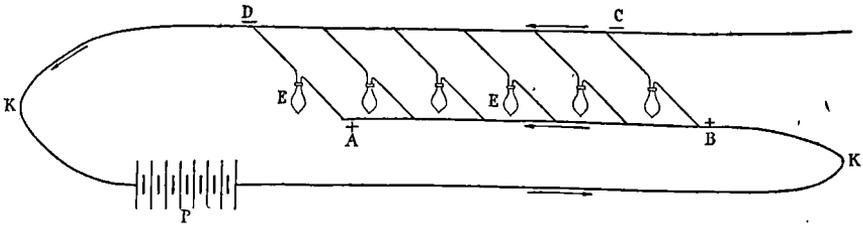


Fig. 943.

Supposons n lampes de résistance r , chacune est traversée par un courant d'intensité i . La résistance de l'ensemble des lampes sera $\frac{r}{n}$ et le courant qui traverse cette résistance sera ni .

Appelons E la force électromotrice de la source et R la résistance du reste du circuit :

$$ni = \frac{E}{R + \frac{r}{n}} = \frac{nE}{nR + r}; \quad i = \frac{E}{nR + r}$$

Le travail utilisé est nri^2 .

Applications. — 1° Une lampe à arc reçoit 12 ampères et ses charbons offrent une différence de potentiel de 45 volts. Quelle énergie consomme-t-elle ?

(1) Comme un joule équivaut à 0[°]24, $60,5 \cdot 0,24 = 14,52$; cette lampe à incandescence dégagera 14[°]52 par seconde (près de 17 fois moins de chaleur qu'un bec de gaz de même éclat).

2° Une lampe à incandescence traversée par un courant de 0,7 ampère présente à ses extrémités une différence de potentiel de 98 volts ; quelle est sa résistance R ?

3° Une lampe à incandescence traversée par un courant de 0,75 ampère présente à ses extrémités une différence de potentiel de 60 volts. Quelle est la chaleur dégagée en une heure dans la lampe ?

4° Combien faut-il d'accumulateurs disposés en série, de 2 volts de force électromotrice et de 0,01 ohm de résistance, pour faire fonctionner 20 lampes parallèles de 50 volts et de 0,7 ampère ?

5° La force électromotrice d'une machine dynamoélectrique est 142,5 volts et sa résistance intérieure 2 ohms. Combien peut-elle alimenter de lampes à incandescence disposées parallèlement, ayant chacune 40 ohms de résistance et devant être traversée par $\frac{3}{4}$ d'ampère ?

6° Quelle sera la puissance minimum de la machine motrice qui fera tourner la dynamo ?

7° Une pile de 20 accumulateurs, de chacun 2 volts de force électromotrice, offre une résistance intérieure de 0,2 ohm. Elle alimente 60 lampes parallèles dont la résistance totale est 0,3 ohm : le fil conducteur extérieur ayant une résistance 0,04 ohm, quelle est la dépense de travail sur chaque lampe par seconde en kilogrammètres ?

8° Une machine dynamoélectrique comprend dans son circuit 3 lampes à arc ayant chacune une résistance de 1,8 ohms et des fils conducteurs d'une résistance de 1,2 ohms. La résistance intérieure de la machine est 0,6 ohm. Quelle est la fraction de l'énergie électrique produite qui est utilisée dans les lampes ?

1037. Usage des transformateurs dans l'éclairage électrique. — Dans beaucoup de cas, pour l'éclairage des villes, par exemple, on utilise des forces motrices naturelles éloignées du lieu où leur énergie doit être employée.

Désignons par A la station où se trouve la force motrice, par B la station où son énergie doit être transportée.

En A la force motrice met en mouvement une machine à courants alternatifs qui engendre l'électricité à un potentiel très élevé. Par raison d'économie, le transport du courant à grande distance, jusqu'en B, se fait à l'aide d'un câble de *faible section* ; de cette façon, l'intensité du courant qui parvient en B est très réduite.

D'autre part, afin que le maniement des conducteurs n'offre pas de danger, l'utilisation du courant pour l'éclairage exige qu'à la station de consommation, en B, la force électromotrice ne dépasse pas notablement 100 volts. A cet effet, on a recours à des transformateurs⁽¹⁾ qui modifient les deux facteurs de l'énergie EI du courant : *force électromotrice et intensité*, en abaissant la force électromotrice et en élevant l'intensité.

Pour cela, à la station B, on fait passer dans le fil fin d'un transformateur le courant alternatif à potentiel élevé, mais de faible intensité, qui vient de la machine en fonctionnement à la station A. Comme les

(1) Un transformateur est une bobine d'induction ou une bobine à deux fils inégaux enroulés sur un noyau en fil de fer (1020).

différences de potentiel aux bornes des deux fils du transformateur sont proportionnelles aux nombres de spires, l'induction fait naître dans le gros fil des courants alternatifs de potentiel moindre, mais d'intensité plus forte, qui sont utilisés pour l'éclairage.

Le rendement est le rapport entre l'énergie électrique $E'I'$ restituée par l'induit du transformateur et l'énergie EI absorbée par l'inducteur. Ce rendement peut dépasser 0,90.

EFFETS PHYSIOLOGIQUES DES COURANTS

Les actions physiologiques des courants électriques sont très complexes ; aussi, sans rechercher une précision qui exigerait de longs développements, nous nous bornerons à citer quelques-uns des phénomènes les plus apparents.

ACTION DES COURANTS CONTINUS

1038. Commotion au contact des deux pôles d'une pile. — Tenant à la main un des pôles d'une pile, on éprouve une secousse si l'on vient à fermer le circuit en touchant l'autre pôle avec l'autre main, surtout si les mains ont été mouillées d'eau salée pour diminuer la résistance de l'épiderme⁽¹⁾. Tant que le circuit reste fermé, le courant passe d'une manière continue dans le corps qui est bon conducteur, et on n'éprouve alors aucune sensation particulière. Mais une commotion se fait encore sentir quand on vient à ouvrir le circuit.

Ces commotions de fermeture et d'ouverture croissent avec le nombre des éléments : une faible pile ne donne qu'un frémissement dans les articulations des doigts, la commotion est douloureuse avec une pile d'une centaine d'éléments Bunsen, avec plusieurs centaines d'éléments elle peut devenir dangereuse. La commotion se produit sans que les éléments aient besoin de présenter une grande surface, on la ressent aisément avec une pile à colonnes de 50 éléments.

(1) La résistance opposée par le corps comprend : 1° la résistance des tissus ; 2° la résistance de l'épiderme qui est *extrêmement grande* si la peau est sèche.

Effets sur les nerfs sensibles et sur les nerfs moteurs. — Si les deux pôles d'une pile sont mis en communication avec deux points du corps de façon à affecter les *nerfs de la sensibilité générale*, une sensation de douleur est transmise au cerveau au moment de la fermeture ou de l'ouverture du circuit.

Quant un *nerf moteur* commence à être traversé par un courant, le muscle correspondant se contracte. La contraction se renouvelle au moment où l'on interrompt le circuit.

Les variations *brusques* du courant ont seules un effet. Il n'y a pas d'action tant que le courant reste constant ou varie lentement.

Effets sur les nerfs de sensibilité spéciale. — Les sensations déterminées sur les nerfs de sensibilité spéciale, tels que les nerfs optiques, acoustiques, diffèrent des sensations déterminées sur les nerfs de sensibilité générale.

Ainsi, lorsque l'œil est intercalé dans le circuit d'une pile, l'ouverture et la fermeture du circuit, même avec des courants extrêmement faibles (quelques milliampères) s'accompagnent d'une lumière vive qui semble passer comme un éclair devant la rétine (*phosphène*).

1039. Phénomènes qui accompagnent le passage d'un courant continu. — Le passage d'un courant continu dans la profondeur des tissus produit des modifications sur la circulation, les sécrétions, la température, et une action sur la nutrition générale.

Au contact des tampons mouillés⁽¹⁾ qu'on applique sur la peau pour établir la communication avec la pile, les liquides qui imprègnent la peau sont décomposés par le courant s'il a une certaine intensité : des bases se déposent à la surface négative, des acides à la surface positive ; ces dépôts caustiques rougissent la peau, à une sensation de picotement succèdent une *brûlure* et une vive douleur, surtout lorsque les tampons sont remplacés par des plaques métalliques⁽²⁾.

Les accidents mortels produits par les courants continus de très haute intensité sont probablement dus aux décompositions chimiques qui ont lieu dans la masse des tissus.

(1) Plaques de charbon ou de métal recouvertes de peau de chamois imbibée d'eau.

(2) Il peut y avoir production d'escarres : à l'électrode négative, où se déposent les alcalis, les escarres sont molles et humides ; à l'électrode positive, où se déposent les acides, les escarres sont dures et sèches.

1040. Expérience de Galvani. — Les phénomènes de commotion s'observent encore après la mort d'un animal, tant que dure l'irritabilité. Ils persistent assez longtemps chez les animaux à sang froid.

L'expérience se fait aisément avec une grenouille. On coupe en

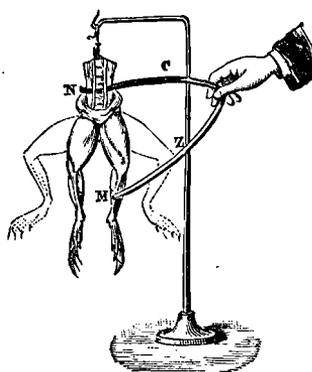


Fig. 944.

deux, vers la région lombaire, la colonne vertébrale d'une grenouille, on dépouille rapidement la partie inférieure : entre les *deux nerfs lombaires* qui apparaissent comme des fils blancs sur les côtés de la colonne vertébrale, on engage un fil de cuivre C qui les touche et s'attache à un fil de zinc recourbé Z, assez long pour être mis en contact avec les muscles de l'une des jambes (fig. 944). A chaque contact, les jambes se replient et s'agitent. Ces effets se reproduisent à chaque nouveau contact pendant 20 à 30 minutes.

Les deux métaux de l'arc métallique forment en effet avec le corps de la grenouille un élément de pile et un circuit fermé.

Cette mémorable expérience, due à Galvani, sert de point de départ aux recherches qui conduisirent Volta à la découverte de la pile.

ACTION DES COURANTS INDUITS

1041. Nous avons vu que les nerfs et les muscles soumis à l'action d'un courant qui commence ou qui finit réagissent par une sensation ou une commotion. L'emploi des courants induits qui ont pour caractère de se succéder à des intervalles de temps très rapprochés donne lieu à une excitation continue.

Le degré d'excitation d'un nerf dépend de la *force électromotrice maximum* du courant employé.

Deux courants induits qui dévient d'un même angle l'aiguille aimantée d'un galvanomètre parce qu'ils correspondent à la circulation d'une même quantité d'électricité, peuvent agir inégalement sur les nerfs.

C'est ainsi que l'excitation due au courant *induit de rupture* l'em-

porte notablement sur celle que détermine le courant induit de fermeture, qui est moins rapide et n'atteint pas un potentiel aussi élevé.

L'électrisation par les courants induits répétés se nomme souvent *faradisation* : elle se fait en mettant en communication deux points du corps avec les extrémités du fil induit d'une bobine d'induction ou d'une machine à courants alternatifs analogue à la machine de Clarke.

Des machines à courants alternatifs de 1000 volts, de grosses bobines d'induction fonctionnant avec quelques accumulateurs ou quelques grands couples de Bunsen, donneraient des commotions foudroyantes. Avec de très petites bobines d'induction dont les étincelles ne dépassent pas quelques millimètres, les commotions n'offrent aucun danger.

Faradisation sèche. — On applique au voisinage de la région qu'on veut exciter un large tampon humide communiquant avec l'un des pôles d'une bobine d'induction, et on promène légèrement sur l'épiderme *sec* un pinceau de fils de métal ou balai métallique communiquant avec l'autre pôle de la bobine. Il se produit une *excitation douloureuse* des nerfs superficiels de la peau qui sont des nerfs sensibles. Il n'y a pas d'action sur les nerfs moteurs qui sont plus profondément situés.

Faradisation humide. — Si l'on emploie comme électrodes deux tampons humides, l'épiderme est rendu conducteur, et la douleur se trouve très atténuée. On produit l'excitation d'un muscle en appliquant une large électrode humide au voisinage du muscle qu'on veut faire contracter, et une électrode plus petite au point où le nerf pénètre dans le muscle.

Choix du fil induit. — On emploie une bobine à gros fil induit quand il n'y a pas de grandes résistances à vaincre, par exemple pour exciter les nerfs moteurs et les muscles avec des électrodes humides. Une bobine à fil fin convient pour vaincre les grandes résistances, par exemple pour exciter la sensibilité cutanée sur l'épiderme.



ÉLECTRICITÉ RAYONNANTE

1042. Décharge oscillante d'un condensateur. — La décharge rapide d'un condensateur (826) peut être continue ou oscillante. Cela dépend d'une part de la *capacité* des armatures du *condensateur*; d'autre part de la *résistance* et de la *self-induction* du circuit que parcourt la décharge.

1° Si le circuit de décharge offre une résistance suffisante, la décharge est *continue*. D'abord nul, le courant de décharge croît jusqu'à un maximum, puis décroît et devient nul. L'étincelle est grêle; dans un miroir tournant, elle est vue *unique* et *allongée* dans le sens de la rotation du miroir.

2° Lorsque les conducteurs employés pour la décharge sont de grosses tiges métalliques, droites et de petite résistance, l'étincelle apparaît au miroir tournant *comme formée d'étincelles distinctes, très rapprochées, de très courte durée et de plus en plus faibles*. La décharge est alors *oscillante* et consiste en courants qui ont lieu *alternativement dans un sens et dans l'autre*. Celle des armatures qui était primitivement positive devient négative, puis redevient positive et ainsi de suite. Les inversions se succèdent à des intervalles *extrêmement courts* : c'est en raison de la persistance des impressions sur la rétine (735) que la succession des étincelles de décharge donne à la vue simple l'impression d'une étincelle unique.

Cette décharge oscillante est due à des effets de self-induction dans le circuit de décharge. On peut s'en rendre compte approximativement: Une première étincelle ayant permis le passage d'un courant allant de l'armature positive à l'armature négative dans le circuit extérieur de décharge, ce courant détermine dans les conducteurs de décharge un courant de self-induction, dont le sens définitif est *inverse* et qui produit une deuxième étincelle; ce courant de self-induction fait naître à son tour un courant de self-induction, qui donne lieu à une troisième étincelle, etc. La rapidité des alternances est d'autant plus grande que la capacité du condensateur et la self-induction du circuit de décharge sont plus faibles.

Voici une image hydraulique du phénomène des oscillations électriques. Soient deux tubes réunis à leur partie inférieure par un tube de caoutchouc, sur

lequel presse une pince qui intercepte la communication entre les deux tubes. L'un des tubes renfermant d'abord seul du liquide, si l'on desserre *brusquement* la pince, le liquide passe du tube plein dans le tube vide et les niveaux s'égalisent, mais cette égalisation n'a lieu qu'après quelques *oscillations* des colonnes liquides. Les oscillations liquides n'ont plus lieu si l'on établit la communication entre les deux tubes en desserrant très lentement la pince.

1043. Production de courants de haute fréquence. — Les courants alternatifs d'une machine de Clarke, d'une machine de Siemens, d'une bobine d'induction sont des courants de petite ou basse fréquence (1030).

En multipliant le nombre des bobines dans le disque induit d'une machine de Siemens, et en accroissant la vitesse de rotation du disque (1), on augmente notablement la fréquence, sans qu'on soit toutefois parvenu à dépasser le nombre 20 mille.

Si, au lieu de faire passer dans le fil inducteur d'une bobine d'induction un courant continu interrompu par un trembleur ou un vibreur, on y fait passer le courant d'une machine alternative à grande vitesse, capable de donner plusieurs milliers de renversements par seconde, on accroit considérablement la différence de potentiel aux deux bornes du fil induit; cela résulte de ce que la force électromotrice induite est proportionnelle à la vitesse de variation du flux de force (1014).

En utilisant la décharge oscillante et à alternances très rapides d'un condensateur (1042), on peut encore exagérer la fréquence et la différence de potentiel aux extrémités du fil induit.

Voici une disposition qui donne d'une façon continue une *très grande* fréquence et une très haute différence de potentiel (fig. 945).

Dans le fil inducteur I d'une bobine d'induction, on fait passer soit un courant continu interrompu par un vibreur, soit un courant alternatif. Les deux extrémités *m* et *l* du fil induit *i* sont reliées aux armatures d'un condensateur C qui se décharge entre les deux boules *a* et *b* d'un excitateur.

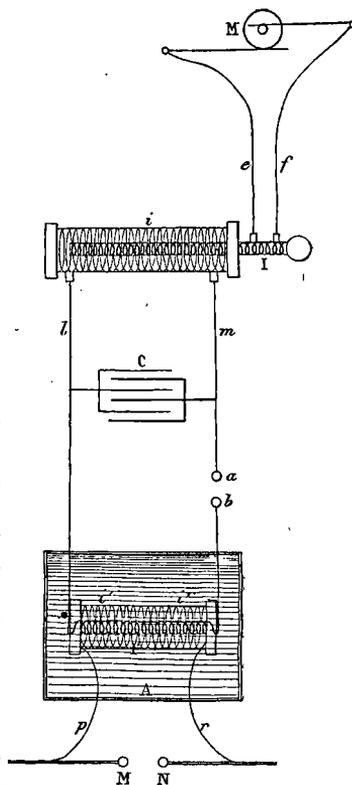


Fig. 945.

(1) La fréquence est $\frac{1}{2} Nn$, *N* nombre de pôles, *n* nombre de tours à la seconde (1031).

Cette décharge traverse un transformateur formé d'un fil inducteur I' qui agit sur un fil induit i' .

Le fil inducteur I' ne présente que quelques spires d'un gros fil de cuivre; le fil induit i' est un fil très long et très fin, dont les deux extrémités p et r aboutissent à deux conducteurs métalliques M et N .

Chaque fois que le condensateur se décharge, les courants à alternances très rapides de la décharge ab déterminent dans le fil i' des courants induits de même fréquence et d'une force électromotrice très élevée.

Dans ce cas, les différences de potentiel qui s'établissent entre les diverses spires du fil induit peuvent devenir assez fortes pour que des étincelles éclatent dans l'air entre les spires; on les évite en plongeant la bobine dans une cuve remplie d'huile de lin.

1044. Propriétés des courants de haute fréquence. — En écartant les boules M et N , on obtient de longues étincelles. Si l'on applique sur les deux boules deux conducteurs métalliques tenus à la main, le corps de l'opérateur ferme le circuit, et aucune secousse n'est ressentie (1048)⁽¹⁾.

En remplaçant les deux boules par deux disques verticaux qu'on éloigne, un tube à gaz raréfié placé entre les deux disques s'illumine.

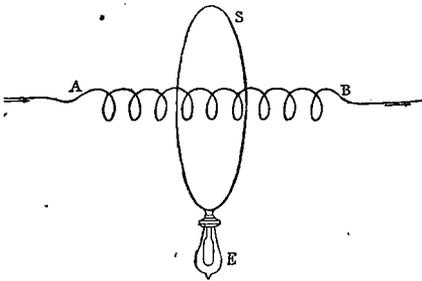


Fig. 946.

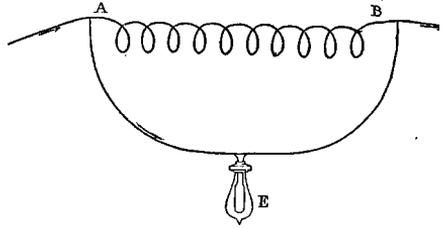


Fig. 947.

Ces courants, à cause de la rapidité de la variation de leur flux de force, produisent des effets d'induction très puissants: si l'on fait passer un courant de haute fréquence à travers une spirale AB , que l'on entoure d'une seule spire formée d'un gros fil de cuivre et d'une lampe à incandescence E , cette lampe s'allume (fig. 946).

Les effets de self-induction deviennent assez importants pour qu'un courant de haute fréquence traverse très difficilement une spirale (1005) ou même un gros fil, et préfère une dérivation sans self-induction renfermant une lampe E , bien que la résistance qui serait offerte par cette lampe à un courant continu soit beaucoup plus forte (fig. 947).

1045. Vibrations électriques. — Les alternances accompagnent la plupart des décharges de condensateurs. En faisant usage d'un condensa-

(1) Les conducteurs métalliques tenus à la main préservent la main de la brûlure que produiraient les étincelles si on tenait directement les boules.

teur spécial, Hertz est parvenu à obtenir des oscillations de période extrêmement courte. Dans l'appareil de Hertz (fig. 948), chacune des armatures du condensateur a une faible capacité et une faible self-induction. C'est une sphère *S* munie d'une tige terminée par un bouton *b*. Chacune des sphères est reliée à l'une des extrémités du fil induit d'une bobine d'induction *R*. Toutes les fois qu'un courant induit est produit dans la bobine, les deux armatures sont portées à des potentiels contraires, et une étincelle jaillit entre les deux boutons ; c'est à travers cette étincelle que se fait la décharge oscil-

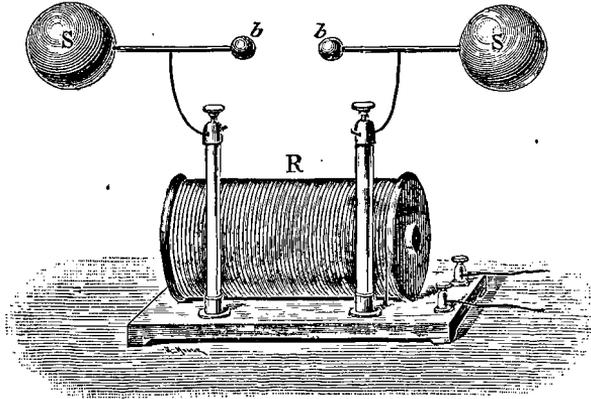


Fig. 948.

lante. Les oscillations ou vibrations d'une de ces décharges ont une fréquence notablement inférieure aux vibrations lumineuses : elle peut toutefois dépasser 50 billions par seconde (cette fréquence est très supérieure à la fréquence de la décharge d'une bouteille de Leyde ordinaire). En raison de leur fréquence (1015, 12°), ces vibrations électriques exercent à distance de puissantes actions inductrices, et deux corps métalliques quelconques placés dans le voisinage présentent des étincelles quand on les rapproche.

Hertz a reconnu que ce mouvement *vibratoire* électrique produit dans le milieu ambiant des ondes électriques qui offrent les mêmes propriétés de propagation, de réflexion, de réfraction, d'interférences et de polarisation que les ondes lumineuses. La propagation de ce mouvement vibratoire se fait par le milieu qui transmet la lumière, c'est-à-dire à travers l'*éther* (720). La vitesse de propagation dans l'air est la même que la vitesse de propagation dans un fil, et elle est la même que la vitesse de la lumière dans le vide (3.10^{10} centimètres par seconde).

Les vibrations électriques traversent les corps isolants, transparents ou non ; elles sont arrêtées par les métaux. Sur une feuille métallique plane, polie ou non, elles se réfléchissent. Une enveloppe métallique, *même extrêmement mince*, joue par rapport à ces vibrations le rôle d'écran parfait, *si elle est hermétiquement close*, de façon à ne pas présenter de fente. De très petits trous sont sans effet, et une cage en toile métallique à mailles très serrées exerce la même action préservatrice qu'une enveloppe rigoureusement continue.

Par l'emploi des radioconducteurs (1046), la transmission des vibrations électriques à travers l'air a été observée jusqu'à une distance de 50 kilomètres (1047).

1046. Radioconducteurs. — Nous avons vu qu'on distingue en électricité des corps *conducteurs* et des corps *isolants*; un conducteur laisse passer l'électricité, un isolant l'arrête. M. Branly a fait connaître en 1890 une troisième classe de corps qui sont à *volonté* conducteurs ou isolants.

Voici dans quelles circonstances cette conductibilité spéciale apparaît. On introduit de la limaille métallique, sans pression notable, dans un tube de verre V, entre deux tiges métalliques *a* et *b* (fig. 949 et 950), et on l'intercale dans le circuit d'un élément de pile avec un galvanomètre. Le courant de l'élément est arrêté par la limaille si elle est suffisamment fine, et le galvanomètre reste au zéro. Si l'on fait alors fonctionner dans le voi-



Fig. 949.

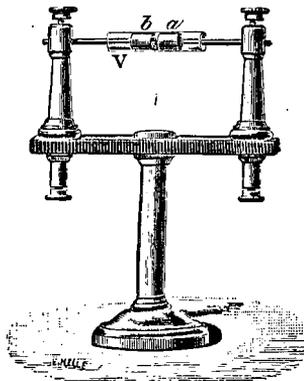


Fig. 950.

sinage, ou même à 50 et 100 mètres, une machine de Wimshurst munie de son condensateur, ou mieux un oscillateur de Hertz (1045), dès qu'une étincelle éclate, la déviation du galvanomètre indique que la limaille est devenue brus-

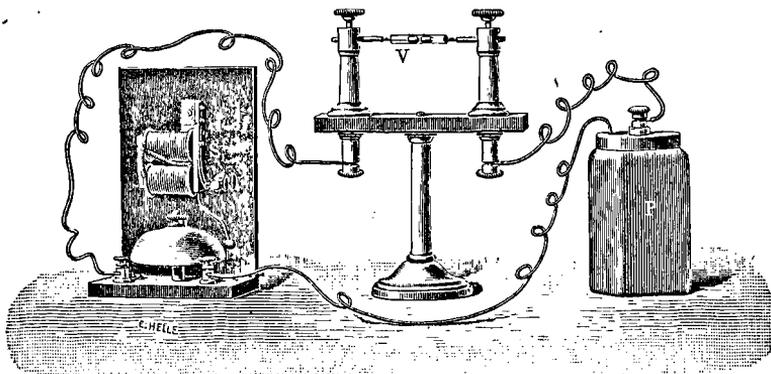


Fig. 951.

quement conductrice (par le passage de courants induits qui traversent son circuit), et que sa conductibilité *persiste* après que les étincelles ont cessé. Pour la démonstration devant un auditoire, le galvanomètre est avantageusement remplacé par une sonnerie (fig. 951) qui reste d'abord silencieuse. Elle se

fait entendre dès qu'une étincelle éclate dans le voisinage, un *choc* sur le tube rétablit la résistance de la limaille, et la sonnerie cesse de fonctionner.

De même, si l'on prend une pastille *solide* obtenue en agglomérant de la résine et de la limaille à la température de fusion de la résine (ou un autre isolant), et si l'on intercale cette pastille par deux tiges métalliques dans le circuit de l'élément de pile et du galvanomètre, la pastille arrête le courant, mais elle devient conductrice quand une étincelle éclate.

Les substances qui jouissent de la propriété de passer ainsi de l'état de corps isolants à l'état de corps conducteurs, sont dites des *radioconducteurs*. Ce nom rappelle que leur conductibilité s'établit sous l'influence de la radiation électrique qui émane d'une étincelle. Parmi les radioconducteurs, les uns sont visiblement discontinus comme les limailles métalliques, les mélanges de poudres métalliques et de poudres isolantes, les agglomérés de limailles et d'isolants; d'autres, comme une colonne de billes d'acier superposées, n'offrent pas de discontinuité apparente.

L'effet se produit à l'air libre, mais il a encore lieu à travers les cloisons et les murs⁽¹⁾; toutefois un radioconducteur enfermé avec son circuit dans une *enveloppe métallique* hermétiquement close n'éprouve aucune action.

Nous voyons qu'un radioconducteur intercalé dans un circuit de pile se comporte d'abord comme un isolant et maintient le circuit ouvert, puis il devient conducteur et ferme le circuit dès qu'une étincelle éclate. On a ainsi le moyen de *déterminer à distance, sans fil intermédiaire, à un instant donné*, même à travers des obstacles, les divers effets du courant : aimantation, incandescence, électrolyse, etc.

La conductibilité d'un radioconducteur disparaît par un *choc*. Cela permet de rendre l'usage des radioconducteurs intermittent comme celui des électroaimants; par une étincelle ils ferment un circuit, et ils l'ouvrent par un choc.

1047. Télégraphie hertzienne sans fil. — La télégraphie par signaux de Chappe, la télégraphie optique (748) sont des télégraphies sans fil. L'idée d'une télégraphie électrique sans fil aurait pu suivre les expériences d'induction de Faraday. En effet, un circuit inducteur agissait à distance sur un circuit induit indépendant, et pouvait y développer des effets de courant électrique par le jeu d'un manipulateur ouvrant ou fermant à volonté le circuit inducteur. Mais la distance à laquelle doivent se trouver les deux circuits pour qu'il y ait une action, est trop faible pour qu'on puisse utiliser de cette façon les phénomènes ordinaires d'induction.

L'observation faite par Hertz (1045) de la transmission par ondes des vibrations électriques engendrées par la décharge d'un condensateur, et la découverte que M. Branly a faite des radioconducteurs ont permis à Popoff et surtout à Marconi de réaliser dans ces dernières années des essais encourageants.

(1) Cette transmission n'est que relative, car, en faisant usage de radioconducteurs très sensibles, MM. Branly et G. Le Bon ont observé que les ondes électriques ne pénétraient pas dans une enceinte de ciment de Portland dont les parois n'avaient que 30 centimètres d'épaisseur.

A la *station de départ*, on dispose un appareil de Hertz, et on le fait fonctionner de façon à lancer des ondes pendant un temps variable. Par des émissions longues et brèves d'étincelles, on reproduit ainsi l'alphabet de Morse. A la *station d'arrivée*, on installe un circuit de pile renfermant un tube à limaille (1046) qui devient conducteur à chaque émission d'étincelle à la station de départ. Le courant de la pile peut alors circuler et faire fonctionner un récepteur Morse. Le courant que le tube Branly a laissé circuler agit automatiquement (par un électroaimant) sur un petit marteau qui choque le tube et interrompt le courant jusqu'à l'arrivée d'une nouvelle onde.

Grâce à des dispositions spéciales (fils conducteurs servant de collecteurs d'ondes et communications avec la terre), les transmissions d'ondes ont permis à Marconi de correspondre directement et régulièrement jusqu'à une distance de 50 kilomètres⁽¹⁾. Après lui, le lieutenant de vaisseau Tissot a établi par des procédés semblables des correspondances régulières entre l'île d'Ouessant et la rade de Brest.

Les appareils perfectionnés que M. Ducretet a réalisés donnent la facilité d'installer immédiatement des postes de télégraphie sans fil.

1048. Effets physiologiques des courants de haute fréquence. — Les effets des courants alternatifs varient avec la fréquence.

Un courant de faible fréquence surtout s'il est de forme *sinusoidale* (fig. 344) n'a que peu d'effet sur le système nerveux.

Quand on augmente la fréquence, on augmente l'intensité des effets jusqu'à un maximum qui correspond à environ 3000 périodes par seconde. Les contractions répétées peuvent alors produire la mort par *asphyxie*. Après un choc électrique de courte durée, la pratique de la respiration artificielle se montre efficace.

Au delà de 3000 périodes par seconde, l'action décroît. Vers 10000 et au dessus, les courants alternatifs ne donnent plus de secousses.

Dans les expériences de décharges oscillatoires à très courte période, on peut sans rien ressentir fermer le circuit en mettant les deux mains en contact avec les bornes de l'excitateur (1043).

D'Arsonval et Apostoli ont montré l'influence favorable des courants de haute fréquence sur les phénomènes de nutrition.

(1) Pour devenir réellement pratiques, ces expériences exigeront des perfectionnements importants. En effet, les ondes électriques se propagent dans tous les sens, et un récepteur à limaille quelconque peut recevoir la dépêche. Afin d'assurer le secret des communications sans alphabet de convention, il faudrait concentrer les ondes électriques en un faisceau cylindrique et reproduire la disposition de la télégraphie optique (748); cela permettrait en outre d'effectuer sans perte le transport de l'énergie électrique. Il pourrait être préférable, dans certains cas, de conserver l'avantage de la transmission en tous sens, et de savoir établir entre le transmetteur et le récepteur un accord analogue à celui des résonateurs en Acoustique (586), afin que les récepteurs accordés fussent seuls impressionnés.

HISTORIQUE

L'électricité est une science toute moderne. Jusqu'à ces derniers temps, on a classé les phénomènes électriques en trois groupes : électricité statique, magnétisme et électricité dynamique ; nous conserverons cette division consacrée par l'usage, mais nous ferons remarquer que les découvertes modernes paraissent conduire à un groupement plus simple, l'électricité *du courant électrique* qu'on pourrait appeler électricité voltaïque, et l'électricité *rayonnante* ou électricité hertzienne.

ÉLECTRICITÉ STATIQUE

1049. Si la connaissance de l'attraction des corps légers par l'ambre frotté remonte à *Thalès de Milet*, c'est-à-dire au VI^e siècle avant l'ère chrétienne, ce n'est qu'au début du XVII^e siècle que l'électricité commence à se développer. A ce moment, l'électricien anglais *Gilbert* donne une liste de corps qui s'électrisent par le frottement ; on y rencontre le verre, le soufre ; il en exclut les métaux ; il distingue les phénomènes électriques des phénomènes magnétiques.

C'est *Otto de Guêricke*, bourgmestre de Magdebourg, qui construit la première machine électrique ; elle consiste en un globe de soufre que l'on fait tourner autour d'un axe et que l'on frotte avec la main : Otto de Guêricke en tire des étincelles et observe la répulsion électrique.

Au commencement du XVIII^e siècle, *Gray*, en Angleterre, distingue les bons et les mauvais conducteurs. Il reconnaît l'influence électrique.

Le physicien français *Du Fay* montre que tous les corps sont susceptibles d'être électrisés pourvu qu'ils soient isolés ; en 1733, il établit la distinction fondamentale des deux électricités : l'électricité positive et l'électricité négative.

Wilke démontre que deux corps frottés l'un contre l'autre prennent des électricités contraires et construit le premier modèle d'électrophore.

En 1745, *Von Kleist*, doyen du chapitre de Kammin en Poméranie, découvre le condensateur. *Musschenbroek* fait la même découverte à Leyde ; l'abbé *Nollet*, à Paris, multiplie les expériences avec les machines électriques et la bouteille de Leyde, et contribue à répandre le goût des études sur l'électricité.

En Amérique, *Franklin* explique le fonctionnement de la bouteille de Leyde, invente le paratonnerre à tige ; en Italie, *Volta* construit son électrophore (1775) et l'électroscope condensateur.

A la fin du XVIII^e siècle appartient encore la démonstration par *Coulomb* des lois des attractions et des répulsions électriques.

Au début du XIX^e siècle, la découverte de la pile et de ses applications variées fait délaissier quelque temps l'électricité statique.

Faraday signale toutefois l'importance du rôle joué par les isolants ou diélectriques qui séparent les corps électrisés.

Les mesures calorimétriques de *Riess*, les méthodes électrométriques de *W. Thomson* et de *Gaugain* ouvrent la voie aux recherches précises.

En 1865, *Holtz* fait connaître les divers types de machines à influence qui ont remplacé la machine à frottement de *Ramsden*.

L'introduction de la théorie du potentiel en électrostatique fait disparaître le langage vague des anciens électriciens, déduit les phénomènes observés de quelques théorèmes généraux, met sur la voie d'analogies qui facilitent l'exposé des faits, et conduit à appliquer aux transformations électriques l'*équivalence* qui préside aux transformations de l'énergie.

MAGNÉTISME

1050. Les anciens savaient que l'aimant naturel attire le fer. Vers le XII^e siècle, les navigateurs apprirent à faire usage de la boussole, que les Chinois employaient depuis très longtemps pour se diriger dans leurs voyages sur terre.

A la fin du XVI^e siècle, *Gilbert* coordonne et complète les connaissances sur le magnétisme. Il connaît la répulsion des pôles de même nom, l'attraction des pôles de noms contraires; il décrit l'expérience de l'aimant brisé, l'aimantation par l'influence de la Terre et par friction, l'action exercée par un aimant à travers les corps non magnétiques; il assimile la Terre à un aimant.

En 1780, *Coulomb* établit les lois des attractions et des répulsions magnétiques.

En 1823, *Ampère* assimile les aimants aux solénoïdes. Peu de temps après, la découverte de l'aimantation par les courants multiplie les applications des électroaimants.

Faraday introduit une nouvelle interprétation des phénomènes magnétiques par la considération du flux de force magnétique.

ÉLECTRICITÉ DYNAMIQUE

1051. Il y a actuellement un siècle, la découverte de la pile fut le point de départ de découvertes qui se sont succédé sans interruption.

En 1790, *Galvani*, professeur d'anatomie à Bologne, avait observé les actions que le contact de deux métaux fait naître entre les nerfs et les muscles d'une grenouille; *Volta*, professeur de physique à Pavie, est conduit par l'analyse de cette expérience à la découverte de la pile qu'il décrit en 1800. L'électricité se présente alors sous la forme de *courants continus*. Les effets du courant sont dès lors rapidement signalés.

Phénomènes généraux. — En 1801, *Nicholson* et *Carlisle* observent la décomposition de l'eau par la pile. En 1807, *Davy* applique la pile à la décomposition des alcalis et à la préparation du potassium et du baryum. Avec une pile de 2000 éléments zinc-cuivre à larges surfaces et à eau acidulée, il forme un brillant arc voltaïque entre deux pointes de charbon de bois (1810).

Les relations entre l'électricité et le magnétisme ont pour point de départ l'observation faite par *Ærsted* à Copenhague en 1819 de la déviation inattendue d'une aiguille aimantée par un courant.

En 1823 *Ampère* découvre que deux conducteurs traversés par un courant agissent l'un sur l'autre. Il résout par le calcul et il vérifie par l'expérience les différents cas des actions mutuelles des courants. Il observe l'action de la Terre sur les courants et imagine les solénoïdes qui se comportent comme des aimants. Il explique les phénomènes magnétiques en assimilant les aimants à des solénoïdes.

Ampère et *Arago* posent les règles de l'aimantation de l'acier et du fer doux par les courants.

En 1823, *Seebeck* découvre les phénomènes thermoélectriques.

Vers 1827, *Pouillet* et *Ohm* établissent séparément la relation qui existe entre l'intensité du courant d'une pile et la résistance de son circuit. *Ohm* rattache cette relation aux phénomènes électrostatiques observés sur le circuit.

En 1831, *Faraday* découvre l'induction ou la production de courants électriques à distance sous l'influence d'aimants ou de courants. En 1833, *Faraday* fait connaître les lois de l'électrolyse.

Applications. — Les années qui ont suivi la découverte de l'induction par *Faraday* ont été surtout consacrées aux nombreuses applications des courants.

L'emploi des courants constants dus à *Bequerel*, *Daniell*, *Grove*, *Bunsen*, permet de réaliser les mesures qui conduisent à la vérification précise des lois des courants (loi d'*Ohm*, loi de *Joule*).

Les principes de la galvanoplastie sont posés par *Jacobi* en 1838. A la dorure et à l'argenture se rattachent les noms de *Delarive*, de *Ruolz* et d'*Elkington*.

L'aimantation temporaire du fer doux par les courants devient le point de départ d'une foule d'appareils nouveaux : régulateurs, interrupteurs, horloges électriques et surtout télégraphes. La transmission électrique de signaux à distance est réalisée par *Steinheil* à Munich, *Wheatstone* à Londres, *Bréguet* à Paris. L'appareil enregistreur en usage est dû à l'Américain *Morse* (1837).

Le télégraphe est complété en 1876 par le téléphone du physicien américain *Graham Bell* qui transmet à distance la parole elle-même.

En 1844, *Foucault* rend pratique la lumière de l'arc voltaïque par l'usage de la pile *Bunsen*, de baguettes de charbon de cornue et d'un régulateur automatique à électroaimant.

Peu de temps après, la bobine d'induction, primitivement établie par *Masson* et *Bréguet*, reçoit d'importants perfectionnements de *Fizeau* (condensateur), de *Foucault* (interrupteur à mercure). La bobine, sortie des ateliers de *Ruhmkorff* réunit tous les perfectionnements.

Les premières machines d'induction de *Pixii* (1832) et de *Clarke* étaient

des machines à courants alternatifs, elles n'avaient donné lieu qu'à un petit nombre d'applications.

L'invention en 1871 de la machine de *Gramme*, machine à courants continus obtenus par induction, opère une révolution dans l'industrie électrique. Jusque-là, on avait consommé du zinc pour produire des courants à l'aide des piles. Actuellement, les courants utilisés dans l'électrometallurgie et dans l'éclairage électrique sont des courants induits, engendrés par des déplacements de circuits dans un champ magnétique, et ces déplacements sont entretenus par des machines à vapeur qui ne consomment que de la houille. Ces courants sont beaucoup moins dispendieux que ceux des piles. Grâce à l'auto-excitation, les machines sont devenues elles-mêmes moins volumineuses et en même temps moins coûteuses. L'usage des moteurs électriques se généralise.

L'emploi des accumulateurs à électrodes de plomb, inventés par *Planté* en 1860, permet d'emmagasiner et de transporter l'énergie électrique.

Importance en électricité du principe de la conservation de l'énergie. — La notion de l'énergie et le principe de la conservation de l'énergie, précisés par *Joule*, *Thomson*, *Helmholtz*, ont conduit à reconnaître les transformations de travail qui accompagnent les phénomènes électriques.

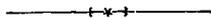
L'électricité apparaît comme un *intermédiaire* qui emmagasine de l'énergie comme on emmagasine de l'énergie en élevant un poids. Cette énergie ne se perd pas, elle est restituée sous diverses formes, pendant la décharge ou pendant le passage du courant, et les lois spéciales du courant électrique permettent de régler à l'avance la forme sous laquelle l'énergie sera restituée et le lieu où on l'utilisera.

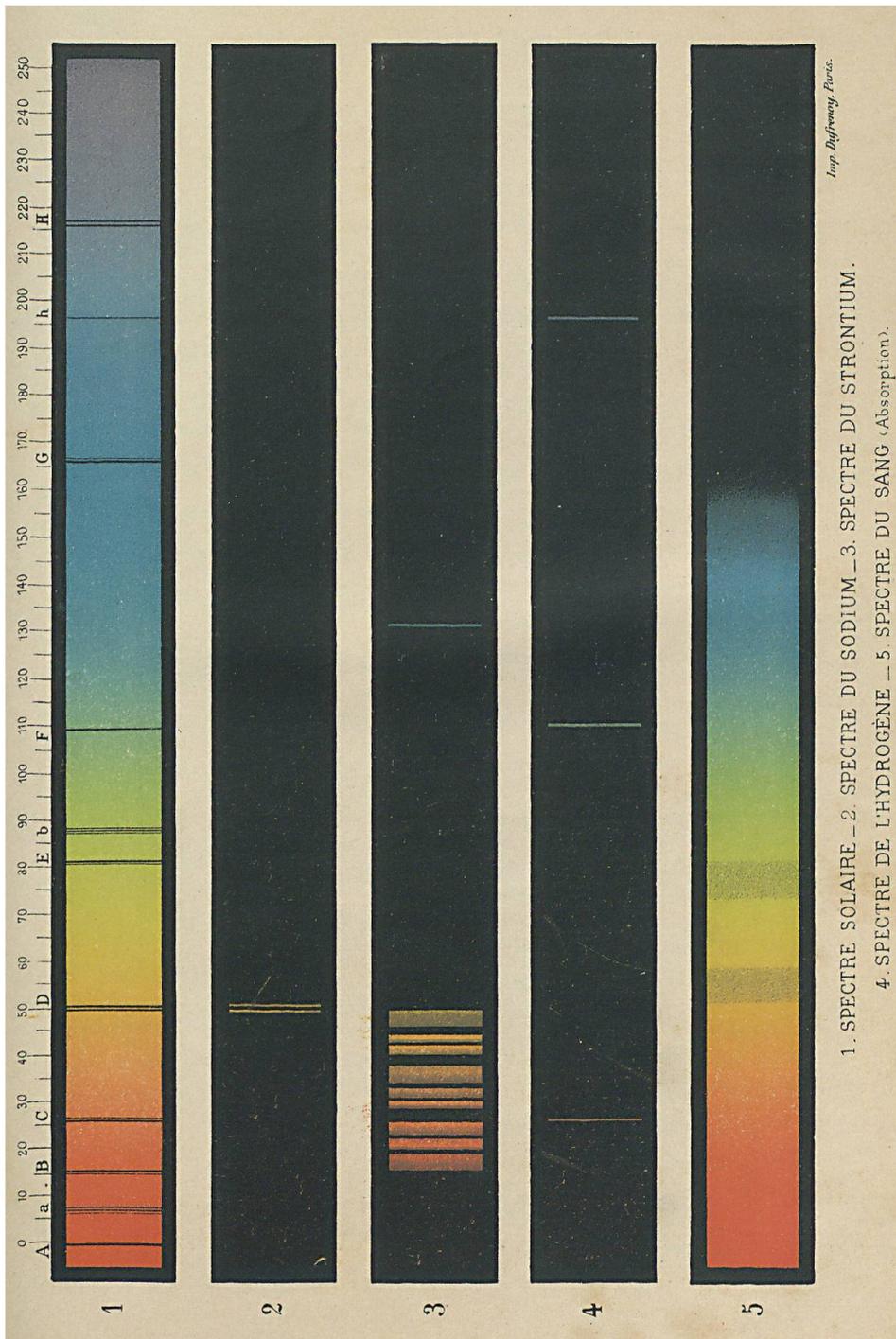
Les transformations ont lieu conformément aux règles de l'équivalence avec une rigueur qui rend possible le calcul de la grandeur des effets produits, et l'évaluation de leur prix de revient dans les usages industriels.

ÉLECTRICITÉ RAYONNANTE

En 1889, *Hertz* démontre expérimentalement la propagation des vibrations électriques et leur analogie avec les vibrations lumineuses. Cette découverte est le point de départ d'une nouvelle branche de l'électricité, l'électricité rayonnante.

Avec les radioconducteurs *Branly*, l'Italien *Marconi* réalise en 1899 des transmissions de dépêches sans fils à plus de 50 kilomètres. La production à distance sans fils des divers effets du courant devient désormais possible.





Imp. Dufrenoy, Paris.

1. SPECTRE SOLAIRE — 2. SPECTRE DU SODIUM — 3. SPECTRE DU STRONTIUM.
 4. SPECTRE DE L'HYDROGÈNE — 5. SPECTRE DU SANG (Absorption).

PHYSICIENS

CITÉS DANS L'OUVRAGE

- Amontons**, né à Paris (1663-1705).
- Ampère**, né près de Lyon, créateur de l'électrodynamique (1775-1836).
- Arago** (François), astronome et physicien (1755-1859), né à Estagel (Pyrénées-Orientales).
- Archimède** de Syracuse (287-212 av. J.-C.).
- Aristote**, philosophe grec, précepteur d'Alexandre le Grand (384-322 av. J.-C.).
- Atwood**, professeur à Cambridge (1745-1807).
- Baumé**, chimiste français (1728-1804).
- Becquerel**, physicien français (1788-1878).
- Bernouilli** (D.), né à Groningue (1700-1782).
- Berthelot** (M.), chimiste et physicien français (synthèses chimiques et thermo-chimie).
- Berthollet**, chimiste français (1748-1822).
- Black**, professeur à Édimbourg (1728-1799).
- Borda**, né à Dax (1733-1799).
- Boyle** (R.), physicien et chimiste anglais (1627-1691).
- Bunsen**, 1811-1899), professeur à Heidelberg.
- Cagniard-Latour**, né à Paris (1779-1859).
- Carnot** (Sadi) (1796-1832).
- Charles**, né à Nancy (1746-1823).
- Clausius**, professeur à Bonn (1822-1888).
- Colladon**, physicien genevois (1802-1893).
- Coulomb**, né à Angoulême (1736-1806).
- Daguerre**, né à Cormeilles-en-Parisis (1788-1851).
- Dalton**, savant anglais (1766-1844).
- Daniell**, chimiste anglais (1790-1845).
- Davy** (Humphry), chimiste anglais (1778-1827).
- Descartes**, né en Touraine (1596-1650).
- Despretz**, physicien français (1789-1863).
- Du Fay**, né à Paris (1698-1739).
- Dulong**, né à Rouen (1785-1838).
- Edison**, physicien américain, né en 1847.
- Faraday** (Michel), physicien anglais (1794-1867) (induction électrique).
- Fahrenheit**, né à Dantzig (1686-1740).
- Fizeau**, physicien français (1819-1896).
- Foucault**, physicien français (1819-1868).
- Franklin** (Benjamin), né à Boston, aux États-Unis (1706-1790).
- Fraunhofer**, opticien bavarois (1787-1826).
- Fresnel**, né à Broglie (Eure) (1788-1827), créateur de l'optique physique (interférences, diffraction, polarisation).
- Galilée**, né à Pise (1564-1642), physicien et astronome.
- Galvani**, né à Bologne (1737-1798).
- Gauss**, mathématicien allemand (1777-1855).
- Gay-Lussac**, né à Saint-Léonard (Haute-Vienne) (1778-1850).
- Gilbert**, physicien anglais (1540-1603).
- Gramme**, né à Liège.
- Gray**, physicien anglais (mort en 1736).
- Helmholtz**, physicien et physiologiste allemand (1821-1894).
- Héron**, né vers 153 av. J.-C.

- Hertz**, physicien allemand, créateur de l'électricité rayonnante.
- Hirn**, de Colmar (1815-1890).
- Huygens**, savant hollandais (1629-1695).
- Ingenhouz**, né à Bréda (1730-1799).
- Joule**, né à Manchester (1818-1889).
- Kirchhoff**, né à Kœnisberg (1824-1887).
- Képler**, né dans le Wurtemberg (1571-1630), un des fondateurs de l'astronomie moderne.
- Laplace**, mathématicien, né à Beaumont (1749-1827).
- Lavoisier**, né à Paris, fondateur de la chimie moderne (1743-1794).
- Leibnitz**, né à Leipzig (1646-1716).
- Lenz**, physicien russe.
- Leslie**, physicien écossais (1766-1832).
- Lippmann**, professeur à la Sorbonne.
- Mariotte** (abbé), né en Bourgogne (1620-1684).
- Mayer** (Robert) (1814-1878), médecin d'Ileilbronn.
- Melloni**, né à Parme (1801-1854).
- Mersenne** (le Père), né à Oizé dans le Maine (1588-1648).
- Monge**, mathématicien, né à Beaune (1746-1818).
- Montgolfier** (Étienne et Joseph de), fabricants de papier à Annonay.
- Morin**, général d'artillerie (1795-1880).
- Morse**, né à Charlestown (1791-1873).
- Musschenbroek**, né à Liège (1692-1761).
- Newton**, mathématicien et physicien anglais (1642-1727).
- Nicholson**, savant anglais (1753-1815).
- Niepce** (Nicéphore), né à Châlon-sur-Saône (1765-1833).
- Nollet** (abbé) (1700-1770).
- Ørsted**, né à Copenhague (1777-1851).
- Ohm**, physicien allemand, né à Erlangen (1787-1854).
- Otto de Guericke** (1602-1686).
- Papin** (Denis), né à Blois (1647-1714).
- Pascal** (Blaise), né à Clermont-Ferrand, géomètre et physicien (1623-1662).
- Pouillet**, professeur à la Sorbonne (1791-1868).
- Pythagore**, né à Samos (570-472 av. J.-C.).
- Ramsden**, constructeur anglais.
- Réaumur**, physicien et naturaliste, né à La Rochelle (1683-1757).
- Regnault** (Victor), physicien français (1810-1878).
- Ruhmkorff**, constructeur à Paris (1803-1877).
- Saussure** (de), naturaliste genevois, (1740-1799).
- Seebeck**, physicien allemand (1770-1831).
- Stévin**, né à Bruges (1548-1620).
- Thomson** (William), physicien anglais.
- Torricelli**, savant italien (1608-1647).
- Volta** (Alexandre), né à Côme (Italie) (1744-1827), inventeur de la pile électrique.
- Watt**, ingénieur écossais (1736-1810).
- Wilke**, physicien suédois (1732-1796).
- Wollaston**, physicien anglais (1766-1828).
- Young** (Thomas), médecin et physicien anglais (1773-1829).

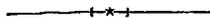


TABLE DES MATIÈRES

NOTIONS DE MÉCANIQUE

Mouvements. — *Mouvement uniforme.* Mouvement rectiligne uniforme. Mouvement circulaire uniforme. — *Mouvement varié.* Définition de la vitesse. Mouvement rectiligne uniformément varié, accélération. Mouvement uniformément accéléré (Loi des espaces déduite de la loi des vitesses. Loi des vitesses déduite de la loi des espaces). Mouvement uniformément retardé. Mouvement périodique. *Représentation graphique d'un mouvement.* — *Mouvement d'un système matériel.*..... I

Forces. — Définition d'une force. Forces égales. Forces en équilibre. Représentation d'une force. Transport d'une force en un point de sa direction. — Mesure des forces. Peson. — *Composition des forces.* Résultante et composantes. — I. *Composition des forces appliquées en un même point.* Composition de deux forces agissant suivant une même droite. Composition de deux forces concourantes, parallélogramme des forces. Composition de plusieurs forces concourantes, polygone des forces. Cas de trois forces concourantes. Conditions d'équilibre de plusieurs forces concourantes. Décomposition d'une force. — II. *Composition des forces parallèles.* Composition de deux forces parallèles de même sens. Composition de deux forces parallèles de sens contraires, Couple. Composition de plusieurs forces parallèles de même sens. Composition de forces parallèles quelconques. Décomposition d'une force en forces parallèles. Propositions relatives aux couples. — III. *Réduction des forces appliquées à un corps solide.*... IX

Principes de la mécanique. — I. *Principe de l'inertie.* — II. *Principe de l'indépendance de l'effet d'une force et du mouvement antérieurement acquis.* Mouvement produit par une force constante. — III. *Principe de l'indépendance des effets des forces.* Proportionnalité des forces aux accélérations. Masse, unité de masse. Unité de force. Densité. — IV. *Principe de l'égalité de l'action et de la réaction.*..... XVII

Travail. — *Déplacement du point d'application dans la direction de la force.* Travail d'une force constante, kilogrammètre, erg, joule. Puissance d'une machine. Travail moteur, travail résistant. Travail d'une force variable. — *Déplacement du point d'application dans une direction différente de celle de la force.* Force constante, déplacement rectiligne, trajectoire curviligne. Force variable. — *Équivalence de la force vive et du travail.* Relation entre la force vive d'un point matériel et le travail dépensé pour lui communiquer sa vitesse. Relation entre la force vive d'un point matériel et le travail qu'il peut effectuer en perdant sa vitesse. — *Théorème des forces vives.* — *Énergie,* énergie de mouvement ou énergie cinétique, énergie de position ou énergie potentielle. Transformation réciproque des deux énergies..... XXIII

Machines. — Machine simple. Machine composée. — *Levier.* Levier du premier genre, levier du second genre, levier du troisième genre..... XXXII

PHYSIQUE

Objet de la physique. — Modifications chimiques. Modifications physiques. Observation, expérimentation. — *Branches de la Physique.* Lois physiques. Théories physiques, hypothèses. Divisions de la physique..... 1

Propriétés générales des corps. — Étendue. Divisibilité. Compressibilité. Intervalles moléculaires. Élasticité. — *États des corps.* État solide. État liquide. État gazeux. États intermédiaires..... 5

Mesure des longueurs. — Mètre. Vernier. Pied à coulisse. Vis micrométrique. Sphéromètre. Palmer. Cathétomètre..... 8

PESANTEUR

Tous les corps sont pesants. Pesanteur. Direction de la pesanteur, fil à plomb. Verticale. Plan horizontal. La direction de la pesanteur passe par le centre de la Terre. Poids d'un corps, unité de poids. Centre de gravité, détermination géométrique du centre de gravité, détermination expérimentale du centre de gravité. Équilibre d'un corps solide mobile autour d'un axe ou d'un point fixe. Équilibre d'un corps solide reposant sur un plan résistant horizontal..... 15

Lois de la chute des corps. — Vitesse égale de chute dans le vide. Loi des espaces, loi des vitesses. — *Vérifications expérimentales.* I. Chuté dans le vide. II. Loi des espaces, plan incliné de Galilée, machine d'Atwood, appareil Morin. III. Loi des vitesses. Accélération dans la machine d'Atwood, calcul de g . Vérification de la proportionnalité des forces aux accélérations au moyen de la machine d'Atwood... 21

Pendule. — *Mouvement du pendule simple.* Durée de l'oscillation simple. Courbe représentative du mouvement pendulaire. Lois du pendule simple. — *Pendule composé.* *Vérification expérimentale des lois du pendule.* Isochronisme des petites oscillations, loi de la matière du pendule, loi des longueurs, loi des accélérations. — *Mesure de l'intensité de la pesanteur.* Résultats. Longueur du pendule battant la seconde. — *Attraction universelle.* La pesanteur est un cas particulier de l'attraction universelle..... 31

Balance. — Mesures des masses et des poids relatifs. Calcul du poids absolu d'un corps. Description d'une balance. Stabilité de la balance. Conditions de justesse d'une balance. Double pesée. Conditions de sensibilité d'une balance. Positions relatives des trois points d'appui. Balance de précision. Balance hydrostatique..... 41

Densité. — Densité, poids spécifique..... 49

Unités. — Anciennes unités. Relations entre les unités. — *Système d'unités adopté en Physique.* Unités fondamentales : unité de longueur, unité de temps, unité de masse. Unités dérivées : unité de surface, unité de volume, unité d'angle, unité de

vitesse, unité d'accélération, unité de force, unité de travail, unité de puissance, unité de pression, unité de densité. Unités pratiques. — *Unités de la mécanique industrielle*. Unités fondamentales : unité de longueur, unité de temps, unité de force. Unités dérivées : unité de masse, unité de travail, unité de puissance. Remarques sur les systèmes d'unités. — Mesure d'une force avec une balance ou un dynamomètre. 50

Hydrostatique. — Fluides. Liquides. Pression. Transmission d'une pression dans un solide. Principe de la transmission des pressions dans un liquide (principe de Pascal). Presse hydraulique. — *Liquides pesants*. Horizontalité de la surface libre. Pressions intérieures. *Un plan horizontal est une surface de niveau*. La surface libre d'un liquide est une surface de niveau. Pression sur un élément plan horizontal à l'intérieur d'un liquide. Différence des pressions sur deux éléments égaux à des niveaux différents. Pression de bas en haut. Pression sur une surface solide. Pressions sur les parois des vases : pression sur le fond, pressions sur les parois latérales. Paradoxe hydrostatique. Recul dû à l'écoulement. — *Pressions sur les corps immergés*. Principe d'Archimède. Réaction exercée par un corps sur le liquide dans lequel il est plongé. Corps immergés et corps flottants. Équilibre des corps flottants. Détermination expérimentale du volume d'un corps solide. 56

Détermination des densités. — *Méthode du flacon* : corps liquides, corps solides. — *Méthode de la balance hydrostatique* : corps solides, corps liquides. — *Méthode des aréomètres à volume constant* : aréomètre de Nicholson, aréomètre de Fahrenheit. — *Aréomètres à poids constant* : pèse-acides, pèse-esprits, alcoomètre centésimal de Gay-Lussac ; volumètres, densimètres. Calcul des poids spécifiques. — *Liquides superposés*. Fiole des quatre éléments. Niveau à bulle d'air. — *Vases communiquants*. Équilibre d'un liquide, niveau d'eau. Équilibre de deux liquides. 73

Capillarité. — Dépression barométrique. Aréomètres. Osmose. Dialyse. 87

Statique des gaz. — Expansibilité, compressibilité et élasticité. Transmission des pressions par les gaz. — *Pesanteur et pression des gaz*. Pesanteur des gaz. Pressions exercées par un gaz pesant. — *Pression atmosphérique*. Expérience du baromètre. Interprétation de l'expérience du baromètre. Valeur de la pression atmosphérique. Expérience du Puy-de-Dôme. Effets de la pression atmosphérique : crève-vessie, hémisphères de Magdebourg. 90

Baromètres. — Construction d'un baromètre. Baromètre normal. Baromètre de Fortin. Baromètre à siphon. Baromètre de Gay-Lussac. Baromètre à cadran. Baromètre métallique. Mesure des hauteurs par le baromètre. Variations barométriques. 97

Compressibilité des fluides. — *Compressibilité des liquides*. — *Compressibilité des gaz*. Loi de Mariotte. Vérification de la loi de Mariotte : pressions peu supérieures à la pression atmosphérique ; pressions inférieures à la pression atmosphérique ; pressions notablement supérieures à la pression atmosphérique ; expériences de Dulong et Arago, expériences de Regnault. Résultats. — *Manomètres*. — *Manomètres industriels*. manomètres à air libre, manomètres à air comprimé, manomètres métalliques. — *Manomètres de précision* : pressions élevées, pressions voisines de la pression atmosphérique, pressions inférieures à la pression atmosphérique. Mesure de la force élastique d'un gaz dans une éprouvette. — *Loi du mélange des gaz*. Expérience de Berthollet. — *Dissolution des gaz dans les liquides*. Lois de la solubilité des gaz. Coefficient de solubilité. Calcul de la masse de gaz dissoute dans une enceinte limitée. Dissolution d'un mélange gazeux. — *Principe d'Archimède appliqué aux gaz*. Baroscope. Correction des pesées effectuées dans l'air. Corps immergés et corps flottants. — *Aérostats*. Construction des aérostats. Force ascensionnelle, calcul de la force ascensionnelle au départ, variations de

la force ascensionnelle. Manœuvre de l'aérostat. Parachute. Direction des aérostats.
Ballons-sondes..... 106

Machine pneumatique. — Description et fonctionnement. Force élastique dans le récipient après n coups de piston. Efforts à exercer après chaque coup de piston. Emploi de deux corps de pompe. Description des différents organes : piston et soupapes, manomètre, platine, clef. Limite du vide, influence de l'espace nuisible. — *Pompe à mercure* : description, manœuvre de la pompe, degré du vide obtenu. Trompes. — *Machines de compression*. Fonctionnement. Force élastique dans le récipient après n coups de piston. Limite de la compression par l'espace nuisible. Pompe de compression. Applications de l'air raréfié et de l'air comprimé. — *Siphon* : fonctionnement, amorcement, calcul complet de la pression. Fontaine intermittente. Pipette. Loi de Torricelli sur l'écoulement des liquides. Vase de Mariotte..... 134

Pompes. — Pompe aspirante : fonctionnement, espace nuisible, effort nécessaire pour manœuvrer le piston. Pompe foulante, effort nécessaire pour manœuvrer le piston. Pompe à incendie. Pompe aspirante et foulante. Presse hydraulique, calcul de la pression, cuir embouti, applications..... 154

Historique. — Notions de mécanique. Pesanteur. Hydrostatique. Mécanique des gaz..... 162

CHALEUR

Sensations de chaleur et de froid. Effets de la chaleur. — *Dilatations par la chaleur*. Solides, liquides, gaz..... 165

Mesure des températures. — Températures égales. Différence de température. — *Thermomètres*. Principe de la construction d'un thermomètre centigrade. Comparabilité des thermomètres de même substance. Choix d'une substance thermométrique. *Thermomètre à mercure*. Définition du degré centigrade. Construction du thermomètre à mercure. Détermination des points fixes. — Echelles thermométriques, correspondance des échelles thermométriques. Déplacement du zéro; sensibilité d'un thermomètre. Mesure des températures très basses. Thermomètre à alcool. Thermomètres à maxima et à minima, thermomètre à maxima et thermomètre à minima de Rutherford. Comparabilité des thermomètres à mercure. *Thermomètre normal*. Emploi de thermomètres à mercure gradués..... 168

Dilatation des solides. — *Formules des dilatations*. Dilatation linéaire. Dilatation cubique. Dilatation superficielle. Densités d'un même corps à diverses températures. — *Dilatation linéaire des solides*. Méthode de Lavoisier et Laplace. Méthode micrométrique. Résultats. — *Dilatation des liquides*. Détermination de la dilatation absolue du mercure par Dulong et Petit. Détermination de la dilatation d'un liquide quelconque : méthode du thermomètre à poids, méthode du flacon, méthode du thermomètre à tige, dilatation apparente. Résultats. — *Dilatation de l'eau*. Maximum de densité de l'eau. Détermination de la température du maximum de densité de l'eau. Mesure directe de la dilatation cubique des solides. — *Applications des dilatations*. Application du pendule aux horloges : moteur, régulateur. Pendule compensateur. Réduction des hauteurs barométriques. Hauteur de mercure normal. Correction des densités : solides, liquides. Efforts exercés par des pièces métalliques sous l'influence des variations de température..... 179

Dilatation des gaz. — *Dilatation d'un gaz sous pression constante.* Relation entre les volumes et les températures. Relation entre les volumes, les températures et les pressions. Equation des gaz parfaits. Extension de la loi du mélange des gaz. Relation entre les densités et les températures. Relation entre les densités, les températures et les pressions. Calcul du volume ou de la densité d'une masse gazeuse, dans les conditions normales de température et de pression. — *Coefficient d'augmentation de force élastique sous volume constant.* Relation entre le volume, la température et la pression. Extension de la loi du mélange des gaz. — *Mesure de la dilatation des gaz.* Expériences de Gay-Lussac, résultats. Expériences de Regnault; coefficient d'augmentation de pression sous volume constant; coefficient de dilatation sous pression constante. Résultats. — *Thermomètre normal.* Comparabilité des thermomètres à liquide. Comparabilité des thermomètres à gaz. Thermomètre à gaz sous pression constante. Thermomètre normal ou thermomètre à gaz sous volume constant..... 206

Densité des gaz. — Définition de la densité d'un gaz par rapport à l'air. Calcul de la masse m d'un volume V d'air à t^0 et H . Calcul de la masse M d'un volume V de gaz à t^0 et H . Poids d'un volume V de gaz à t^0 et H . Mesure de la densité d'un gaz par rapport à l'air. Détermination de la masse d'un centimètre cube d'air. Détermination de la densité des gaz qui attaquent les métaux. Variations avec la température et la pression de la densité d'un gaz par rapport à l'air : densités à température constante, densités à pression constante..... 223

Fusion. — Fusion brusque et fusion progressive. Lois de la fusion brusque. Point de fusion. Chaleur de fusion. Changement de volume pendant la fusion. Variation du point de fusion par la pression, regel. — *Solidification.* Lois de la solidification. Chaleur de solidification. Changement de volume au moment de la solidification. Surfusion. Solidification d'un liquide surfondu. Dissolution dans les liquides. Mélanges réfrigérants. Cristallisation. Sursaturation..... 231

Vaporisation. — *Vaporisation dans le vide :* vapeur saturante, vapeur non saturante. Forces élastiques maxima de différents liquides à une même température. La force élastique maximum d'une vapeur croît avec la température. Principe de la paroi froide. — *Mesure des forces élastiques maxima de la vapeur d'eau.* Mesure entre 0^0 et 100^0 : appareil de Dalton, appareil de Regnault. Forces élastiques de la vapeur d'eau aux températures élevées : expériences de Regnault, résultats. Force élastique maximum de la vapeur émise par la glace au-dessous de 0^0 . Forces élastiques maxima des dissolutions salines ou acides. — *Vaporisation dans les gaz.* Loi du mélange d'un gaz et d'une vapeur : vérification pour le cas d'une vapeur saturante, appareil de Gay-Lussac. Résultats. — *Densité des vapeurs.* Densité d'une vapeur non saturante ou surchauffée. Densité d'une vapeur saturante. Masse d'un volume V d'air humide..... 239

Evaporation. — Evaporation en vase clos. Evaporation dans une atmosphère illimitée, rapidité de l'évaporation dans une atmosphère illimitée. Froid produit par l'évaporation..... 255

Ebullition. — *Lois de l'ébullition.* Description du phénomène de l'ébullition de l'eau. — *Conditions qui font varier le point d'ébullition.* Abaissement du point d'ébullition sous de faibles pressions. Élévation du point d'ébullition avec la pression. Influence de la profondeur du liquide sur la température d'ébullition. Influence de la pureté du liquide. Influence de la présence d'un gaz. Influence de la viscosité du liquide. Détermination du point d'ébullition du liquide. Ebullition en vase clos, marmite de Papin. — *Phénomènes de calcfaction.* — *Distillation.* Appareil à distillation. Chaleur absorbée et dégagée dans la distillation. Congélation de l'eau dans le vide. Applications : production du froid par la vaporisation, dégagement de chaleur par la condensation d'une vapeur. Distillations fractionnées, essai des liquides alcooliques..... 257

Liquéfaction des vapeurs.— Compression, refroidissement..... 270

Liquéfaction des gaz. — Refroidissement sous la pression atmosphérique, compression à la température ordinaire, appareil de Pouillet. Compression et refroidissement combinés; méthode de Faraday, appareil de liquéfaction de Cailletet. — *Liquéfaction des gaz permanents.* Gaz permanents. Température critique. Conditions à réaliser pour liquéfier un gaz, refroidissement par la détente. Liquéfaction persistante des gaz permanents. Continuité de l'état liquide et de l'état gazeux. Application des gaz liquéfiés..... 271

Hygrométrie. — Vapeur d'eau de l'atmosphère. But de l'hygrométrie, état hygrométrique. Hygromètres : hygromètre chimique; hygromètres de condensation : hygromètre de Daniell, hygromètre d'Alluard; hygromètres d'absorption, hygromètre à cheveu de de Saussure..... 278

Calorimétrie. — Quantités de chaleur. Objet de la calorimétrie. Calorie. — *Principes expérimentaux.* Définition pratique de la calorie. — *Chaleurs spécifiques.* Capacité calorifique. Détermination des chaleurs spécifiques moyennes. Méthode des mélanges. Appareil de Regnault. Calorimètre de M. Berthelot. Méthode de la fusion de la glace. Puits de glace. Calorimètre de Bunsen. Chaleur spécifique des liquides. Chaleur spécifique des gaz. Résultats. Loi de Dulong et Petit. Loi de Wæstyn. — *Chaleurs de fusion.* Corps solide à la température ordinaire. Corps liquide à la température ordinaire. Chaleur de fusion de la glace, méthode des mélanges, méthode du calorimètre de Bunsen. — *Chaleurs de vaporisation.* Mesure de la chaleur de vaporisation par la méthode des mélanges. Appareil de M. Berthelot. Résultats..... 285

Propagation de la chaleur. — Modes d'échange de la chaleur entre deux corps (conductibilité, convection, rayonnement)..... 303

Conductibilité. — Bons conducteurs, mauvais conducteurs. Coefficient de conductibilité. Mesure de la conductibilité intérieure du mercure. Appareil d'Ingenhouz. Propriétés des toiles métalliques. Conductibilité des cristaux. Convection. Conductibilité des liquides. Conductibilité des gaz..... 303

Rayonnement calorifique. — Rayonnement dans le vide. — *Appareils de mesure.* Thermomètre différentiel de Leslie. Thermomultiplicateur. Méthode des impulsions, proportionnalité des quantités de chaleur aux impulsions. Lecture au galvanomètre par la méthode de la réflexion. Banc de Melloni. — *Théorèmes généraux sur la propagation de la chaleur.* Dans un milieu homogène, la chaleur se propage en ligne droite. Loi du carré des distances. Intensité d'une source. Influence de l'inclinaison sur la quantité de chaleur reçue. Loi du refroidissement de Newton. Propriétés des corps relativement à la chaleur rayonnante. — *Réflexion de la chaleur.* Lois géométriques de la réflexion. Miroirs ardents. Miroirs conjugués. Pouvoirs réflecteurs. — *Réflexion irrégulière ou diffusion.* — *Transmission de la chaleur.* — *Réfraction de la chaleur.* Décomposition de la chaleur solaire par un prisme. Distribution de la chaleur dans un spectre prismatique solaire. Spectres calorifiques des diverses sources. — *Pouvoirs diathermanes.* Détermination des pouvoirs diathermanes. Influence de la nature de la source. Influence de la nature de la substance (substances transparentes, sel gemme; substances non transparentes; interposition de deux lames différentes; influence de l'épaisseur de la lame absorbante). — *Absorption de la chaleur.* — *Émission de la chaleur.* Mesure des pouvoirs émissifs. Pouvoirs émissifs des diverses substances. Égalité du pouvoir émissif et du pouvoir absorbant. Inséparabilité des effets lumineux et calorifique d'une radiation..... 309

Applications des lois de la chaleur. — *Phénomènes météorologiques.* Rosée (influence du pouvoir émissif et de la conductibilité, exposition et état du ciel,

agitation de l'air). Nuages (variétés de nuages, formation des nuages). Brouillards. Pluie. Neige, givre, verglas, grêle. — *Tirage des cheminées*. Explication du tirage (conditions qui accroissent le tirage, causes de tirage insuffisant). Chauffage par circulation d'eau chaude. 331

Équivalent mécanique de la calorie. — Relation entre la chaleur et l'énergie mécanique. — *Transformation du travail mécanique en chaleur*. Percussion, frottement, compression. — *Transformation de la chaleur en travail mécanique.* — *Principe de l'équivalence*. Équivalent mécanique de la calorie. — *Détermination de l'équivalent mécanique de la calorie*. Expérience de Joule (appareil, principe de la méthode, calcul du travail employé à vaincre le frottement, calcul de la chaleur gagnée par le calorimètre, résultat). Expérience de Hirn (principe de la méthode, calcul de la chaleur disparue, calcul du travail produit). Invariabilité de l'équivalent mécanique de la calorie. Hypothèse sur la nature de la chaleur. Analyse des effets de la chaleur sur un corps (effets intérieurs, effets extérieurs). Calcul de l'équivalent mécanique de la calorie par Mayer, d'après la différence entre les chaleurs spécifiques de l'air à pression constante et à volume constant (calcul du travail externe de dilatation d'un gaz, chaleur dépensée pour effectuer le travail externe de dilatation; calcul en ergs). — *Principe de la conservation de l'énergie*. L'énergie d'un système isolé reste constante. Énergie calorifique. Énergie chimique. Énergie électrique. Énergie solaire. Mesure de la chaleur solaire. 338

Machine à vapeur. — Première machine à vapeur. Chaudière, corps de pompe et condenseur distincts. — *Chaudière à vapeur*. Chaudière à bouilleurs. Accessoires de la chaudière (indicateurs du niveau, indicateurs de la pression, appareils d'alimentation). — *Condenseur*. — *Mécanisme moteur*. Corps de pompe. Distribution de la vapeur. Fonctionnement du tiroir. Organes de transmission. Transformation du mouvement alternatif du piston en mouvement de rotation continu. Balancier. Excentrique. Volant. Régulateur à boules. — *Détente*. — *Divers types de machines à vapeur*. — *Puissance*. — *Rendement*. Calcul de la dépense de combustible. — Machines à gaz. 351

Historique. — Thermomètres. Dilatations. Vapeurs. Calorimétrie. Équivalent mécanique de la chaleur. Rayonnement calorifique. 366

ACOUSTIQUE

Objet de l'acoustique. Mouvement vibratoire d'un corps élastique. Mouvement vibratoire des corps sonores. Un corps ne peut vibrer que s'il est élastique. Transmission d'un mouvement vibratoire. Le son ne se propage pas dans le vide. 369

Vitesse du son. — Mesure de la vitesse du son dans l'air. Premières expériences. Méthode graphique de Regnault. Résultats. Vitesse de propagation du son dans l'eau. Vitesse de propagation du son dans la fonte de fer. — *Mode de propagation du son*. Propagation du son dans un tuyau cylindrique. Propagation dans un milieu indéfini. Longueur d'ondulation. 374

Réflexion du son. — Lois de la réflexion du son. Expérience des miroirs conjugués. Échos. Réfraction du son. 383

Qualités du son. — Intensité, loi du carré des distances; hauteur; timbre. — *Mesure du nombre de vibrations*. Sirène. Sirène de Cagniard-Latour. Méthode graphique. Limite des sons perceptibles. 387

Sons musicaux. — Intervalle de deux sons. Gamme. Notes. Diapason normal. Échelle musicale. Accords, accord parfait. Intervalles successifs de la gamme, tons et demi-tons. Dièzes, bémols. Gamme tempérée. Gammes mineures. Harmoniques.... 396

Tuyaux sonores. — Embouchure. L'air vibre dans un tuyau sonore, influence des parois, influence de la nature du gaz. Un tuyau sonore se comporte comme un résonateur. — *Lois des tuyaux cylindriques ou prismatiques.* Loi des harmoniques, tuyaux fermés, tuyaux ouverts. Loi des longueurs. Série complète des harmoniques. Nœuds et ventres fixes, vue d'ensemble sur la répartition des nœuds et des ventres, étude des nœuds et des ventres par les flammes manométriques. Longueurs d'ondulation des sons rendus par un tuyau. Nombre absolu de vibrations d'un son renforcé par un tuyau de longueur donnée. Mesure indirecte de la vitesse du son dans le gaz au moyen de tuyaux sonores. Tuyaux à anche. Instruments à vent. — *Loi de similitude*..... 404

Vibrations des corps solides. — Vibrations longitudinales des tiges, lois des vibrations longitudinales des tiges. Mesure indirecte de la vitesse du son dans un solide. — *Vibrations transversales des cordes.* Lois. Vérifications expérimentales (sonomètre, loi des longueurs, loi des diamètres, loi des tensions, loi des densités). Nœuds et ventres de vibrations. Harmoniques. Instruments à cordes. Vibrations transversales des tiges. Diapason..... 415

Timbre. — Vibration par influence ou résonance. Son simple, son composé. Les diapasons, les tuyaux sphériques rendent des sons simples. Résonateurs. Analyse des sons. Nature du timbre. Synthèse des sons. Distinction entre un son musical et un bruit. Étude du timbre par les tracés graphiques. Phonautographe. Phonographe..... 426

Historique..... 432

OPTIQUE

Corps lumineux. Corps transparents, corps translucides, corps opaques. — *Propagation de la lumière en ligne droite.* Chambre noire. Image du soleil. Théorie géométrique des ombres, ombre produite par un point lumineux, ombre produite par une sphère lumineuse (ombre, pénombre). — *Vitesse de la lumière;* la vitesse de propagation de la lumière est uniforme..... 435

Photométrie. — Intensité. Loi du carré des distances, démonstration expérimentale, démonstration théorique. Proposition fondamentale de la photométrie. Photomètre de Foucault. Photomètre de Rumford. Photomètre de Bunsen. Unité de lumière... 442

Réflexion. — *Lois de la réflexion.* Démonstration expérimentale des lois de la réflexion. Réversibilité des rayons. — *Miroirs plans.* Image d'un point, image d'un objet. Champ d'un miroir plan pour une position déterminée de l'œil. Réflexions multiples sur deux miroirs plans parallèles. Images multiples sur deux miroirs rectangulaires. Miroirs plans recevant des rayons convergents. Réflexion d'un faisceau de rayons parallèles. Miroirs tournants. Mesure optique des petits angles. Intensité de la lumière réfléchie. — *Réflexion irrégulière ou diffusion.* — *Miroirs sphériques.* Réflexion sur une surface courbe. Miroirs sphériques. — *Miroirs concaves.* Foyer principal. Axes secondaires. Plan focal. Foyers conjugués : variation de position de l'image d'un point. Champ d'un miroir sphérique. Construction du conjugué d'un point lumineux. Image d'un objet. Construction de l'image d'une droite : variations de position et de grandeur de l'image (droite réelle au-delà du foyer principal, droite réelle entre le foyer et le miroir, droite virtuelle en arrière du miroir). Rapport de grandeur de l'image à l'objet. —

Formule générale, discussion de la formule générale. Formule de Newton. Vérifications expérimentales. Mesure de la distance focale d'un miroir sphérique concave. — *Miroirs convexes*. Foyer principal. Axes secondaires, plan focal. Foyers conjugués. Image d'un objet. Variations de position et de grandeur de l'image pour une petite droite perpendiculaire à l'axe principal (droite réelle placée en face de la surface réfléchissante, droite virtuelle entre le miroir et le foyer principal, droite virtuelle au-delà du foyer principal). Formule générale. Discussion de la formule générale. Détermination de la distance focale principale d'un miroir convexe. Aberrations de sphéricité..... 448

Réfraction. — Déviation brusque d'un rayon lumineux. Lois de la réfraction. Vérification des deux lois de la réfraction. Réversibilité. Déplacement apparent des objets par réfraction. Réfraction atmosphérique. Passage de la lumière dans un milieu plus réfringent. Passage de la lumière dans un milieu moins réfringent. Réflexion totale, prisme à réflexion totale. Réfraction à travers une lame à faces parallèles. Réfraction à travers plusieurs lames à faces parallèles. Indices absolus. Énoncé général de la loi des sinus..... 487

Prisme. — Marche des rayons dans un prisme. Construction du rayon dévié, calcul de la déviation. Étude expérimentale de la déviation (la déviation augmente avec la réfringence du prisme, la déviation augmente avec l'angle réfringent, la déviation varie avec l'angle d'incidence, *minimum de déviation*). Mesure des indices de réfraction..... 497

Lentilles. — Axe principal. Marche des rayons parallèles à l'axe principal (lentille convergente, lentille divergente). — *Lentilles convergentes*. Foyers conjugués. Centre optique. Axes secondaires. Position du centre optique. Lentille infiniment mince. Plans focaux. Construction de l'image d'un point au moyen du foyer principal. Image d'un objet. Image d'un objet perpendiculaire à l'axe principal. Position et grandeur de l'image (droite réelle de l'infini au foyer, droite réelle entre le foyer et la lentille, droite virtuelle au delà de la lentille.) Formule générale. Discussion de la formule générale. Distances comptées à partir des foyers. Vérifications expérimentales. Détermination de la distance focale d'une lentille convergente. — *Lentilles divergentes*. Foyers conjugués. Centre optique. Position du centre optique. Axes secondaires. Plans focaux. Foyer conjugué d'un point situé en dehors de l'axe principal. Droite perpendiculaire à l'axe principal. Position et grandeur des images (droite réelle située en avant de la lentille, droite virtuelle située au delà de la lentille). Formule générale. Discussion de la formule générale. — Puissance d'une lentille. Lentilles juxtaposées. — Mesure de la distance focale d'une lentille divergente. Aberrations de sphéricité. Lentilles des phares.... 504

Dispersion. — *Décomposition de la lumière blanche*. Dispersion de la lumière. Spectre, spectre virtuel. Nombre des couleurs du spectre. Les couleurs du spectre sont simples et inégalement réfrangibles. Expérience des prismes croisés. Décomposition de la lumière par une lentille convergente. Influence de la nature et de l'angle du prisme sur la dispersion. — *Recomposition de la lumière blanche*. Recomposition par un prisme. Recomposition par une lentille convergente ou par un miroir concave. Recomposition par la superposition des effets physiologiques. — *Classification des couleurs*. Couleurs simples. Couleurs composées. Couleurs complémentaires. Couleurs des corps (coloration par transparence, coloration par diffusion). — *Spectres des sources lumineuses*. Production d'un spectre pur. Raies du spectre solaire. Propriétés lumineuses, calorifiques et chimiques du spectre solaire. Spectroscope. Différents types de spectres (spectres continus sans raies, spectres continus sillonnés de raies noires, spectres discontinus). Raies métalliques. Analyse spectrale. — *Spectres d'absorption*. Absorption dans le spectre lumineux (spectre d'absorption d'une substance incolore, spectre d'absorption d'une substance colorée, corps monochromatiques). Absorption dans les spectres infra-rouge et ultra violet. Absorption par les vapeurs métalliques. Origine des raies du

spectre solaire. Raies telluriques. Phosphorescence, fluorescence. — *Lentilles achromatiques*. — *Mouvement vibratoire lumineux*. Intensité, couleur. Longueur d'onde. Vitesse de propagation dans les différents corps. Valeur théorique de l'indice de réfraction. Construction d'Huygens. Spectre normal. Dispersion anormale..... 533

Vision. — Description de l'œil. Rôle optique de l'œil. Œil réduit. Image rétinienne. Distance de la vision distincte. Mécanisme de l'accommodation. Distance minimum de la vision distincte (Emmétropie, Amétropie, Presbytie). Astigmatisme. Correction des amétropies. Besicles (Correction de la myopie, correction de l'hypermétropie). Correction de l'astigmatisme. Correction de la presbytie. Evaluation des distances. Appréciation du relief (stéréoscope). Persistance des impressions sur la rétine..... 561

Instruments d'optique. — Chambre noire. Appareil de projection. Microscope solaire. — *Loupe*. Position de l'objet, marche des rayons dans la loupe, mise au point, puissance d'une loupe, grossissement d'une loupe, achromatisme de la loupe. Microscope simple. — *Microscope composé*. Construction des images, marche des rayons dans le microscope, mise au point, puissance d'un microscope, mesure expérimentale de la puissance d'un microscope, grossissement du microscope, détermination de la grandeur d'un objet, champ du microscope, cercle oculaire. — *Lunette astronomique*. Construction des images, marche des rayons, mise au point. Grossissement de la lunette astronomique, mesure expérimentale du grossissement, expression pratique du grossissement. Champ. Réticule, axe optique. Chercheur. Position de l'œil. — Lunettes viseurs. — Lunette terrestre. Oculaires. — Lunette de Galilée, construction des images, marche des rayons, mise au point, grossissement, cercle oculaire, absence de réticule. — *Télescope de Newton*, construction des images, marche des rayons, mise au point, grossissement, cercle oculaire, champ. Avantages des télescopes. Télégraphie optique..... 573

Photographie. — Principe de la photographie. Opérations photographiques. Appareil photographique. — *Epreuve négative sur verre*. Mise au point, pose, développement de l'image, fixage, cliché négatif. — *Epreuves positives sur papier*..... 599

Historique. — Vitesse de la lumière, réflexion, réfraction, instruments d'optique, dispersion, photographie..... 603

ÉLECTRICITÉ

ÉLECTRICITÉ STATIQUE

Phénomènes généraux. — Électrisation par le frottement. Bons conducteurs et mauvais conducteurs. Isolants. Pendule électrique. Communication d'électricité par contact. Deux espèces d'électricité. Double pendule électrique. Il n'y a que deux espèces d'électricité, électricités vitrée et résineuse. Quantités d'électricité égales. Électricités positive et négative. — Développement simultané des deux électricités. — Hypothèse d'un seul fluide. — Signe de l'électricité développée. — L'électricité se porte à la surface des conducteurs. Un conducteur creux électrisé n'exerce pas d'action à l'intérieur. — *Lois des attractions et répulsions électriques*. Description de la balance de torsion. Vérification de la loi des distances. Quantités d'électricité. Comparaison des quantités d'électricité par la balance de torsion. Unité de masse électrique. — *Distribution de l'électricité*. Comparaison des densités en deux points d'un conducteur. Distribution sur un conducteur quelconque. — Mode de formation de masses électriques multiples..... 605

Influence électrique. — Champ électrique. Phénomène de l'influence électrique. Interprétation du phénomène de l'influence dans le langage des deux fluides. Communication du corps influencé avec le sol. — Diélectriques. Explication de l'attraction des corps légers (corps léger à l'état neutre; corps léger conducteur, non isolé; corps léger mauvais conducteur; corps léger électrisé). — *Electroscopes*. Pendule électrique. Electroscopie à feuilles d'or. Action d'un corps électrisé sur un électroscope. Usage de l'électroscope pour reconnaître le signe de l'électricité d'un corps. Graduation d'un électroscope. — *Influence à l'intérieur d'un conducteur fermé*. Théorème de Faraday. Une enveloppe conductrice entourant des masses électrisées supprime leur action à l'extérieur. Une enveloppe conductrice entourant des masses électrisées les protège contre les actions extérieures. Applications du théorème de Faraday. Action extérieure d'une couche sphérique uniforme. — *Déperdition de l'électricité*. Pression électrostatique. Rôle des pointes : corps électrisé terminé en pointe, pointe présentée à un corps électrisé. Explication par la pression électrostatique des attractions et des répulsions des conducteurs électrisés. Étincelle. Conservation de l'électricité. Déperdition de l'électricité..... 618

Potentiel. — *Définition expérimentale du potentiel*. Conducteurs soustraits à toute influence électrique; conducteurs au même potentiel, communication de deux conducteurs au même potentiel, communication de deux conducteurs ayant des potentiels différents, choix de l'indicateur de potentiel, unité de potentiel, potentiel zéro, la transmission d'électricité entre deux conducteurs dépend de leur différence de potentiel. Conducteurs soumis à des influences électriques. Conductibilité électrique..... 636

Capacité. — Conducteur isolé, conducteur soumis à une influence. Unité de capacité, la capacité d'une sphère est mesurée par son rayon. Potentiel d'une sphère. Analogies calorifiques : potentiel et température, capacités calorifique et électrique. Analogies hydrauliques : potentiel et niveau. Partage de l'électricité entre deux conducteurs en communication lointaine, calcul du potentiel final, application à la mesure des potentiels. Mesure des capacités électriques. Comparaison des potentiels. Variations du potentiel et de la capacité dans l'influence électrique. Potentiel en un point d'un champ électrique..... 639

Énergie électrique. — Énergie d'un conducteur électrisé. Énergie potentielle d'une masse électrique q au potentiel v . Signification du potentiel d'un conducteur. Travail d'une masse électrique q passant du potentiel v_1 au potentiel v_2 . Énergie potentielle d'un conducteur électrisé isolé à charge limitée. Énergie d'un système de conducteurs électrisés. — *Unités pratiques* : quantité, potentiel, capacité, énergie..... 646

Machines électriques. — *Machines à frottement*. Machine électrique de Ramsden. Description. Fonctionnement. Charge et potentiel du conducteur. Débit. Limite de la charge. Quantité d'électricité des décharges. — Source de l'énergie électrique des collecteurs de la machine à frottement. — *Machines à influence*. — *Machine de Holtz* : description, amorcement, explication, fonctionnement régulier, débit, limite de la charge, quantité d'électricité des décharges; causes de désamorcement. — *Machine de Wimshurst*; description, potentiel maximum, débit, quantité d'électricité des décharges. Théorie du fonctionnement. Source mécanique de l'énergie électrique. Reversibilité des machines à influence. — *Électrophore*. Fonctionnement. Source mécanique de l'énergie électrique de l'électrophore..... 651

Condensateurs. — Théorie. Condensateur à plateaux. Charge du collecteur seul. Charge du collecteur avec condensation. Écartement des plateaux. Égalité des charges des deux plateaux. Force condensante. Capacité (mesure de la capacité, conditions qui font varier la capacité). Charge d'un condensateur. Rôle de la lame isolante. — Pou-

voir inducteur spécifique. — *Décharge d'un condensateur*. Décharge par contacts successifs. Décharge rapide. Étincelles résiduelles. L'électricité se porte sur la lame isolante. — *Électroscope condensateur*. Définition, usage, explication. — *Bouteille de Leyde*. Charge d'une bouteille de Leyde. Décharge par contacts successifs. Décharge rapide. Bouteille à armatures mobiles. Batteries. Condensateurs de grande capacité. Énergie d'un condensateur. — Condensateurs en cascade. — *Effets des décharges électriques*. Effets lumineux. Distance explosive. Apparences de l'étincelle. Tubes étincelants. Étincelle dans un gaz raréfié. Couleur de l'étincelle. Effets calorifiques, inflammation, échauffement. Excitateur universel. Mesure de l'énergie d'une décharge (thermomètre à air, bouteille micrométrique). Effets chimiques. Effets mécaniques. Effets physiologiques..... 686

Électricité atmosphérique. — L'atmosphère est un champ électrique. Potentiel en un point de l'atmosphère. Recherche du potentiel en un point (par un conducteur en pointe, par un écoulement d'eau). — *Électricité des orages*. Assimilation des nuages orageux à des conducteurs électrisés, électrisation d'un conducteur par l'influence d'un nuage orageux, formation des nuages électrisés positifs et négatifs. Éclairs. Tonnerre. Foudre, effets de la foudre. — *Paratonnerres*. Paratonnerre à tige. Paratonnerre à réseau..... 689

MAGNÉTISME

Aimants. — Substances magnétiques. Pendule magnétique. Pôles magnétiques. Orientation d'un barreau aimanté par la Terre. Distinction des pôles. Actions réciproques des pôles de deux aimants. Aimants brisés. Hypothèse sur la constitution des aimants. Lois des actions magnétiques. Unité de magnétisme. — *Action de la Terre sur un aimant*. L'action de la Terre sur un aimant est seulement directrice. La force isolée n'a pas de composante verticale, la force isolée n'a pas de composante horizontale. Couple directeur. Égalité des masses magnétiques nord et sud dans un aimant. Définition précise des pôles. Hypothèse sur la constitution d'un aimant quelconque. — *Aimantation par influence*. Champ magnétique. Aimantation du fer doux. Aimantation de l'acier, force coercitive. — *Méthodes d'aimantation* : Aimantation par la simple touche, aimantation par la touche séparée, aimantation par les courants. Aimantation maximum et aimantation permanente. Variations de l'aimantation avec la température. Faisceaux magnétiques. — *Diamagnétisme*. Substances paramagnétiques et diamagnétiques. 696

Magnétisme terrestre. — Direction d'un barreau aimanté par le couple terrestre. Méridien magnétique. Déclinaison. Inclinaison. Décomposition de la force magnétique terrestre. Oscillation d'un barreau aimanté. Mesure de la déclinaison, méthode du retournement. Mesure de l'inclinaison. Recherche du méridien magnétique. Variations de la déclinaison. Boussoles. Boussole marine. Variations de l'inclinaison. Intensité de la force magnétique terrestre. Aimant terrestre. Moment magnétique d'un aimant.... 707

Flux magnétique. — Lignes de force. Champ magnétique uniforme. Spectres magnétiques. — *Exemples de spectres magnétiques*. Aimant droit. Courbes magnétiques fermées. Pôle d'un aimant. Aimant/en fer à cheval. Système de deux pôles magnétiques voisins (pôles de même nom, pôles de noms contraires). — *Flux de force magnétique*. Nombre des lignes de force. Flux de force d'un pôle magnétique. Relation entre le flux de force et la force magnétique. Perméabilité magnétique. Anneau fermé. Pôle d'aimant et fer doux. Cylindre creux de fer doux entre deux pôles contraires. Conservation des aimants. Relation entre le flux de force et la position d'équilibre d'un aimant..... 717

ÉLECTRICITÉ DYNAMIQUE

Objet de l'électricité dynamique..... 726

Pile voltaïque. — Description d'un élément de pile. Charges électrostatiques aux deux pôles. Différence de potentiel aux deux pôles. Pile de plusieurs éléments. Pôle ayant l'unité de potentiel électrostatique. Courant électrique. Sens du courant. Différentes espèces de piles (Pile à colonnes, pile à auges, pile à tasses, pile de Wollaston, élément Daniell). — *Théorie de la formation d'un élément de pile.* Différence de potentiel au contact de deux métaux. Classement des métaux d'après leur signe. Loi de Volta, conséquences de la loi de Volta. Formation d'un élément de pile par l'interposition d'un liquide. Interprétation des expériences fondamentales de Volta. — *Effets du courant.* Comparaison des décharges et des courants de pile. Assimilation hydraulique..... 727

Force électromotrice, intensité, résistance. — *Mesure de la différence de potentiel d'un élément de pile.* — *Mesure de l'intensité d'un courant.* Méthode électrochimique; décomposition de l'eau par un courant, voltamètre, voltamètres en série, voltamètres parallèles, intensité. Méthode électromagnétique: action d'un courant sur l'aiguille aimantée, règle d'Ampère, multiplicateur, galvanomètre. Unité d'électricité électromagnétique. Unité de quantité d'électricité. Débit des machines électriques. — *Résistance d'un circuit.* Résistances égales, résistances multiples. Unité de résistance. Boîtes de résistance. Mesure d'une résistance. Conducteurs de même nature équivalents. Résistance spécifique. Résistance d'un conducteur quelconque. Résultats. Résistance totale d'un circuit..... 740

Loi d'Ohm. — Charges électrostatiques sur le trajet d'un courant. Différence de potentiel entre deux points d'un circuit. Loi d'Ohm pour un conducteur. Conséquences de la loi d'Ohm relative à un conducteur. Extension de la loi d'Ohm au circuit tout entier. Résumé sur la loi d'Ohm. Différence de potentiel aux deux pôles d'une pile en circuit fermé. — *Applications de la loi d'Ohm.* Groupement des éléments d'une pile (groupement en série, groupement en batterie ou en surface, groupement mixte, groupement le plus avantageux). Courants dérivés, arc double, arc multiple. Pont de Wheatstone. Détermination expérimentale d'une résistance par le pont de Wheatstone. Pont de Wheatstone hydraulique. Détermination des constantes d'une pile (mesure de la différence de potentiel, mesure de la résistance intérieure)..... 753

Effets calorifiques des courants. — Expériences de Joule. Résultats. Travail développé dans un circuit entier. Analogie hydraulique. Distribution relative de la chaleur dans un circuit. Chaleur perdue dans la pile. Travail maximum. Applications des effets calorifiques du courant..... 768

Effets chimiques des courants. — Décomposition de l'eau. Décomposition des composés binaires métalliques. Décomposition des sels oxygénés. Mécanisme général de l'électrolyse. Théorie de Grotthus. — *Lois de l'électrolyse.* Poids d'hydrogène ou de métal séparé par un coulomb. Mesure de l'intensité d'un courant en ampères. Effets chimiques à l'intérieur de la pile. — *Actions secondaires.* — *Polarisation des électrodes.* Calcul d'une force électromotrice de polarisation; résistance d'une solution saline.... 773

Applications de l'électrolyse. — Préparation des métaux alcalins, décomposition de la potasse. Galvanoplastie; préparation d'un moule, dépôt de cuivre sur le moule. Appareil simple. Applications industrielles de la galvanoplastie. Dorure, argenture, nickelage. Electrometallurgie. Affinage du cuivre. — *Construction des éléments de*

Pile. Zinc amalgamé. Affaiblissement du courant d'un élément de Volta. Dépolarisation de la plaque positive. Piles à un liquide à dépolarisants chimiques (élément au bichromate de potasse, élément Leclanché). Piles constantes à deux liquides séparés (élément Daniell, élément Bunsen). — *Origine de l'énergie électrique d'une pile.* Rôle industriel d'une pile. Comparaison d'une pile et d'une machine à vapeur. Calcul de la force électromotrice d'un élément de pile. — *Piles secondaires.* Pile à gaz. Accumulateurs. Mode de fonctionnement d'un accumulateur,..... 782

Piles thermoélectriques. — Expérience de Seebeck. Pile thermoélectrique. Lois des forces électromotrices. Phénomène de l'inversion. — *Mesure des températures.* Thermomultiplicateur. Pince thermoélectrique. Aiguilles thermoélectriques. Pyromètre électrique. — Piles thermoélectriques industrielles. Source de l'énergie électrique d'une pile thermoélectrique. Calcul expérimental du rendement..... 796

Électromagnétisme. — Expérience d'Ersted. Champ magnétique d'un courant. Spectre magnétique d'un courant rectiligne. Spectre magnétique d'un circuit plan. — *Théorème d'Ampère.* Équivalence d'un circuit et d'un feuillet magnétique. Support des courants mobiles. Action de la Terre sur un cadre traversé par un courant. Systèmes astatiques. Action d'un barreau aimanté sur un cadre. Solénoïdes. Spectre d'un solénoïde. Orientation d'un solénoïde. Action d'un aimant sur un solénoïde. Électrodynamomètre. Action de deux solénoïdes. Relation entre le flux de force et la position d'équilibre d'un circuit..... 803

Électrodynamique. — Expérience des courants parallèles, expérience des courants angulaires, expérience des courants sinueux. Action d'un courant horizontal et indéfini (orientation d'un conducteur vertical fini; rotation d'un courant horizontal fini, mobile autour d'un axe vertical; orientation d'un courant rectangulaire fermé). Actions exercées par la Terre (orientation d'un courant vertical mobile autour d'un axe qui lui est parallèle, rotation d'un courant horizontal, orientation d'un courant rectangulaire vertical, orientation d'un courant circulaire vertical). Solénoïdes. Action de la Terre sur un solénoïde. Actions mutuelles de deux solénoïdes. Action d'un courant rectiligne sur un solénoïde. Actions mutuelles d'un aimant et d'un solénoïde. Assimilation des aimants aux solénoïdes. Action extérieure d'un aimant ou d'un faisceau de solénoïdes. Rotation d'un aimant par un courant. Rotation d'un courant par un aimant..... 812

Galvanomètres. — Multiplicateur. Aimant astatique (aimant compensateur, système astatique). Galvanomètre de Nobili (description, observation, lecture par réflexion, amortissement, emploi des dérivations). Galvanomètre à deux cadres. Galvanomètre de Deprez et d'Arsonval. Boussole des tangentes. Ampèremètres. Voltmètres..... 823

Unités électromagnétiques. — Unité de magnétisme. Unité de quantité. Unité de force électromotrice. Unité de résistance. Unité de capacité..... 837

Aimantation par les courants. — Aimantation de l'acier, points conséquents. Aimantation du fer doux. Electroaimants. Magnétisme rémanent. Lois des électroaimants. Flux de force d'un électroaimant. Perméabilité magnétique. Comparaison d'un solénoïde et d'un aimant creux. Circuit magnétique. Différence entre un aimant et un électroaimant. — *Applications des électroaimants.* Sonnerie électrique à trembleur. Télégraphie électrique (pile, fil de ligne, manipulateur de Morse, récepteur de Morse, signes, communication par un seul fil, installation des postes télégraphiques, câbles souterrains et sous-marins, transmetteur multiple)..... 840

Induction. — *Induction par les courants* (par fermeture ou ouverture, par accroissement ou diminution d'intensité, par approche ou éloignement). — *Induction par les aimants* (par approche ou éloignement, par aimantation ou désaimantation, par varia-

tion d'un aimant. — *Induction d'un courant sur son circuit*. Extracourants de fermeture et d'ouverture. Effets de l'extracourant d'ouverture. Expériences de self-induction. — *Effets des courants induits*. Inductions d'ordres successifs. — *Loi de Lenz*. Source de l'énergie électrique d'un courant induit. Courants d'induction dans les masses métalliques (expérience de Foucault). Amortissement des oscillations d'une aiguille aimantée. — *Lois de l'induction* Conditions de production des courants induits. Sens des courants induits. Induction par la Terre. Valeur de la force électromotrice induite. Résumé des phénomènes d'induction. — *Bobine d'induction ou bobine de Ruhmkorff*. Description, fonctionnement, propriétés des courants d'ouverture et de fermeture, pôles positif et négatif d'une bobine d'induction. Description des divers organes. Interrupteurs (interrupteur à marteau, interrupteur à trembleur, interrupteur de Foucault, interrupteur de Wehnelt). Condensateur. Cloisonnement de la bobine induite. Usages de la bobine d'induction. Charge d'une bouteille de Leyde ou d'une batterie. Phénomènes lumineux : tubes de Geissler, tubes de Crookes, rayons X). Transformateurs. — *Téléphones*. Téléphone magnétique. Téléphone à pile (microphone, transmetteur Ader, emploi d'une bobine d'induction)..... 852

Machines d'induction. — Machine de Gramme. Fonctionnement. Lignes de forces du champ magnétique inducteur. Courants induits dans une spire. Courant induit total. Captage du courant par le collecteur. Ligne neutre. Calcul de la force électromotrice. Calcul de l'énergie électrique utilisable. Courants de Foucault. Machines industrielles (autoexcitation des machines à courants continus, nombre de spires de l'anneau). — *Moteurs électriques*. Réversibilité de la machine de Gramme. Sens de la rotation. Avantages des moteurs électriques. Rendement d'un moteur électrique. — *Machines à courants alternatifs*. Machine de Siemens (description, fonctionnement, calcul de la force électromotrice moyenne d'induction). Machine de Clarke (description, fonctionnement, redressement des courants)..... 883

Effets lumineux des courants. — Étincelle de fermeture, étincelle de rupture. Arc voltaïque. — *Éclairage électrique*. Éclairage par l'arc voltaïque, travail dépensé dans l'arc, bougies électriques. Éclairage par incandescence, travail dépensé dans une lampe, association des lampes en dérivation. Usage des transformateurs dans l'éclairage électrique..... 901

Effets physiologiques des courants. — *Action des courants continus* : Commotion au contact des deux pôles d'une pile, effets sur les nerfs sensibles et sur les nerfs moteurs, effets sur les nerfs de sensibilité spéciale. Phénomènes qui accompagnent le passage d'un courant continu. Expérience de Galvani. — *Action des courants induits* (faradisation sèche, faradisation humide, choix du fil induit)..... 908

ÉLECTRICITÉ RAYONNANTE

Décharge oscillante d'un condensateur. Production de courants de haute fréquence. Propriétés des courants de haute fréquence. Vibrations électriques. Radioconducteurs. Télégraphie hertzienne sans fil. Effets physiologiques des courants de haute fréquence. 912

Historique. — Électricité statique. Magnétisme. Électricité dynamique : phénomènes généraux, applications. Importance en électricité du principe de la conservation de l'énergie. Électricité rayonnante..... 919

Physiciens cités dans l'ouvrage..... 923