

# NOTIONS DE PHYSIQUE

A L'USAGE

DES ÉCOLES PRIMAIRES SUPÉRIEURES

OUVRAGE RÉDIGÉ

CONFORMÉMENT AUX PROGRAMMES OFFICIELS DE 1893

ET OPÉ

de 283 figures intercalées dans le texte

PAR

M. E. GRIPON

PROFESSEUR A L'ÉCOLE NATIONALE DES SCIENCES DE RENNES

DIXIÈME ÉDITION



PARIS

LIBRAIRIE CLASSIQUE <sup>MAISON FONDÉE EN 1822</sup> BELIN  
BELIN FRÈRES

RUE DE VAUGRAFF, 52

1906







NOTIONS  
DE PHYSIQUE



# NOTIONS DE PHYSIQUE

A L'USAGE

DES ÉCOLES PRIMAIRES SUPÉRIEURES

OUVRAGE RÉDIGÉ

CONFORMÉMENT AUX PROGRAMMES OFFICIELS DE 1893

ET ORNÉ

de 283 figures intercalées dans le texte

PAR

M. E. GRIPON

PROFESSEUR A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE RENNES

DIXIÈME ÉDITION



PARIS

LIBRAIRIE CLASSIQUE EUGÈNE BELIN  
BELIN FRÈRES

RUE DE VAUGIRARD, 52

—  
1906

Tout exemplaire de cet ouvrage non revêtu de notre griffe sera réputé contrefait.

*Belin frères*



---

SAINT-CLOUD. — IMPRIMERIE BELIN FRÈRES.

## AVANT-PROPOS

---

Ces *Notions de Physique* ont été rédigées conformément au programme officiel du 21 janvier 1893.

Nous n'avons pas cherché à étendre ce programme, tout en traitant certains points qui n'étaient pas spécialement indiqués, mais qui rentraient naturellement dans une étude sommaire de la Physique.

Nous nous sommes attachés à donner des explications suffisantes des phénomènes généraux que les élèves doivent connaître; ce n'est qu'un acheminement à une étude plus sérieuse et plus complète. Mais, à notre avis, il vaut mieux apprendre moins au début et savoir mieux. Nous avons donc été sobres de développements intéressants ou curieux, qui auraient pu charger inutilement la mémoire des élèves.

Pour mieux faire comprendre le sens et l'utilité des lois ou des règles énoncées dans le cours, nous avons indiqué les calculs qui s'y rapportent et que comprendront, sans difficulté, des élèves déjà rompus aux questions d'arithmétique, par leur instruction première.

Nous avons, sous forme d'exercices, donné un certain nombre de questions qui se résolvent à l'aide de ces calculs. Le programme officiel répartit en trois années distinctes l'étude générale de la Physique. Nous avons

suivi l'ordre indiqué. Mais il y aurait intérêt, si le temps le permet, de reviser, sommairement, en troisième année, les connaissances acquises dans les deux premières, en les groupant dans un ordre logique.

Une table insérée à la fin du volume indique quels sont les divers chapitres qui, éparpillés dans ce volume, se rapportent à chacune des parties principales de la Physique.

---

# COURS DE PREMIÈRE ANNÉE

---

## LIVRE PREMIER

### CHALEUR

---

#### CHAPITRE PREMIER

##### Dilatation des corps. — Température.

Nous savons dès l'enfance distinguer les corps *chauds* des corps *froids*. L'air froid de l'hiver nous fait grelotter, nous nous réfugions avec plaisir dans une salle modérément chauffée; une trop forte chaleur nous incommode et le contact d'un charbon rouge nous cause une vive douleur.

C'est un fait constant que le même corps, une barre de fer, par exemple, peut être brûlante, si on la retire d'un feu de forge; et plus tard très froide, si on l'expose à l'air par un temps de gelée. Elle emmagasine la chaleur dans la forge; elle la perd ensuite dans l'air froid. Ce sont des expressions que l'on emploie souvent, pour dire qu'un corps s'échauffe ou se refroidit; car nous ne savons pas ce que c'est que la chaleur, et, si elle entre dans un corps et en sort comme nous voyons l'eau entrer dans le sable et s'en écouler.

Nous reconnaissons au contact si un corps est plus ou moins chaud, du moins entre certaines limites, puisqu'on ne peut toucher impunément un corps très chaud ou un corps très froid. Voyons si nous ne pourrions pas trouver quelques autres propriétés qui les distinguent.

**Dilatation des corps.** — *Un corps, quel que soit son*

*état solide, liquide ou gazeux, augmente de volume, si on le chauffe; ce volume diminue, si on le refroidit.*

Les expériences suivantes, choisies parmi les plus faciles à réaliser, vont justifier notre énoncé.

**Dilatation des corps gazeux.** — Nous choisissons d'abord les gaz dont la dilatation est plus grande et plus facile à constater.

Un petit ballon A (*fig. 1*), plein d'air, est fermé par un bouchon que traverse un tube *abc*, courbé en S. Ce tube est

renflé en boule sur la tige du milieu, et un entonnoir *a* le termine. Il renferme un peu d'eau colorée; elle remplit à peu près la boule et aussi la partie courbe du tube *b*; les niveaux du liquide sont à la même hauteur dans la boule et dans le tube, ce qui indique que l'eau est également pressée par l'air intérieur et par l'atmosphère.

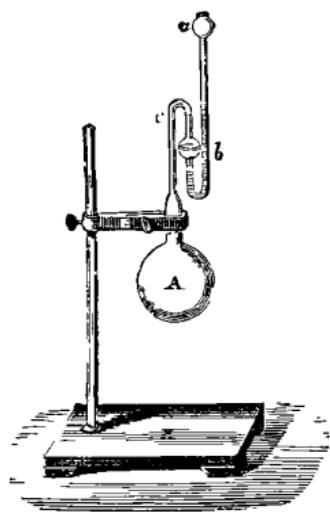


Fig. 1. — Dilatation des gaz.

Il suffit d'échauffer le ballon A avec la main pour voir le liquide passer de la boule dans l'entonnoir *a*. Ce qui prouve que le gaz prend un plus grand volume lorsqu'on le chauffe, et aussi, que sa pression sur

la surface intérieure de l'eau est plus forte que celle de l'air atmosphérique sur la surface extérieure. Si on chauffe plus fortement, le niveau intérieur atteint la courbure inférieure du tube; des bulles d'air traversent le liquide et s'échappent dans l'atmosphère. Le ballon renferme donc un volume d'air chaud qui pèse moins que l'air froid qu'il contenait tout d'abord.

Si on cesse de chauffer, le ballon se refroidit. L'air intérieur ne peut plus le remplir, en conservant sa force de tension qui repoussait le liquide dans l'entonnoir; la pression atmosphérique refoule alors ce liquide dans la boule et les bulles d'air rentrent dans le ballon, en traversant de nouveau

le liquide de dehors en dedans. Lorsque le refroidissement est complet, il y a dans le ballon tout autant d'air qu'au début de l'expérience.

**Dilatation des liquides.** — Nous prenons un appareil semblable à celui qui vient de nous servir. Mais nous remplissons le ballon *b* et une partie du tube droit *t* (*fig. 2*) qui le surmonte avec un liquide, de l'eau colorée par exemple. Le niveau *a* du liquide dans le tube est marqué à l'aide d'un petit papier portant un trait d'encre horizontal.

On chauffe modérément le ballon à l'aide d'une flamme, ou bien on le plonge dans un bain d'eau tiède; le niveau monte dans le tube au-dessus du point *a*; le liquide intérieur, échauffé par l'eau tiède, s'est donc dilaté.

On porte le ballon dans un second vase plein d'eau très froide, le niveau s'abaisse dans le tube au-dessous du point *a*: le liquide intérieur a diminué de volume en se refroidissant. On replace dans l'air le ballon qu'on a essuyé; il redevient aussi chaud que l'air extérieur et reprend son volume primitif, le niveau revient au point *a*.

A égalité de volume, la dilatation d'un liquide est plus faible que celle d'un gaz. On le reconnaît, en les maintenant l'un et l'autre en contact avec l'air froid, et en les plongeant ensuite dans le même vase plein d'eau chaude.

**Dilatation des corps solides.** — La dilatation d'un corps solide est encore moins sensible que celle d'un liquide.

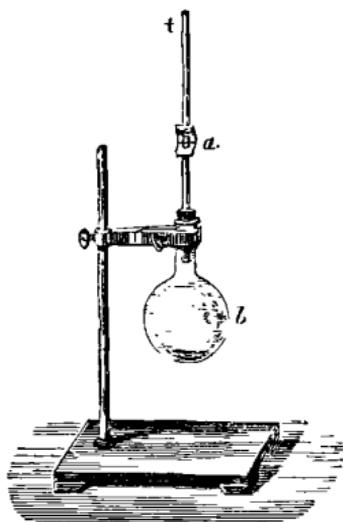


Fig. 2. — Dilatation des solides.

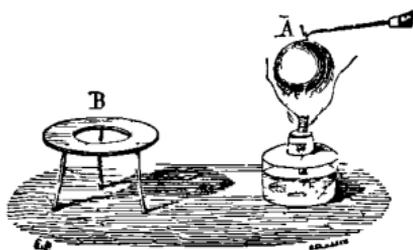


Fig. 3. — Dilatation d'un boulet de fer.

1° On a pratiqué dans une plaque de tôle B (*fig. 3*) une ouverture circulaire dont le diamètre est le même que celui d'un boulet de fer A. Celui-ci entre librement dans l'ouverture, lorsqu'il est froid. Il n'en est plus de même si on le chauffe fortement à l'aide d'une flamme. Si on le pose alors sur le petit trépied B, la tôle le soutient et il ne tombe que lorsqu'il est redevenu froid. On conclut de cette expérience que le diamètre et par suite le volume du boulet augmentent par échauffement; le refroidissement les diminue.

2° Une barre métallique (*fig. 4*) se place, lorsqu'elle est froide, entre deux butoirs A, B fixés sur une planchette. On la chauffe; il est impossible de la remettre en place; elle



Fig. 4. — Dilatation d'une barre.

s'est allongée par suite de l'échauffement. Il faut la laisser refroidir pour qu'elle reprenne ses dimensions primitives.

3° Une tige métallique AB (*fig. 5*) est serrée par une vis

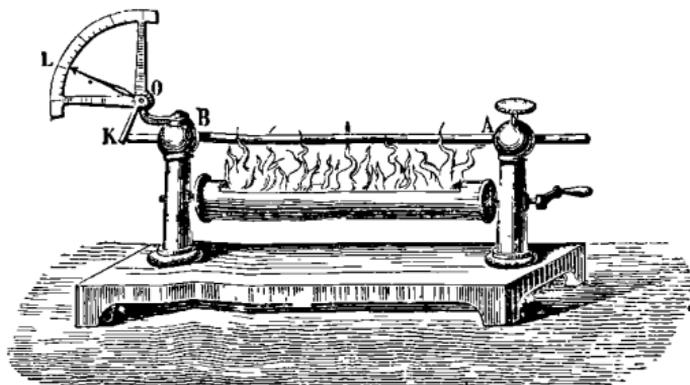


Fig. 5. — Dilatation d'une barre.

dans son support A; elle traverse librement le support B. Son extrémité K s'appuie sur une pièce de cuivre LOK qui peut tourner autour du point O. Lorsque la petite branche OK est verticale et en contact avec la tige AB, la longue branche OL est horizontale. Elle peut en se déplaçant parcourir, comme une aiguille d'horloge, un arc divisé. On chauffe la tige AB en promenant au-dessous une mèche de coton imprégnée

d'alcool que l'on enflamme. Cette mèche est, sur la figure, renfermée dans un petit vase placé au-dessous de AB.

La barre chauffée se dilate ; comme elle ne peut se mouvoir du côté A, l'allongement se fait du côté K ; la petite branche OK de l'aiguille se déplace de droite à gauche et la grande branche OL s'élève sur l'arc divisé, ce qui rend manifeste la dilatation de la tige.

Comme nous l'avons déjà dit, le métal reprend en se refroidissant sa longueur primitive ; ce que l'on constate en voyant alors l'aiguille redescendre et redevenir horizontale.

**Applications.** — Lorsqu'un charron a façonné la roue en bois d'une voiture, il l'entoure d'un cercle de fer dont le diamètre est un peu plus petit que celui de la roue. Il chauffe le cercle pour en augmenter le diamètre et il peut alors le mettre en place. Le métal se contracte par refroidissement ; il exerce sur le bois une forte compression qui assure la solidité de la roue.

On doit, dans une construction métallique, laisser un certain jeu entre les différentes pièces qui la composent ; elles peuvent alors se dilater pendant les chaleurs de l'été, se contracter dans les jours froids, et, cela, sans se déformer. Par exemple, si une terrasse est couverte de feuilles de zinc fixées sur les bords de la charpente par des clous, on verra le zinc se gondoler pendant l'été et redevenir plan ou se fendre pendant l'hiver par suite des dilatations et des contractions qu'il éprouve.

Un verre de lampe échauffé par la flamme se brise, si on l'expose à un courant d'air froid. Les parties refroidies se contractent ; elles ne sont pas suivies par celles qui restent chaudes, ce qui détermine la rupture du verre.

**Température.** — Il est bien peu d'écoliers qui n'aient vu un thermomètre et qui ne sachent que l'on consulte ce petit appareil pour connaître la *température* de l'air. C'est le mot de température qu'il faut expliquer.

La partie essentielle d'un thermomètre est un petit tube très étroit, renflé en boule ou en cylindre à sa partie infé-

rière et renfermant un liquide qui est tantôt du mercure, tantôt de l'alcool coloré en rouge (*fig. 9*). Prenons le thermomètre à mercure, et plongeons-le dans un vase plein d'eau tiède. Le mercure se dilate, son niveau s'élève dans le tube et finit par s'arrêter en un point que nous marquons. A ce moment, le liquide ne s'échauffe ni se refroidit, il ne prend plus de chaleur à l'eau, il ne lui en cède plus : il est aussi chaud qu'elle, expression que nous précisons en disant que le mercure et l'eau ont même *température*, ou sont en *équilibre de température*. Portons alors le thermomètre dans un second vase plein d'eau. Si, après ce transport, le niveau du mercure n'a pas changé, nous en concluons que les deux masses d'eau sont à la même température.

Si le niveau s'est élevé pour atteindre une nouvelle position fixe, la température du second vase est dite plus *haute* que celle du premier. Elle serait plus *basse*, si, en passant de l'un à l'autre, le niveau s'était abaissé dans le tube.

**Thermomètre.** — Pour comparer entre elles les diverses températures, on admet que des différences égales de températures correspondent à des accroissements égaux du volume d'un certain poids de mercure. Par exemple, on entoure le tube thermométrique de glace fondante et on marque la position qu'occupe sur le tube le niveau du mercure lorsqu'il a pris la température de la glace. On plonge alors le tube dans l'eau bouillante, le mercure se dilate beaucoup, puis s'arrête, et on marque sa nouvelle position. Mesurez sur le tube la distance des deux points ainsi déterminés, et divisez-la en cent parties égales. Chaque fois que le niveau du mercure s'élève d'une division à la suivante, sa température s'élève d'une même quantité qu'on appelle *degré centigrade*. Cette variation de la température est considérée comme la centième partie de la différence qui existe entre les températures de la glace fondante et de l'eau bouillante. Elle correspond à une dilatation de la masse de mercure renfermée dans le thermomètre, qui est la centième partie de l'augmentation de volume que subit cette masse en passant de la première température à la seconde.

Comme on le voit, on ne définit et on ne mesure que des différences de températures, et le point de départ est la température de la glace fondante que l'on appelle pour cela *zéro*. Ce qui ne veut pas dire du tout que cette température soit nulle. De même, lorsqu'on dit que la température de l'air est 25, tandis que celle de l'eau bouillante est 100, on exprime simplement, qu'en prenant les différences de ces températures et de celle de la glace, la première est le *quart* de la seconde.

**Construction d'un thermomètre.** — On n'a pas à construire des thermomètres; on les trouve à bon marché dans le commerce.

Ils ne renferment qu'un poids de mercure assez faible pour pouvoir se mettre promptement en équilibre avec les corps dont on veut mesurer la température. Pour rendre sensible la dilatation de cette faible masse de liquide, on l'observe dans un tube de verre percé d'un canal très étroit, ce qu'on appelle un tube *capillaire*.

Il faut recourir à un procédé particulier pour remplir de liquide le réservoir et une partie du tube. Les opérations que nous allons indiquer se font rapidement avec l'alcool; elles sont moins faciles avec le mercure. C'est ce dernier liquide que nous prendrons comme exemple.

Nous admettrons qu'on ait à sa disposition un tube à thermomètre vide, composé d'un tube capillaire à l'extrémité duquel on a soufflé un réservoir cylindrique *a*; l'autre extrémité est soudée à un tube plus large *b* (*fig. 6*) qui sert d'entonnoir.

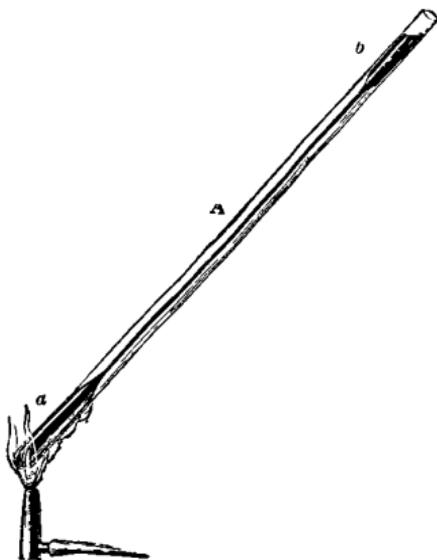


Fig. 6. — Construction d'un thermomètre.

On le remplit de mercure. Ce liquide descend par son propre poids dans le tube, mais l'air intérieur, qui ne peut s'échapper, l'arrête et l'empêche d'arriver jusqu'au réservoir. Il faut faire sortir cet air.

On chauffe le réservoir *a* au-dessus d'une flamme : l'air intérieur se dilate, et exerce sur le mercure une pression supérieure à celle de l'atmosphère ; il refoule le liquide dans l'entonnoir et se dégage sous forme de bulles qui traversent le mercure.

On cesse de chauffer ; l'air qui est resté dans l'appareil se refroidit, il perd sa force de ressort et la pression extérieure pousse le mercure dans le réservoir. Il y remplace le volume d'air qui en est sorti. On peut recommencer cette opération et on arrive à remplir presque complètement le réservoir de mercure.

Pour chasser les dernières parties d'air, on chauffe à la fois le réservoir *a*, le tube et l'entonnoir *b*. Le mercure du réservoir entre en ébullition, ses vapeurs se dégagent au travers du mercure de l'entonnoir, elles entraînent avec elles l'air intérieur.

Lorsqu'on cesse de chauffer, l'appareil se refroidit, les vapeurs de mercure se condensent ; le vide se fait dans le réservoir et la pression atmosphérique intervient de nouveau pour y faire descendre le mercure. On a eu soin de chauffer celui-ci ; s'il était froid, il déterminerait par son contact la rupture du tube qui est à une température élevée.

On laisse le thermomètre se refroidir complètement. On le chauffe de nouveau à une température qui dépasse la plus haute de celles qu'il doit mesurer, et on rejette l'excès de liquide qui se trouve dans l'entonnoir ; puis on ferme le tube en le soudant à l'aide d'une flamme, alors que le liquide remplit encore la majeure partie du tube.

**Graduation.** — Il faut maintenant graduer le thermomètre, c'est-à-dire, marquer sur la tige les positions que prend le niveau du mercure lorsque l'appareil est entouré de glace fondante, ou lorsqu'il a la température de l'eau bouil-

lante. On a choisi ces deux températures parce qu'elles sont toujours les mêmes et faciles à reproduire.

**Détermination du zéro.** —

Le tube thermométrique est placé dans un vase A (*fig. 7*). Son réservoir et une partie de la tige sont entourés de glace pilée, humide; le vase, de forme quelconque, est percé à sa partie inférieure et l'eau provenant de la fusion de la glace s'écoule au dehors. Le niveau du mercure baisse, puis s'arrête en un point qu'il ne quitte plus tant qu'il y a de la glace en fusion. Ce qui nous démontre que la température de fusion de la glace est invariable. On marque ce niveau sur le tube à l'aide d'un fil serré fortement sur la tige.

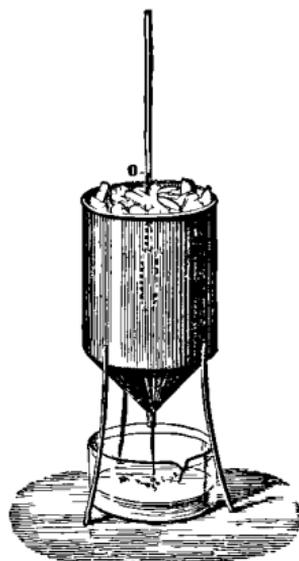


Fig. 7.  
Détermination du zéro.

**Détermination du centième degré.** — Le thermomètre est placé dans un ballon de verre renfermant de l'eau *a* (*fig. 8*). Sa tige traverse un bouchon qui ferme imparfaitement le ballon. L'eau est portée à l'ébullition, et la vapeur se dégage librement au dehors. Le mercure prend la température de la vapeur, elle est invariable et la même que celle de l'eau : son niveau parvenu à un certain point y reste indéfiniment, tant que l'eau est en ébullition. Il correspond au centième degré du thermomètre.

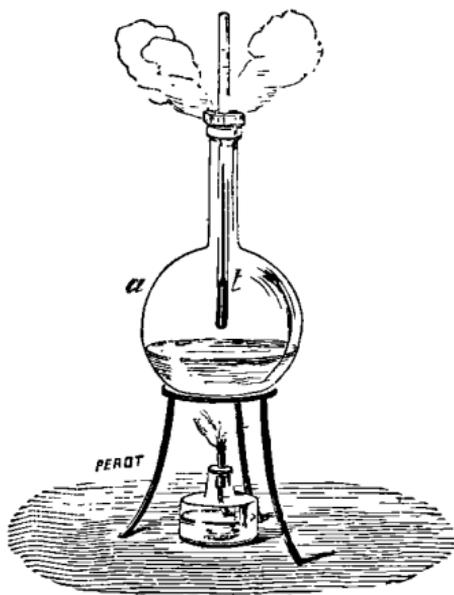


Fig. 8. — Détermination du centième degré.

La portion de la tige comprise entre les deux points fixes, ainsi déterminés, est divisée en cent parties égales. On prolonge la division en degrés au-dessus du point *cent* et au-dessous du point *zéro* (*fig. 9*).

Ces divisions sont gravées sur le verre dans les thermomètres construits avec soin. Dans les appareils de commerce, ils sont tracés sur une bande de papier renfermée dans un tube de verre soudé à la tige du thermomètre (*fig. 10*).

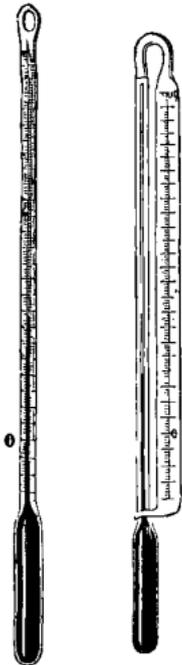


Fig. 9. Fig. 10.  
Thermomètres.

Les thermomètres usuels qui servent à déterminer la température de l'air ne marquent pas les températures supérieures à 50° au-dessus de zéro, et inférieures à 20° au-dessous.

Pour ceux-ci, on détermine la position du zéro, comme nous l'avons dit plus haut, puis on plonge le thermomètre que l'on veut graduer dans un vase plein d'eau chaude, à côté d'un thermomètre déjà gradué; celui-ci donne la température de l'eau; supposons-la de 40°. On marque le niveau du mercure, lorsqu'il est stationnaire, et on partage en quarante parties égales la distance qui le sépare du zéro.

On emploie le même procédé pour graduer les thermomètres à alcool. Ce liquide est en ébullition à 80°, et l'appareil ne peut être placé dans l'eau bouillante; ce qui ne permet pas de déterminer le point *cent* de l'échelle thermométrique.

Les thermomètres ainsi gradués donnent des indications comparables entre elles, c'est-à-dire le même nombre de degrés pour une même température.

Il faut cependant profiter des temps de gelées pour entourer le thermomètre de glace fondante et vérifier la position du zéro de l'échelle; car on a remarqué qu'il change de place avec le temps. Si, dans une de ces vérifications, le niveau du mercure entouré de glace s'arrête à la division

1° au-dessus de zéro, il faudra diminuer d'une unité toutes les températures observées au-dessus de zéro et augmenter d'une unité celles qui sont au-dessous.

Deux échelles divisées partent du zéro, l'une au-dessus, l'autre au-dessous, portant les mêmes chiffres; on les distingue dans l'écriture, en plaçant le signe + devant les premières, et — devant les secondes. Le mercure se solidifie à — 40°, il bout à + 360°. C'est entre ces températures limites que l'on peut se servir du thermomètre à mercure.

Les physiiciens ont recours à des appareils plus compliqués, fondés sur la dilatation de l'air ou de l'hydrogène, pour évaluer de très hautes et de très basses températures.

On trouve parfois, sur les planchettes des thermomètres, deux graduations; l'une, *centigrade*, est la bonne. Il faut négliger l'autre, dite de Réaumur, dans laquelle l'intervalle de température pris entre la glace fondante et l'eau bouillante est divisé non plus en 100°, mais en 80°; un degré Réaumur vaut les  $\frac{5}{4}$  d'un degré centigrade. Les Anglais et les Américains marquent 32° pour la température de la glace fondante, et 212° pour celle de l'eau bouillante. Leur degré est les  $\frac{5}{9}$  du nôtre. C'est la graduation de Fahrenheit.

Une température de 59°, observée à Londres, équivaut à 59—32 ou 27° Fahr. au-dessus de la température de la glace fondante, et à 27° Fahr.  $\times \frac{5}{9}$  ou 15° centigrades.

**Mesure de la température de l'air.** — On observe le plus souvent le thermomètre pour connaître la température de l'air.

Elle est essentiellement variable, même dans une journée de vingt-quatre heures. On la trouve la plus basse possible un peu avant le lever du soleil. Elle s'élève graduellement jusqu'à deux ou trois heures de l'après-midi; puis elle décroît graduellement jusqu'au lendemain matin.

Si on observait le thermomètre d'heure en heure, on aurait vingt-quatre nombres différents. Leur moyenne arithmétique serait la *température moyenne* de la journée, qu'il est intéressant de connaître; elle varie dans le même

lieu avec les saisons; et, pour la même date, elle varie d'un lieu à l'autre.

On en a une valeur approchée, en observant chaque jour la plus haute température et la plus basse, et en calculant la moyenne arithmétique de ces deux nombres.

Les appareils qui donnent ces températures extrêmes, portent le nom de thermomètres à *maxima* et à *minima*.

**Thermomètre à maxima.** — Le thermomètre de Negretti que nous choisissons est rempli de mercure. Sa tige est maintenue horizontale; elle est étranglée en *a* (fig. 11), à l'entrée du réservoir. Le mercure se dilate, lorsque la température s'élève; il pénètre dans la tige, en formant une colonne continue. Son extrémité marque sur l'échelle la plus haute température de la journée. Lorsque la température

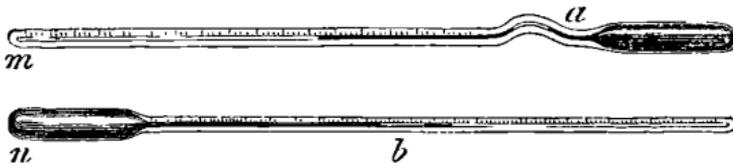


Fig. 11. — Thermomètres à maxima et à minima.

baisse, la colonne de mercure se brise à l'endroit de l'étranglement *a* et le mercure qui se trouve dans la tige reste en place. On peut donc observer, le soir, quel a été le maximum des températures de la journée. On met ensuite la tige du thermomètre verticale, et, par de légères secousses, on fait rentrer dans le réservoir une portion de la colonne de mercure restée dans la tige. L'instrument est prêt pour une nouvelle observation.

**Thermomètre à minima.** — Un thermomètre à alcool a sa tige horizontale. On a introduit dans celle-ci un fil d'émail renflé à ses extrémités *h* (fig. 11). Il est complètement plongé dans l'alcool et il sert d'*index*. On l'amène, en inclinant la tige, au contact de la surface liquide. Si la température s'abaisse, cette surface recule vers le réservoir et entraîne avec elle l'*index*. Celui-ci reste en place, si la température s'élève et fait dilater l'alcool. Il marque donc la

limite du recul de la colonne liquide, et par suite son extrémité antérieure correspond sur l'échelle à la plus basse température de la nuit. On remet chaque matin l'index en contact avec la surface de l'alcool.

Quel que soit le thermomètre que l'on observe, il faut le placer sous un abri exposé au nord, au-dessus d'un terrain gazonné, si c'est possible.

Le thermomètre ne doit jamais recevoir les rayons directs du soleil, et il faut éviter qu'il les reçoive sous forme de reflets; ce qui arriverait infailliblement, si on le plaçait à une petite distance d'un mur blanc situé au sud, ou au-dessus d'une allée sablée, exposée au soleil.

Disons, en finissant, que si l'on calcule la température moyenne de tous les jours de l'année, et si on en prend la moyenne arithmétique, on a la température moyenne de l'année. Elle varie peu d'une année à l'autre. Si on prend la moyenne d'un certain nombre d'années, on obtient un nombre constant qui représente la température moyenne du lieu où se sont faites les observations.

**Dilatation des corps.** — La notion de la température permet de compléter ce que nous avons dit de la dilatation des corps.

Supposons que nous prenions le même volume de divers corps solides, liquides ou gazeux; un décimètre cube, par exemple. Nous mesurons ce volume lorsque les corps entourés de glace fondante sont à la température de 0°. Nous faisons la même mesure, après qu'ils ont été maintenus dans de la vapeur d'eau bouillante, à la température de 100°. La différence des deux volumes donne pour chaque corps sa dilatation et toutes les dilatations sont différentes.

|                      |                |                        |
|----------------------|----------------|------------------------|
| décimètre cube d'air | s'est accru de | 366 centimètres cubes. |
| — de mercure         | —              | 18 —                   |
| — de zinc            | —              | 9 —                    |
| — de verre           | —              | 3 —                    |

La dilatation diffère donc d'un corps à l'autre, bien que le volume et l'élévation de température soient les mêmes.

Si on opère avec un même corps, *la dilatation est, pour une même élévation de température, proportionnelle à son volume*. Ce qui se comprend, puisque la dilatation de chaque unité de volume est la même.

*Pour un même volume, la dilatation est proportionnelle à l'élévation de la température.*

Un décimètre cube d'air se dilate de 366 centimètres cubes lorsqu'on l'échauffe de  $0^{\circ}$  à  $100^{\circ}$ . Sa dilatation sera dix fois moindre, ou 36,6, si sa température varie de  $0^{\circ}$  à  $10^{\circ}$ , et cent fois plus petite, si l'élévation de température est seulement  $1^{\circ}$ . Ces énoncés permettent de résoudre, par de simples règles de trois, des questions arithmétiques du genre de la suivante.

**PROBLÈME.** — *Un certain poids d'air a un volume de 400 décimètres cubes lorsque sa température est  $0^{\circ}$ . On l'échauffe à  $200^{\circ}$ , en le laissant se dilater. Quel est son nouveau volume?*

Nous avons dit qu'un décimètre cube d'air se dilate de 366 centimètres cubes si on l'échauffe de  $0^{\circ}$  à  $100^{\circ}$ . Dans les questions d'arithmétique, il faut se servir de la même unité pour exprimer des quantités de même espèce : des volumes, par exemple.

D'après cela, la dilatation d'un décimètre cube d'air échauffé de  $1^{\circ}$  est  $0^{\text{dmc}},00366$ .

Cette dilatation sera 200 fois plus grande, si l'air passe de  $0^{\circ}$  à  $200^{\circ}$ , et le nouveau volume du décimètre cube aura pour expression arithmétique  $(1 + 0,00366 \times 200)$ , c'est-à-dire  $1^{\text{dmc}},732$ .

Le volume de 400 décimètres cubes sera  $1,732 \times 400$  ou  $692^{\text{dmc}},8$ .

Ces questions conviennent à tous les corps. Ce qui change, c'est le nombre qui exprime la dilatation de l'unité de volume du corps pour une variation de température de  $1^{\circ}$ . C'est en quelque sorte le *taux*<sup>1</sup> de la dilatation du corps.

Nous en donnons ici quelques-uns :

1. On dit aussi le *coefficient de dilatation*.

|                     |                           |
|---------------------|---------------------------|
| Air et Gaz. . . . . | $0,00367 = \frac{1}{273}$ |
| Mercure . . . . .   | 0,00018.                  |
| Zinc . . . . .      | 0,000093.                 |
| Cuivre . . . . .    | 0,000051.                 |
| Fer. . . . .        | 0,000036.                 |
| Verre. . . . .      | 0,000027.                 |

Si nous représentons par  $V_0$  le volume d'un corps à  $0^\circ$ , par  $V$  son volume à  $t^\circ$ , par  $K$  son coefficient de dilatation, le raisonnement précédent conduit à la formule générale

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

Ces nombres se rapportent aux volumes. On peut les faire servir pour calculer la longueur d'une barre métallique en sachant que la dilatation d'une barre d'un mètre est, pour chaque degré, le tiers du nombre qui mesure la dilatation d'un mètre cube du même corps.

Par exemple : *Les rails d'un chemin de fer forment une ligne droite dont la longueur est de 10 kilomètres. Par un temps de gelée, leur température est  $0^\circ$ ; elle monte à  $50^\circ$  dans certains jours d'été. Quelle est alors la longueur totale du rail?*

D'après la remarque précédente, l'unité de longueur du fer se dilate de 0,000012 pour chaque degré, et de  $0,000012 \times 50 = 0,00060$  pour  $50^\circ$ . La longueur d'un mètre est devenue à cette température 1,0006, et celle de 10000 mètres, 10006 mètres. L'ensemble des rails s'est allongé de 6 mètres.

De là, la nécessité de laisser entre deux rails consécutifs un petit espace qui permette à chacun d'eux de se dilater librement. Si on ne le faisait pas, la ligne entière supposée droite à  $0^\circ$  se courberait sensiblement pendant l'été, et la stabilité de la voie serait compromise.

**Dilatation de l'eau.** — L'eau présente une curieuse singularité.

Remplissons d'eau un tube thermométrique, comme si nous voulions faire un thermomètre à eau. La tige est divisée

par des traits en parties d'égal longueur. On place ce tube dans un vase plein d'eau à  $10^{\circ}$ , à côté d'un thermomètre à mercure. On refroidit peu à peu l'eau du vase jusqu'à  $0^{\circ}$ , en y jetant de petits morceaux de glace; les deux colonnes d'eau et de mercure renfermées dans les enveloppes thermométriques s'abaissent l'une et l'autre, jusqu'à ce que l'on soit arrivé à la température de  $4^{\circ}$ . A partir de ce moment, les choses changent. La contraction du mercure persiste pendant qu'il se refroidit de  $4^{\circ}$  à  $0^{\circ}$ .

L'eau, au contraire, augmente de volume, à mesure que sa température s'abaisse, son niveau se relève et se trouve à  $0^{\circ}$  dans la position qu'il avait lorsque la température du bain était  $8^{\circ}$ .

Ainsi, l'eau refroidie de  $4^{\circ}$  à  $0^{\circ}$  se dilate, à l'encontre des autres corps.

C'est à  $4^{\circ}$  qu'un poids déterminé d'eau a son plus petit volume. C'est à  $4^{\circ}$  qu'un volume déterminé d'eau, 1 litre, a son plus grand poids.

Le poids spécifique de l'eau atteint sa plus grande valeur à cette température.

On lui a donné une grande importance en la faisant entrer dans la définition du gramme. Un centimètre cube d'eau ne pèse un gramme, un litre d'eau ne pèse un kilogramme, que si la température de cette eau est de  $4^{\circ}$ .

Si l'on prenait un litre d'eau à  $0^{\circ}$ , il pèserait 127 milligrammes de moins qu'un kilogramme. A  $8^{\circ}$  la différence serait 122 milligrammes. Enfin, un vase qui est exactement rempli par 999 grammes d'eau prise à la température de  $16^{\circ}$  a la capacité d'un litre.

**Dilatation des gaz.** — La dilatation de l'air et des gaz est très grande, si on la compare à celle des liquides et des solides.

Un mètre cube d'air pris à  $0^{\circ}$  se dilate de la  $273^{\circ}$  partie de son volume, c'est-à-dire de  $3^{\text{ème}},66$  toutes les fois que sa température s'élève de  $1^{\circ}$ . D'où il résulte que, s'il s'échauffe de  $273^{\circ}$ , son volume double et devient 2 mètres cubes.

En général, s'il passe de la température  $0^{\circ}$  à la tem-

pérature 67°, son volume, exprimé en mètres cubes, est

$$1 + \frac{67}{273} = \frac{340}{273}.$$

Un volume de 15 mètres cubes à 0° est devenu  $15 \times \frac{340}{273}$  à 67°, ou environ 18<sup>m</sup>,5.

De même, un volume d'air de 37 litres, mesuré à 67°, sera réduit à 30 litres à 0°, ce nombre 30 étant le quotient de 37 par  $1 + \frac{67}{273} = \frac{340}{273}$ .

Nous avons fait remarquer qu'un volume déterminé, un mètre cube d'air chaud, pèse moins que le même volume d'air froid.

A 0°, un mètre cube d'air pèse 1300 grammes.

Si on le chauffe à 273°, il donne 2 mètres cubes de gaz qui pèsent ensemble 1300 grammes. Chaque mètre cube d'air chaud ne pèse plus que 650 grammes, moitié de 1300.

De même qu'un bouchon de liège, mis au fond de l'eau, monte à sa surface, parce qu'à volume égal il pèse moins que l'eau; une enveloppe légère de papier gonflé d'air chauffé à 273° monte dans l'air froid.

Cette expérience remarquable fut réalisée en 1783 par les frères Montgolfier.

L'air chaud s'élève au-dessus d'un poêle, d'un fourneau, d'une flamme. On le démontre en construisant à l'aide d'une carte un petit moulinet dont les ailettes sont un peu inclinées sur le plan de la carte (*fig. 12*). On le suspend à un fil à l'aide d'une épingle courbée en crochet, qui traverse le carton.

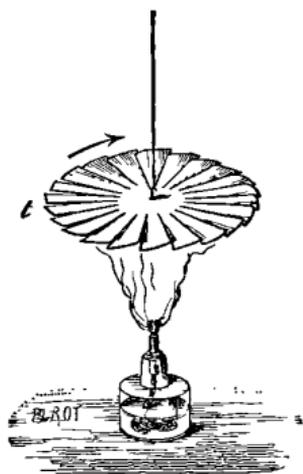


Fig. 12. — Rotation d'un moulinet par un courant d'air chaud.

Ce petit appareil, placé au-dessus d'un foyer de chaleur, tourne comme le fait un moulin sous l'influence du vent, et

met en évidence le courant d'air chaud qui s'élève du foyer.

**Formules relatives à la dilatation d'un gaz.** — On admet que tous les gaz ont le même coefficient de dilatation  $\frac{1}{273} = 0,00367$ .

La formule qui relie le volume V d'un gaz à  $t^\circ$ , à son volume à  $0^\circ$ , est

$$V = V_0 \left( 1 + \frac{t}{273} \right) = V_0 \frac{273 + t}{273},$$

formule qui fait connaître V si on donne  $V_0$ , ou réciproquement.

Un litre d'air pèse, à  $0^\circ$ , 1<sup>sr</sup>,29. Si on le chauffe à  $t^\circ$ , son volume devient  $\left( 1 + \frac{t}{273} \right)$  litres. Le poids du litre d'air chaud n'est plus que  $\frac{1,29}{1 + \frac{t}{273}} = \frac{1,29 \times 273}{273 + t}$ .

Si on a V litres d'air chaud à  $t^\circ$ , leur poids sera

$$V \times \frac{1,29 \times 273}{273 + t}.$$

## CHAPITRE II

### Mesure des quantités de chaleur.

Nous l'avons déjà dit, lorsqu'on met en contact deux corps dont les températures sont différentes, l'un d'eux s'échauffe, tandis que l'autre se refroidit, et ils parviennent ainsi à avoir la même température.

Mélangez un kilogramme d'eau à 1(  $0^\circ$  avec le même poids d'eau à  $0^\circ$ , la température du mélange sera de  $50^\circ$ . La

chaleur qu'a reçue l'eau froide a fait varier sa température de  $50^{\circ}$ ; elle provenait de l'eau chaude et sa disparition a produit dans le premier kilogramme une variation de température qui est encore  $50^{\circ}$ . Supposons que l'on puisse faire rentrer cette chaleur dans l'eau qui s'est refroidie, sa température s'élèverait de  $50^{\circ}$  à  $100^{\circ}$ .

On peut, d'après cette expérience, considérer la chaleur comme une quantité. Une certaine quantité de chaleur, dirons-nous, est nécessaire pour échauffer un kilogramme d'eau de  $0^{\circ}$  à  $50^{\circ}$ ; la même quantité sera nécessaire pour en porter la température de  $50^{\circ}$  à  $100^{\circ}$ .

Si on brûle du charbon pour produire ces effets, et si toute la chaleur que dégage la combustion entre, sans perte aucune, dans l'eau, il faut brûler un certain poids de charbon pour échauffer un kilogramme d'eau de  $0^{\circ}$  à  $50^{\circ}$ , et un poids double pour faire varier sa température de  $0^{\circ}$  à  $100^{\circ}$ .

Toutes les expériences que l'on peut faire en mélangeant de l'eau froide et de l'eau chaude, conduisent à cette conclusion : *il faut la même quantité de chaleur pour élever d'un degré la température d'un kilogramme d'eau*; par exemple, pour faire passer sa température de  $0^{\circ}$  à  $1^{\circ}$ , de  $20^{\circ}$  à  $21^{\circ}$ , de  $90^{\circ}$  à  $91^{\circ}$ .

Nous convenons de prendre cette quantité pour unité, et nous lui donnons le nom de *calorie*.

Cette définition nous permet de mesurer des quantités de chaleur, quoique nous ne sachions pas quelle en est la nature. Nous dirons, par exemple, qu'il faut 100 calories pour échauffer de  $100^{\circ}$  un kilogramme d'eau.

La masse d'eau échauffée est-elle, non plus un kilogramme mais 20 kilogrammes, le nombre de calories nécessaires sera  $20 \times 100$  ou 2 000 calories, il sera donné par *le produit du poids de l'eau par l'élévation de la température*.

Ces notions une fois comprises, on peut résoudre quelques questions intéressantes.

1° *On mélange 15 kilogrammes d'eau à  $10^{\circ}$  et 25 kilogrammes d'eau à  $60^{\circ}$ . Quelle est la température du mélange?*

Pour échauffer 15 kilogrammes d'eau de  $0^{\circ}$  à  $10^{\circ}$  il a

fallu 150 calories, et, pour échauffer 25 kilogrammes d'eau de 0° à 60°,  $25 \times 60$  ou 1500 calories sont nécessaires. Partageons la somme de ces deux quantités 1650 entre les 40 kilogrammes d'eau, chacun d'eux en gardera 41,5, c'est-à-dire, ce qu'il faut de chaleur pour échauffer un kilogramme d'eau de 0° à 41°,5.

La masse entière de l'eau aura donc cette dernière température.

2° On a 60 kilogrammes d'eau à 80°. Combien faut-il ajouter de kilogrammes d'eau froide à 15° pour obtenir une masse d'eau à 41° ?

Les 60 kilogrammes d'eau, en passant de 80° à 41°, perdent  $60 \times 39$  ou 2340 calories qui servent à échauffer l'eau froide. Pour passer de 15° à 41°, un kilogramme d'eau exige  $41 - 15$  ou 26 calories.

Le quotient de 2340 par 26 ou 90 kilogrammes donne le nombre de kilogrammes cherché.

**Chaleur spécifique.** — Il se présente une autre question.

*Faut-il autant de chaleur pour échauffer de 0° à 100° un kilogramme d'eau et un kilogramme de fer ?*

Pour le savoir, nous allons procéder comme nous l'avons déjà fait. Prenons un kilogramme de pointes de fer, plaçons-les dans un vase de fer-blanc que nous plongeons à son tour dans une marmite pleine d'eau. En faisant bouillir cette eau, nous échaufferons le fer à une température que je suppose être de 100°.

Nous avons mis dans un autre vase un kilogramme d'eau froide à 10°. Versons dans ce liquide la masse de clous échauffée, et observons avec un thermomètre la température du mélange, lorsque l'eau aura pris toute la chaleur que peut lui céder le fer et que le thermomètre devient stationnaire pendant quelque temps; nous la trouverons de 19°.

Ainsi la chaleur perdue par le kilogramme de fer en se refroidissant de 100° à 19° ou de 81° ne peut échauffer que de 9° le kilogramme d'eau. Le fer n'a donc cédé à l'eau que 9 calories; et, si on les lui redonnait, on ferait monter sa

température de 81°. Pour échauffer le fer de 9° comme l'eau il faudrait 9 fois moins de chaleur ou une calorie.

Concluons donc que, si on élève d'un même nombre de degrés la température de deux poids égaux de fer et d'eau, on dépense pour le premier corps neuf fois moins de chaleur que pour le second. *1:9*

Il faut un neuvième de calorie ou 0<sup>cal.</sup>,11 pour échauffer un kilogramme de fer d'un degré. Nous appellerons ce nombre la *chaleur spécifique* du fer, et nous admettrons, pour le fer comme pour l'eau, qu'il faut la même quantité de chaleur pour élever d'un degré la température du kilogramme de fer quelle que soit cette température.

En généralisant, nous dirons que la *chaleur spécifique d'un corps est le nombre de calories nécessaires pour échauffer d'un degré centigrade l'unité de poids de ce corps.*

Cette unité de poids est ordinairement le kilogramme; rien n'empêche de prendre le gramme, mais il faut alors faire usage de la *petite calorie* nécessaire pour échauffer d'un degré un gramme d'eau.

Voici un tableau des chaleurs spécifiques de certains corps usuels :

|         |        |            |        |
|---------|--------|------------|--------|
| Air,    | 0,237. | Zinc,      | 0,095. |
| Alcool, | 0 066. | Laiton,    | 0,094. |
| Argent, | 0,057. | Mercure,   | 0.033. |
| Cuivre, | 0,095. | Plomb,     | 0,031. |
| Eau,    | 1,000. | Hydrogène, | 3,409. |
| Fer,    | 0,114. |            |        |

Il résulte de ce qui précède, que pour échauffer d'un certain nombre de degrés, un kilogramme de fer, par exemple, il faut dépenser autant de chaleur que pour élever du même nombre de degrés la température de 0<sup>Kg</sup>,114 d'eau.

1° Combien faut-il de calories pour échauffer 4 kilogrammes de fer de 15° à 67° ?

La chaleur spécifique du fer est 0,114, et, au point de vue de l'échauffement, 4 kilogrammes de fer équivalent à  $4 \times 0,114$  ou 0<sup>Kg</sup>,456 d'eau. La variation de température

67 — 15 est de 52°; pour échauffer 0<sup>kg</sup>,456 d'eau de 52°, il faut  $0,456 \times 52$  ou 23<sup>cal.</sup>,7.

Tel est le nombre de calories demandé.

On l'obtient en multipliant le poids du corps par sa chaleur spécifique et, en outre, par l'élévation de température.

2° On plonge dans une masse d'eau de 3<sup>kg</sup>,7 prise à 12° deux kilogrammes de cuivre chauffés à 90°.

La chaleur spécifique du métal est 0,094.

Quelle est la température qui sera commune aux deux corps après le mélange?

Deux kilogrammes de cuivre exigent, pour s'échauffer d'un degré, autant de chaleur que  $2 \times 0,094$  ou 0<sup>kg</sup>,188 d'eau.

La question revient donc à celle-ci : on mélange 3<sup>kg</sup>,7 d'eau à 12° avec 0<sup>kg</sup>,188 d'eau à 90°. — Quelle est la température finale du mélange?

Nous avons déjà résolu cette question. Le résultat du calcul est 15°,8. C'est la température cherchée.

## CHAPITRE III

### Changement d'état des corps. — Fusion. — Dissolution. — Solidification.

**Fusion.** — La dilatation d'un corps solide s'accroît à mesure que la température s'élève; mais il arrive un moment où le corps, de solide qu'il était, devient liquide; il éprouve la *fusion*.

**Première loi.** — *La température de fusion est toujours la même pour le même corps.*

Cette température varie d'un corps à l'autre. Elle sert parfois à caractériser un corps, à faire reconnaître s'il est pur, ou si on l'a mélangé avec d'autres substances plus ou moins fusibles.

Mélangez du suif avec de la cire, le mélange fondra à une température qui ne sera ni 33°, température de fusion du suif, ni 62° qui est celle de la cire; mais à 50° par exemple.

Voici les températures de fusion de certains corps usuels.

|                  |   |       |          |         |
|------------------|---|-------|----------|---------|
| Mercure,         | — | 40°.  | Plomb,   | 322°.   |
| Glace,           |   | 0°.   | Zinc,    | 422°.   |
| Beurre,          | + | 32°.  | Bronze,  | 900°.   |
| Suif,            |   | 33°.  | Argent,  | 1,000°. |
| Phosphore,       |   | 44°.  | Fonte,   | 1,150°. |
| Cire,            |   | 62°.  | Or,      | 1,200°. |
| Acide stéarique, |   | 70°.  | Acier,   | 1,300°. |
| Soufre,          |   | 115°. | Fer,     | 1,500°. |
| Etain,           | × | 235°. | Platine, | 1,800°. |

Des expériences récentes montrent que la chaux, considérée longtemps comme infusible, est en fusion complète à 3 500°.

On peut donc dire que la chaleur fait fondre tous les corps solides. Nous en exceptons ceux que la chaleur décompose comme le bois.

D'autres corps tels que le verre, la résine, la cire à cacheter, se ramollissent longtemps avant de fondre complètement. On utilise cette propriété du verre pour lui donner les formes variées sous lesquelles on le trouve dans le commerce. La température de fusion de ces corps est indéterminée.

**Deuxième loi.** — *La température d'un corps est invariable, pendant toute la durée de la fusion.*

Nous l'avons déjà constaté pour la glace. Choisissons un autre corps, la cire. Remplissons une petite casserole de fragments de cire; plaçons au milieu le réservoir d'un thermomètre, et plongeons ce vase dans un autre plus grand, plein d'eau bouillante.

Le thermomètre s'élève jusqu'à 62°, et ne dépasse point cette température, tant qu'il reste des fragments de cire solide. On a soin d'agiter la cire fondue pour établir dans toute la masse l'égalité de température.

Lorsque la cire est entièrement fondue, la température s'élève de nouveau et parvient à 100°.

Remarquez que lorsque la température est stationnaire à 62°, au moment de la fusion, l'eau, qui est plus chaude que la cire, lui cède à chaque instant une certaine quantité de chaleur; celle-ci ne parvient pas au thermomètre et n'élève ni sa température ni celle de la cire; elle accomplit un autre travail, elle transforme la cire solide en un liquide. Les molécules de la cire n'adhèrent plus entre elles, elles sont devenues indépendantes, elles ont acquis une mobilité qu'elles n'avaient pas à l'état solide.

Lorsque la fusion est commencée, l'on trouve dans le même vase de la cire fondue et de la cire solide qui ont l'une et l'autre la même température.

On peut de même avoir dans le même vase de l'eau liquide et de la glace; elles ont même température, mais elles ne se comportent pas de la même manière si on les mélange séparément avec de l'eau chaude.

Nous faisons un premier mélange d'un kilogramme d'eau à 80° et d'un kilogramme d'eau à 0°. Un thermomètre plongé dans le mélange donne une température finale de 40°, nous le savons déjà.

Nous jetons dans un kilogramme d'eau à 80° un kilogramme de glace à 0°. La glace fond et le thermomètre s'abaisse finalement à 0°.

La température de la glace n'a pas varié; mais cette glace s'est transformée en un kilogramme d'eau, et il a fallu pour cela que la température de l'eau chaude s'abaissât de 80°, ou que cette eau abandonnât à la glace 80 calories.

*La quantité de chaleur nécessaire pour faire fondre un kilogramme d'un corps solide sans que sa température varie, s'appelle chaleur de fusion du corps.*

Sa valeur exprimée en calories varie d'un corps à l'autre. Elle est 80 pour la glace.

On s'explique pourquoi, lors d'un dégel, la fusion de la glace ou de la neige est si lente. Il faut que les vents tièdes qui déterminent le dégel soufflent longtemps pour fournir

à chaque kilogramme de neige les 80 calories qui lui sont nécessaires pour se liquéifier. La fusion est plus rapide si les rayons solaires interviennent pour échauffer la glace ou la neige.

**Solidification.** — Si l'élévation de la température transforme un corps solide en liquide, un abaissement de température peut produire l'effet inverse, et solidifier les liquides. Les exemples sont trop nombreux pour que nous ayons même à les citer. En général, 1° *la température de la solidification d'un corps est la même que celle de la fusion;* 2° *le corps arrivé à cette température la conserve pendant toute la durée de la solidification.*

On vérifie ces deux lois en plongeant un thermomètre dans l'eau qui se congèle, dans la cire fondue qui se solidifie. Il marque 0° dans la première, 62° dans la seconde, et cela, tant qu'il y a une portion du corps encore liquide.

Il se passe alors un phénomène inverse de celui qui accompagnait la fusion. La transformation du liquide en un corps solide produit de la chaleur en quantité égale à celle qu'il avait fallu fournir au corps solide pour se liquéfier; 80 calories par kilogramme de glace, pour citer un exemple.

Mettons de l'eau dans une salle dont la température est — 10°, elle va perdre de sa chaleur et sa température s'abaisse à 0°; à partir de ce moment, elle se transforme en glace, mais la chaleur produite par cette congélation partielle maintient à 0° la température de la masse d'eau et de glace, malgré la perte de chaleur qu'elle ne cesse d'éprouver.

Et voici pourquoi l'eau d'un étang ou d'un baquet se forme lentement à la surface ou le long des parois. Il faut un froid persistant pour que l'épaisseur de la glace augmente et qu'elle devienne capable de soutenir un homme.

Le fait que nous venons de citer est général, et toutes les fois qu'un liquide se solidifie, quelle que soit sa nature, il y a production de chaleur; elle égale, en quantité, la chaleur de fusion que nous avons définie plus haut.

**Retard de la solidification.** — Il s'établit quelque-

fois une différence entre la température de fusion d'un corps et la température de solidification.

La glace fond toujours à la température de  $0^{\circ}$ . L'eau peut être amenée à des températures plus basses sans se congeler.

On le montre à l'aide d'un thermomètre *b* (fig. 13), dont le réservoir est entouré d'un tube de verre *a* scellé à la lampe et qui renferme de l'eau privée d'air par ébullition.

On le refroidit lentement en le plaçant au milieu d'un mélange de glace et de sel.

Ce petit appareil n'est pas indispensable. Faites bouillir de l'eau dans un tube de verre bouché à une extrémité, pour en chasser l'air qui s'y trouve dissous. Recouvrez cette eau d'une couche d'huile et exposez-la à un refroidissement lent; elle pourra, sans se congeler, atteindre la température de  $-10^{\circ}$ . On détermine la congélation en agitant le tube, et la

chaleur qui se produit alors fait monter à  $0^{\circ}$  la température de la glace.

**Changement de volume.** — L'eau augmente de volume en se solidifiant. 13 litres d'eau forment un glaçon dont le volume est 14 litres. Le poids spécifique de la glace est plus faible que celui de l'eau et les glaçons flottent, comme on le sait, à la surface de ce liquide.

Voilà pourquoi, par un temps de forte gelée, on vide les baquets pleins d'eau; la formation de la glace déterminerait presque infailliblement la rupture du vase.

L'expérience est facile à faire, en remplissant d'eau un petit flacon que l'on bouche. On a soin d'assujettir le bouchon au col avec une ficelle. On refroidit l'eau en entourant le flacon d'un mélange de glace et de sel; la température de ce mélange est  $-17^{\circ}$ . Le liquide se congèle et brise le flacon.

On fait éclater des bombes de fonte en les remplissant d'eau, les bouchant à l'aide d'un tampon de bois solidement enfoncé et les exposant à la gelée.



Fig. 13.  
Retard du point de congélation de l'eau.

On dit souvent : *il gèle à pierre fendre*. Il existe, en effet, des pierres telles que le tufeau et la craie, qui, plongées dans l'eau, se laissent pénétrer par ce liquide. Exposées à la gelée, elles se brisent lorsque la glace se forme. Il faut les écarter des constructions durables.

La gelée agit de la même manière sur les rochers et les pierres. Elle les désagrège à la longue et contribue à la formation de la *terre arable*, qui donne la fécondité à nos champs cultivés.

Cette terre est formée des débris des rochers qui couvraient primitivement le sol et que les pluies et les gelées ont réduits en parties de plus en plus petites.

Dans les pays de montagnes, les gelées sont continuelles pendant l'hiver. La congélation de l'eau qui a pénétré dans les fissures des rochers les fait éclater en fragments plus ou moins gros. Ils se détachent de la montagne au moment du dégel, et roulent dans les vallées sous forme d'avalanches.

La gelée a des effets désastreux sur les végétaux, surtout si elle se produit après des journées chaudes qui ont activé la végétation. Les tissus de la plante sont gorgés de suc ; la gelée survient, la glace se forme et son expansion détruit les organes délicats des jeunes tiges ou des bourgeons. La plante ne se développe plus après une forte gelée.

**Cristallisation.** — Il se dépose sur les vitres de nos appartements une couche d'humidité qui s'y congèle pendant les nuits d'hiver et y forme des dessins d'une très grande délicatesse, connus de tout le monde. La congélation est lente et les gouttelettes d'eau se transforment en *cristaux* de glace qui, par leur assemblage, forment des espèces de feuilles de fougères.



Fig. 14. — Cristaux hexagonaux de la neige.

La neige présente souvent la forme d'étoiles à six branches d'une régularité parfaite. Nous en dessinons quelques-unes. Ce sont encore des assemblages de cristaux (*fig. 14*).

Tout liquide qui se solidifie très lentement peut prendre ces formes régulières, géométriques, que l'on appelle des cristaux. L'expérience est facile à faire avec le soufre. On fait fondre du soufre dans un vase un peu large (fig. 15), puis on le laisse refroidir. La solidification commence à la surface et contre les parois du vase; elle envahit peu à peu les parties intérieures. Avant qu'elle soit complète, on perce la croûte superficielle qui s'est formée, et on laisse écouler le soufre encore liquide.

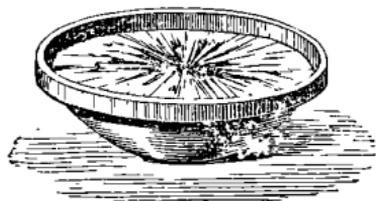


Fig. 15. Cristallisation du soufre.

Après avoir enlevé la couche superficielle de soufre solide, on voit l'intérieur du vase tapissé de fines aiguilles, enchevêtrées les unes dans les autres; ce sont des cristaux de soufre.

**Dissolution.** — Certains corps solides, tels que le sel, le sucre, disparaissent quand on les agite dans l'eau. On dit vulgairement qu'on les a fait *fondre*; il serait plus correct de dire qu'on les a fait *dissoudre* dans l'eau.

L'eau dissout un assez grand nombre de sels, tels que l'alun, le salpêtre. L'alcool, la benzine dissolvent les matières grasses, telles que le suif, la graisse, le beurre, les huiles; de là leur emploi pour nettoyer les étoffes.

On appelle *insolubles* les corps tels que le fer, les cailloux, qui n'ont pas de dissolvant usuel.

Si nous ne considérons que les corps *solubles* dans l'eau, nous verrons qu'un poids déterminé d'eau ne peut dissoudre qu'un poids déterminé d'un certain corps, lorsqu'on opère à une même température. Le liquide est dit *saturé* quand il renferme le plus grand poids du corps qu'il puisse dissoudre.

Ce poids varie avec la température, et, en général, augmente si elle s'élève.

Un litre d'eau dissout 290 grammes de salpêtre à 18°. Il peut en dissoudre plus de 2 kilogrammes à 170°.

**Cristallisation.** — On emploie deux procédés pour

faire cristalliser les sels dissous dans l'eau. 1° On abandonne à l'air la dissolution saturée du sel; l'eau s'évapore lentement à la surface du liquide, et le sel qu'elle tenait en dissolution se dépose au fond du vase, sous forme de cristaux; ils sont transparents et très réguliers, si le dépôt s'est fait lentement. C'est ainsi que le sel marin cristallise dans les *marais salants*.

2° Prenons un sel tel que le salpêtre, beaucoup plus soluble dans l'eau bouillante que dans l'eau froide. On fait dissoudre ce sel dans de l'eau à 100°; puis, après avoir filtré la dissolution chaude, on la laisse refroidir. L'eau abandonne alors une portion du sel qu'elle n'a dissous que grâce à sa température élevée, et ce sel cristallise si le refroidissement est lent. Pour l'obtenir tel, on entoure le vase qui contient la dissolution de linges ou de sciure de bois, corps qui empêchent la chaleur de se perdre.

C'est par ce procédé qu'on obtient le sucre cristallisé dit *sucre candi*.

La dissolution est bien une sorte de liquéfaction d'un corps solide. Elle se rapproche, en certains points, de la fusion. Elle exige, dans certains cas, une certaine quantité de chaleur analogue à la chaleur de fusion.

Si le mélange de deux corps détermine leur liquéfaction sans qu'ils reçoivent d'un foyer la chaleur nécessaire à la dissolution, chacun d'eux se refroidit ou refroidit les corps qui le touchent.

**Mélanges réfrigérants.** — La fusion et la dissolution de certains corps sont utilisées comme sources de froid, c'est-à-dire servent à refroidir d'autres corps.

Si l'on mélange dans un litre d'eau 500 grammes de sel ammoniac et 700 grammes de salpêtre, la dissolution de ces deux sels abaisse la température de +10° à -16°. En plongeant dans ce mélange un tube de verre plein d'eau, on détermine la congélation de ce liquide.

Le mélange réfrigérant le plus usuel s'obtient en mêlant de la glace pilée avec la moitié de son poids de sel marin. La température du mélange s'abaisse à -17°. L'eau se

congèle promptement si on la place dans un vase métallique entouré par ce mélange.

C'est le moyen qu'emploient les glaciers pour faire congeler les sirops qu'ils vendent sous le nom de *glaces*.

La présence du sel marin hâte la fusion de la glace, et le sel se dissout dans l'eau ainsi formée. La chaleur nécessaire à la fusion de la glace et à la dissolution du sel est empruntée à la masse du mélange et aux corps qui sont en contact avec lui.

Dans les grandes villes, on détermine, en hiver, la fusion rapide de la neige en jetant sur les trottoirs une certaine quantité de sel marin.

---

## CHAPITRE IV

### Conductibilité.

Un corps peut s'échauffer de deux manières fort différentes. On se chauffe les mains en les appliquant sur la surface d'un vase plein d'eau chaude, par exemple. La chaleur passe alors directement du corps chaud dans la main. On se chauffe également en étendant les mains vers une grille remplie de charbons incandescents. La chaleur qui s'en dégage traverse une couche d'air plus ou moins grande pour parvenir à la main.

Dans le premier cas, on dit que la main s'échauffe par *conductibilité*; dans le second, elle s'échauffe par *rayonnement*.

**Conductibilité.** — On plonge dans l'eau bouillante trois cuillers, l'une d'argent, l'autre d'étain, la troisième de bois. En prenant à la main l'extrémité extérieure de ces cuillers, on reconnaît que la première s'échauffe plus rapidement que

la seconde. La troisième reste froide, même après un temps assez long.

La chaleur, pour parvenir à la partie de la cuiller que l'on touche, a dû en traverser toute la longueur. Cette propagation de la chaleur a été rapide dans l'argent, plus lente dans l'étain, à peu près nulle dans le bois.

On appelle *conductibilité* la propriété que possède un corps de se laisser traverser par la chaleur, en s'échauffant lui-même de proche en proche.

L'argent et l'étain sont dits *bons conducteurs* de la chaleur; le bois et les corps analogues sont *mauvais conducteurs*. La conductibilité de l'argent est plus grande que celle de l'étain.

On montre, comme il suit, les différences de conductibilité des corps solides.

Un vase de bois ou de métal (*fig. 16*) a l'une de ses parois verticales percée d'un certain nombre de trous égaux. On

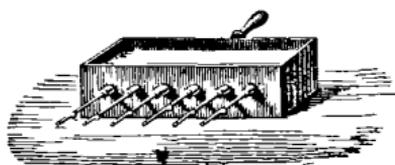


Fig. 16. — Pouvoir conducteur des corps par la chaleur.

bouche ces trous avec de petites tiges de même diamètre et de longueur égale; elles sont de nature différente. On choisira, par exemple, l'argent, le cuivre rouge, le fer, le plomb, le verre ou le bois.

Chacune des tiges est plongée dans un bain de cire fondue; lorsqu'on l'en retire, une légère couche de cire se fige à sa surface.

On remplit alors le vase d'eau bouillante. La chaleur pénètre, par conductibilité, dans toutes ces tiges. Leur température s'élève peu à peu, atteint ou dépasse  $62^{\circ}$  dans les parties qui avoisinent le vase, et la cire fond à leur surface sur une longueur d'autant plus grande que la tige conduit mieux la chaleur. La fusion s'étend plus loin sur l'argent et le cuivre que sur le fer et le plomb; elle est à peine visible sur le verre et le bois.

Une expérience plus facile à réaliser donne les mêmes résultats.

Deux baguettes minces et longues de fer et de cuivre F, C,

de même diamètre, sont soudées par une de leurs extrémités, dans le prolongement l'une de l'autre (*fig. 17*). On fixe, avec un peu de cire, de petites boules de liège en les plaçant à une distance de 3 à 4 centimètres les unes des autres. On chauffe avec une flamme l'endroit de la soudure.

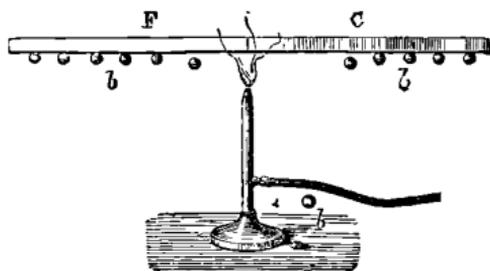


Fig. 17. — Conductibilité des métaux.

On chauffe avec une flamme l'endroit de la soudure.

La chaleur se propage à partir du point échauffé, d'un côté dans le fer, de l'autre dans le cuivre. Elle fait fondre la cire et les boules tombent. Après un certain temps, le nombre des boules qui se sont

détachées des baguettes est plus grand du côté du cuivre. La chaleur traverse donc plus facilement ce métal.

Nous prenons les baguettes de même diamètre; car, si on recommençait l'expérience avec deux tiges de fer de diamètres différents, on trouverait que la tige la plus grosse s'échauffe plus rapidement que la plus mince; nous verrons plus tard pourquoi.

On peut tenir une épingle bien que son extrémité soit chauffée au rouge à l'aide d'une flamme. On se brûlerait si on touchait, à cette distance, une barre de fer dont l'un des bouts a été rougi au feu de forge.

Les métaux sont les corps qui conduisent le mieux la chaleur; après eux, viennent le marbre et la porcelaine; puis, le bois, le charbon, et enfin, les poussières et les matières filamenteuses: les étoffes, les fourrures et les plumes. Ces dernières préservent du froid de l'hiver les quadrupèdes et les oiseaux.

Les vêtements de laine nous paraissent chauds, parce que leur mauvaise conductibilité empêche la chaleur du corps de se perdre lorsqu'on se trouve dans un air froid.

On peut saisir impunément un fer brûlant en interposant entre ce corps et la main une étoffe de laine, quelques feuilles de papier superposées, ou encore une poignée de bois.

On conserve longtemps des blocs de glace en les couvrant d'une couche épaisse de sciure de bois, corps mauvais conducteur, qui arrête la chaleur venant du dehors et l'empêche d'arriver jusqu'à la glace.

Une maison dont les murs sont épais est plus chaude, en hiver, qu'une baraque en planches.

Les poêles en usage dans l'est de la France sont construits en briques épaisses. On y brûle chaque matin une certaine quantité de combustible qui chauffe cette masse de briques. Celles-ci conservent longtemps la chaleur qu'elles ont acquise, et leur refroidissement très lent entretient une température modérée dans la salle.

Un poêle en fonte s'échauffe rapidement par la combustion du charbon; il se refroidit aussi rapidement une fois que le charbon est brûlé.

**Lampe de Davy.** — Une flamme est un gaz qui devient lumineux lorsqu'il est porté à une température élevée. Elle s'éteint si on la refroidit; c'est ce qui arrive si, en soufflant dessus, on mêle au gaz chaud l'air froid de la bouche.

Elle s'éteint encore si on place sur la flamme une toile métallique à mailles serrées. Les fils de métal la refroidissent en s'échauffant eux-mêmes, et les gaz combustibles qui traversent la toile ont perdu tout leur éclat.

Plaçons une toile métallique à une certaine distance d'un bec de gaz (*fig. 18*). Si on enflamme le gaz en B au-dessous de la toile, la flamme atteint celle-ci et ne la dépasse pas.

Laissons le gaz se dégager du bec A et plaçons une allumette au-dessus de la toile: le gaz brûle, mais la combustion est encore limitée par celle-ci et ne s'étend pas jusqu'au bec.

Les galeries de mines dans lesquelles on exploite la houille

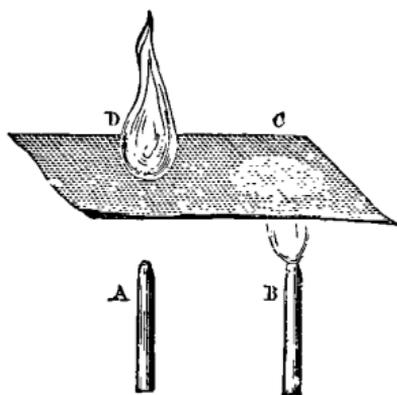


Fig. 18. — Effet des toiles métalliques sur les flammes.

sont souvent envahies par un gaz combustible composé, comme le gaz d'éclairage, de carbone et d'hydrogène. Ce gaz est renfermé entre les feuillets de houille, et il se mêle à l'air des galeries lorsque le pic du mineur brise ces feuillets. Ce mélange d'air et de gaz est appelé le *feu grisou*. Il brûle au contact d'une flamme, et il fait alors explosion. Cette combustion instantanée, qui s'étend dans toute la longueur d'une galerie, brûle ou asphyxie les ouvriers qui s'y trouvent, et les victimes de ces accidents sont malheureusement trop nombreuses chaque année.

Humphry Davy, l'un des hommes éminents dont s'honore l'Angleterre<sup>1</sup>, parvint à diminuer le nombre des désastres causés par le feu grisou à l'aide de sa lampe de sûreté (*fig. 19*).

Une lampe à huile a sa flamme entourée par un cylindre de verre que surmonte une cheminée en toile métallique close de tous côtés. Elle sépare complètement l'air intérieur de l'air extérieur.



Fig. 19.  
Lampe de sûreté.

Si on place cette lampe dans un gaz explosif, il traverse la toile et pénètre à l'intérieur, il brûle au contact de la flamme, mais la toile arrête la combustion pendant un certain temps, le mineur peut éteindre sa lampe et se sauver.

L'insouciance des mineurs est telle, parfois, qu'ils enlèvent l'enveloppe protectrice de la toile métallique et causent ainsi des accidents dont ils sont les premières victimes.

**Conductibilité des liquides et des gaz.** — Les liquides et les gaz sont mauvais conducteurs de la chaleur.

On le montre, pour les liquides, en remplissant d'eau un tube bouché à l'une de ses extrémités (*fig. 20*). On chauffe avec une flamme la partie supérieure *b* du tube et l'on porte l'eau à l'ébullition. Elle reste froide dans la partie la plus

1. Humphry Davy, né à Penzance (Angleterre) en 1778, mort en 1828.

basse *a*. Si on avait fait congeler l'eau au fond du tube, la glace ne fondrait pas pendant l'ébullition des couches supérieures.

Il est difficile de montrer, par une expérience directe, la faible conductibilité des gaz.

On en a la preuve indirecte en remarquant que la ouate, l'édredon, sont rangés parmi les corps qui se laissent le plus mal traverser par la chaleur. Ils sont composés de filaments de coton ou de barbes de plume enchevêtrées, qui emprisonnent un grand volume d'air. Leur faible conductibilité doit être attribuée à la présence de ce gaz.

**Echauffement des liquides et des gaz.** — Les liquides et les gaz peuvent, dans certains cas, s'échauffer rapidement, mais par un procédé qui ne dépend en rien de leur conductibilité.

Plaçons de l'eau dans un vase profond (fig. 21) que nous chaufferons à sa partie inférieure à l'aide d'une flamme; c'est le cas d'une marmite pleine d'eau accrochée à une crémaillère. Si on a placé dans l'eau de petits morceaux de papier ou bien de la sciure de bois mouillée, on voit ces corps monter du fond à la surface, comme l'indique la flèche qui est au milieu du vase, puis redescendre le long des parois du vase dans la direction des flèches latérales. Ce mouvement se continue pendant toute la durée de l'échauffement. Il nous indique que la masse d'eau est parcourue par des courants ascendants d'eau chaude et par d'autres courants descendants d'eau froide. Cela tient à ce que l'eau qui est au fond du vase s'échauffe la première; elle augmente de volume sans changer de poids et devient, à volume égal, moins pesante que

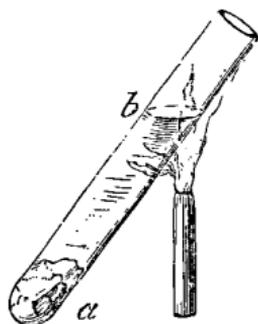


Fig. 20. — Conductibilité des liquides.

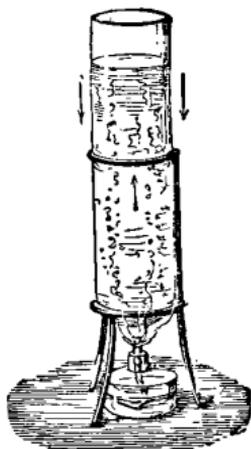


Fig. 21. — Mode de transmission de la chaleur dans les liquides.

l'eau froide qui est au-dessus d'elle. Elle monte alors à la surface, comme le feraient des gouttes d'huile qu'on déposerait, avec une pipette, au fond du vase plein d'eau. Elle est remplacée près du fond par l'eau qui est restée froide.

Ces mouvements continuent tant qu'il existe une différence de température entre les parties supérieures de la masse liquide et les parties inférieures. Ils répartissent promptement la chaleur dans toutes les parties de l'eau. Ce n'est pas comme dans un solide la chaleur qui chemine pour atteindre les parties froides du corps, c'est l'eau qui se déplace pour transporter la chaleur de bas en haut.

Nous avons indiqué (p. 17) les mêmes mouvements dans une masse d'air dont les couches inférieures sont échauffées.

L'air qui s'échauffe dans une salle, au contact d'un poêle, monte jusqu'au plafond; il en fait descendre l'air froid qui s'échauffe à son tour.

S'il se trouve près du plafond une trappe ouverte qui permette à l'air chaud de se répandre au dehors, l'air extérieur est appelé dans la salle; il peut y entrer par des ouvertures pratiquées près du parquet. La salle se trouve ainsi *ventilée*; elle perd l'air chaud, vicié par la respiration des personnes qui habitent la salle, et elle reçoit un volume équivalent d'air frais propre à la respiration.

---

## CHAPITRE V

### Chaleur rayonnante.

La chaleur semble s'échapper de la surface des corps chauds; elle se propage au loin et elle échauffe les corps qu'elle rencontre.

C'est ainsi que la lumière semble sortir d'un corps lumineux, et qu'elle nous le fait voir lorsqu'elle arrive à notre œil après avoir parcouru de longs espaces.

La terre est suspendue dans un espace que l'on dit être *vide*, parce qu'on n'y soupçonne rien qui ressemble à un de nos gaz ou de nos liquides. Trente-neuf millions de lieues la séparent du soleil et, cependant, elle reçoit de cet astre la chaleur et la lumière.

On sent au loin la chaleur d'un incendie, ce n'est pas l'air qui nous l'amène; car, si ce gaz s'échauffait, il s'élèverait aussitôt dans l'atmosphère et serait remplacé par de l'air froid.

On a donné le nom de *rayonnante* à cette chaleur, qui présente les propriétés générales de la lumière. Elle l'accompagne lorsqu'elle sort d'un corps dont la température dépasse 500° : un boulet rouge, un feu de coke, une flamme.

On l'appelle alors *chaleur lumineuse*.

La *chaleur obscure* est rayonnée par un poêle modérément chauffé, par une chaudière pleine d'eau bouillante, en un mot, par des corps qui sont chauds, mais qui ne sont pas lumineux.

**Transparence pour la chaleur.** — La chaleur solaire traverse les couches d'air qui enveloppent la terre sans les échauffer, agissant ainsi comme la lumière, qui ne communique pas aux parties de l'air qu'elle illumine la propriété de luire par elles-mêmes. Toutes les ascensions que l'on a faites dans l'atmosphère en gravissant des montagnes ou en s'élevant en ballon, nous ont démontré que la température de l'air décroît à mesure que l'on monte, et qu'elle est glaciale à une certaine distance du sol.

L'air est transparent pour la chaleur solaire; il en est de même du verre et des autres corps transparents pour la lumière, ils se laissent plus ou moins traverser par la chaleur lumineuse. Mais, ce qui est à remarquer, la plupart d'entre eux arrêtent la chaleur obscure de la même manière qu'un corps opaque, tel que le marbre, arrête la lumière.

Tout le monde a pu constater que, dans les beaux jours d'été, la chaleur est étouffante sous les halles vitrées des gares. Cela tient à ce que la chaleur solaire traverse facilement le vitrage supérieur. Elle parvient ainsi jusqu'au sol

qu'elle échauffe. Elle perd alors ses qualités de chaleur lumineuse.

La chaleur qu'envoient ces corps échauffés est obscure ; elle ne peut plus s'échapper au dehors par le toit de verre, elle s'accumule au-dessous et fait monter peu à peu la température de l'air intérieur.

Le même effet se remarque dans les serres des jardiniers et sous les cloches qui recouvrent les plantes. Il faut les maintenir soulevées ou les recouvrir d'une couche de chaux pour modérer l'échauffement et l'empêcher d'être nuisible aux plantes.

### **Effets de la chaleur rayonnante sur les corps.**

**Réflexion.** — Lorsque la chaleur rayonnante rencontre un corps qu'elle ne peut traverser, une partie est renvoyée par le corps, imitant en cela le mouvement d'une balle élastique lancée contre un mur et qui s'en éloigne après le choc.

Ce changement de direction dans le mouvement de propagation de la chaleur s'appelle *réflexion*.

Un miroir poli réfléchit également bien, et d'après les mêmes lois, la lumière et la chaleur ; que celle-ci soit lumineuse ou obscure. Nous énoncerons ces lois dans le livre suivant, en indiquant alors les expériences qui mettent en évidence la réflexion de la chaleur.

Remarquons cependant certains faits vulgaires pour les expliquer. La lumière solaire qui frappe un mur blanchi à la chaux se réfléchit irrégulièrement à sa surface, et produit un reflet capable d'éclairer faiblement une salle ouverte devant ce mur. Il y a également un reflet de chaleur ; il peut échauffer d'une manière sensible un thermomètre.

Les jardiniers l'utilisent lorsqu'ils blanchissent les murs contre lesquels ils dressent leurs espaliers. C'est un moyen d'augmenter, dans une certaine proportion, la quantité de chaleur et de lumière que reçoivent les arbres fruitiers adossés au mur.

**Absorption.** — La portion de chaleur qui n'est pas réfléchie par un corps est *absorbée* par lui et sert à échauffer

sa surface ; puis elle chemine dans l'intérieur du corps, avec lenteur, par conductibilité.

L'absorption est nécessairement moindre pour les corps polis ou simplement blancs, que pour les corps dont la surface est mate et sombre. Elle est la plus grande possible si le corps est recouvert de noir de fumée.

Voici bien des faits qui montrent ces différences d'absorption.

Une ardoise et une pierre blanche sont exposées pendant quelques heures à la lumière solaire. Vous reconnaîtrez, au simple contact, que la première est à une température beaucoup plus élevée que la seconde.

Une cuisinière qui veut faire bouillir rapidement de l'eau la mettra dans une cafetière déjà noircie par l'usage, et non dans une autre, neuve et ayant l'éclat de l'argent poli ; placée devant un feu de bois, celle-ci s'échaufferait très lentement.

Deux plaques de fer-blanc A, B (*fig. 22*) de même grandeur sont placées verticalement à la même distance de la flamme d'une lampe. L'une est brillante et polie. On a promené l'autre sur une flamme fumuse, et elle est recouverte de noir de fumée.

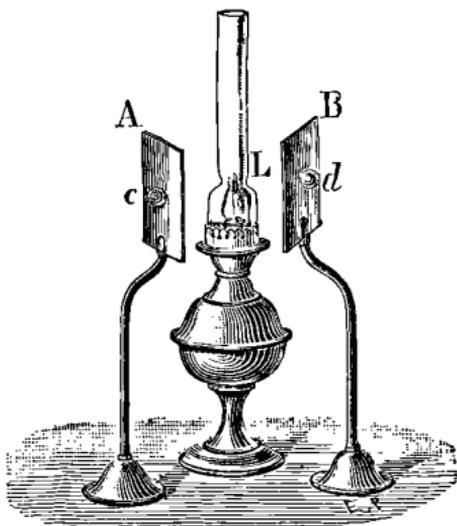


Fig. 22. — Absorption de la chaleur.

Deux boules de liège *c, d* sont fixées à ces lames, à l'aide d'un peu de suif ; les faces brillante et noircie sont tournées du côté de la lampe ; les boules sont sur les faces opposées.

La face noircie s'échauffe beaucoup plus rapidement que l'autre, et la boule *d*, qui lui correspond, se détache la première par suite de la fusion du suif qui est plus prompte.

Tout le monde sait que, si l'on se promène en plein soleil, les vêtements blancs sont plus frais que les noirs.

Les agriculteurs donnent le nom de terres *chaudes* à celles qui ont une couleur sombre; ils les préfèrent aux terrains crayeux, de couleur blanche, qui forment les terres *froides*.

Le soleil chauffe davantage les premières et la végétation y est plus puissante.

La neige reste longtemps sur la terre, après le dégel; sa couleur blanche la préserve d'un échauffement rapide, même lorsqu'elle reçoit les rayons du soleil. Mais, si on la recouvre de poussière de charbon ou simplement de terre, ces corps absorbent rapidement la chaleur solaire, ils s'échauffent et déterminent alors la fusion de la neige, en lui cédant la chaleur qu'ils ont absorbée.

**Rayonnement.** — Tous les corps que nous connaissons sont des corps chauds. La glace nous semble froide, et cependant, si on entourait de glace un bloc de mercure solidifié, elle lui céderait assez de chaleur pour le faire fondre et pour l'amener à la température de zéro. Ce mercure solidifié est lui-même plus chaud que l'oxygène liquéfié.

Tout corps chaud a la propriété de perdre, sous forme de rayonnement, une partie de sa chaleur. Il rayonne tout aussi bien que le soleil ou qu'une flamme.

La quantité de chaleur qu'un corps envoie en un temps déterminé, une minute, par exemple, est, toutes choses égales d'ailleurs, proportionnelle à l'excès de sa température sur celle de l'enceinte où il se trouve placé, pourvu, toutefois, que cet excès soit peu considérable.

Cela veut dire que si, dans une salle dont la température est de 10°, vous placez deux corps, l'un à 15°, l'autre à 20°, ce dernier perdra dans le même temps 2 fois plus de chaleur que l'autre. Dans tous les cas, la perte de chaleur croît avec l'excès de température.

La quantité de chaleur perdue par rayonnement dépend de l'étendue de la surface du corps. Un fil de fer a relativement à sa masse une surface plus grande qu'une barre de même longueur; il perd donc relativement plus de chaleur,

et c'est pourquoi, si on échauffe l'un et l'autre par une de leurs extrémités, la chaleur qui les pénètre par conductibilité se perd plus vite dans le fil de fer, et le métal semble, sous cette forme, moins bon conducteur de la chaleur.

On échauffe convenablement une grande salle en y mettant un poêle, qui présente une grande surface rayonnante, soit par lui-même, soit par le développement des tuyaux.

Un poêle qui rayonne dans tous les sens est, sous ce rapport, préférable à une cheminée dont la surface rayonnante est toujours réduite à l'ouverture relativement étroite du foyer.

La nature de la surface rayonnante a une grande influence sur la quantité de chaleur émise par le corps.

Prenons un vase A (*fig. 23*) de forme cubique. L'une des faces est noircie, une autre recouverte d'une feuille de fer-blanc très bien polie.

On pourrait prendre une boîte de fer-blanc cylindrique et recouvrir une moitié de la surface de noir de fumée, en laissant l'autre moitié brillante.

On remplit le vase d'eau bouillante et on place en avant un petit thermomètre à air dont la boule a été noircie.

Ce thermomètre s'échauffe peu, s'il est placé devant la face brillante. L'échauffement est rapide si, en tournant le vase, on substitue la face noircie au métal brillant.

La température du corps rayonnant est la même dans les deux cas, sa distance au thermomètre ne change pas; nous devons donc conclure que la chaleur sort d'une face noircie plus abondamment que d'une surface polie.

Il résulte de tout ce qui précède que le refroidissement d'un corps chaud dépend d'un assez grand nombre de circonstances; d'abord de son poids et de la chaleur spécifique. Pour se refroidir de  $1^{\circ}$ , un kilogramme d'eau doit perdre une

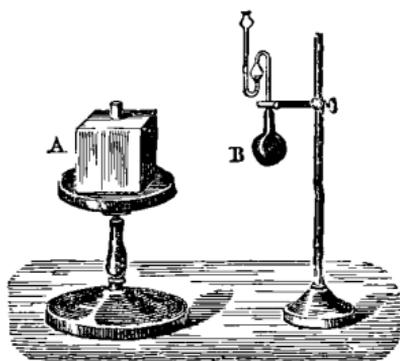


Fig. 23.  
Rayonnement de la chaleur.

calorie, tandis qu'un kilogramme de fer n'en perd qu'un neuvième. Pour la même raison, 10 kilogrammes d'eau se refroidiront plus lentement qu'un seul kilogramme.

Le refroidissement sera d'autant plus rapide que la température de l'enceinte sera plus éloignée de celle du corps chaud. Une marmite pleine d'eau bouillante se refroidirait plus vite en plein air que dans l'atmosphère chaude du fournil d'un boulanger.

La grandeur de la surface et la nature du vase ont leur part d'influence.

Remplissons d'eau bouillante deux gobelets d'étain, l'un noirci, l'autre brillant et poli. On fait reposer ces deux vases sur de petits trépieds pour éviter toute perte de chaleur par conductibilité et on pose sur chacun d'eux un petit couvercle. Au bout d'un certain temps, l'eau qui remplit le vase noirci est sensiblement plus froide que celle qui est dans le gobelet brillant. Ainsi, la perte de chaleur est plus faible pour ce dernier.

En général, les corps qui absorbent le mieux la chaleur rayonnante sont ceux qui l'émettent le plus facilement.

**Equilibre de température.** — Plusieurs corps sont dans la même salle; ils ont des températures différentes et sont susceptibles de s'échauffer ou de se refroidir par rayonnement.

Chacun d'eux émet de la chaleur; il en reçoit également de tous les autres corps et des murs de l'enceinte qui sont aussi des surfaces chaudes.

Les corps qui perdent dans un temps donné plus de chaleur qu'ils n'en absorbent se refroidissent et leur température s'abaisse. Ceux qui gagnent plus de chaleur qu'ils n'en perdent s'échauffent et leur température s'élève. Au bout d'un temps plus ou moins long, tous les corps ont la même température que les murs de la salle. Le rayonnement mutuel continue toujours, mais la température ne varie plus, parce que pour chaque corps le gain de chaleur est égal à la perte.

## CHAPITRE VI

## Sources de chaleur.

On distingue les sources de chaleur *naturelles* de celles qui sont *artificielles*.

Les premières sont le soleil, les astres et la chaleur propre de la terre.

L'homme se procure la chaleur dont il a besoin dans ses établissements industriels, en faisant brûler du bois, diverses espèces de charbon, ou des corps qui en dérivent, comme le gaz d'éclairage. Ces combustions sont des phénomènes chimiques.

Certaines actions mécaniques telles que le frottement, le choc de deux corps, amènent une production de chaleur; l'électricité chauffe les corps qu'elle traverse. Mais, jusqu'à présent, ces sources ont été rarement appliquées au chauffage domestique ou industriel.

**Chaleur solaire.** — Nous ne savons rien sur l'origine de la chaleur et de la lumière solaire. Elles s'accompagnent et sont indispensables au développement des végétaux, et par suite à l'entretien de la vie sur la terre.

Une partie de cette lumière et de cette chaleur traverse la couche d'air qui enveloppe notre globe, et cela sans l'échauffer sensiblement; une autre partie est arrêtée par cet air et surtout par les nuages; elle n'arrive pas jusqu'au sol.

La quantité de chaleur qu'absorbe, dans le même temps, une portion de la surface terrestre, un mètre carré par exemple, croît avec l'angle que les rayons solaires font avec la surface, et aussi, avec la durée de l'insolation. Tout le monde sait que la chaleur qui nous vient du soleil est faible le matin et le soir, et prend vers midi la plus grande

intensité. Si on l'observe à cette heure, on la trouve plus faible en hiver qu'en été.

Si on se déplace à la surface de la terre, on trouve les régions qui avoisinent les pôles de la terre constamment couvertes de glace. La quantité de chaleur qu'elles reçoivent est très faible.

Le soleil s'élève peu au-dessus de l'horizon, et, dans ces régions, il y a de longues nuits qui favorisent le refroidissement de la terre.

Les végétaux, les animaux y sont rares ; la vie est presque éteinte, et le froid qui règne dans ces contrées a toujours interdit à l'homme l'approche des pôles.

On trouve, au contraire, dans les régions intertropicales, un excès de chaleur qui favorise la végétation, mais qui devient à son tour une gêne ou un danger pour les voyageurs qui pénètrent dans la zone torride.

Il est difficile de se rendre un compte exact de la quantité de chaleur solaire qui tombe en un an sur la surface entière du globe.

On peut évaluer celle qui atteint la limite de l'atmosphère au nombre de calories nécessaires pour faire fondre une couche de glace qui envelopperait complètement la terre et qui aurait une épaisseur de 45 mètres.

L'inégale répartition de la chaleur solaire à la surface de la terre détermine la formation des vents et aussi des grands courants, tels que le *Gulf-Stream*, qui parcourent les océans.

Cette même chaleur solaire fait évaporer l'eau des fleuves, des lacs, de la mer. La vapeur d'eau répandue dans l'atmosphère forme les nuages, qui sont charriés par le vent et qui, plus tard, versent sur le sol la pluie, si nécessaire à la culture et au développement des végétaux. Une partie de cette pluie s'infiltré dans le sol et reparaît sous forme de sources. De là les ruisseaux, les rivières et les fleuves qui arrosent le sol avant de reporter à la mer cette eau qui s'en était échappée sous forme de vapeurs.

On n'a pas encore songé sérieusement à utiliser la chaleur solaire pour les besoins de l'industrie.

**Chaleur terrestre.** — La terre est chaude par elle-même et l'intérieur du globe doit être à une température très élevée.

Les observations faites dans les puits de mine nous apprennent que la température s'élève d'un degré, lorsqu'on descend de 30 mètres. Ce nombre ne convient qu'aux parties du sol accessibles à l'homme.

On trouve, dans certaines localités, des sources d'eau chaude dont la température atteint parfois 100°. Elles sont alimentées par des couches d'eau souterraines situées à une grande profondeur.

Les volcans rejettent des laves incandescentes fondues, qui, par le refroidissement, donnent de véritables roches.

Ces laves viennent de l'intérieur de la terre; elles y étaient à l'état liquide; ce qui confirme ce que nous disions sur la haute température des parties centrales de notre globe.

#### **Sources artificielles. Actions mécaniques.**

**Frottement.** — Le frottement de deux corps produit de la chaleur et élève leur température.

Les peuplades sauvages d'Amérique se procuraient du feu en faisant tourner rapidement entre leurs mains un petit bâton de bois dur, taillé en pointe, et appuyé sur une planche; on l'entourait de feuilles sèches, et la chaleur dégagée par le frottement suffisait pour les enflammer.

Frottez sur un banc de bois un clou à tête ronde fixé à l'extrémité d'un bouchon, il devient brûlant, et enflamme, par son contact, une allumette chimique.

Le frottement d'une allumette phosphorée sur un corps rugueux, tel que le papier de verre, suffit pour échauffer le phosphore et détermine sa combustion dans l'air.

La scie du menuisier s'échauffe lorsqu'on coupe une planche; il en est de même du fer que le serrurier façonne avec une lime.

On graisse les roues des voitures pour diminuer le frottement de l'essieu sur le moyeu de la roue. Si on ne prend pas cette précaution, le moyeu et l'essieu s'échauffent de plus en plus et le bois de la roue peut s'enflammer.

On a vu des incendies éclater dans les minoteries quand on négligeait de graisser les axes des roues ou des meules qui tournent rapidement sur leurs coussinets.

La chaleur due au frottement n'a reçu aucune application utile.

**Percussion.** — Le choc de deux corps produit aussi de la chaleur. Qui n'a vu des étincelles jaillir du choc d'un fer de cheval sur le pavé. Ce choc détache du fer de petites parcelles de métal; elles sont assez fortement échauffées pour brûler dans l'air.

Avant l'invention des allumettes chimiques, on se procurait du feu en frappant un morceau de *silex* ou pierre à fusil avec un anneau de fer appelé *briquet*. Les étincelles de fer incandescent qui se produisaient étaient reçues sur de l'*amadou*, corps très inflammable, qui brûlait aussitôt.

Ces étincelles pouvaient enflammer la poudre à canon. Dans les grandes guerres du commencement du siècle, on ne se servait que de fusils à pierre.

Dans les fusils modernes, c'est encore le choc qui détermine l'explosion de l'amorce et l'inflammation de la poudre.

Un morceau de fer s'échauffe si on le bat sur une enclume avec un marteau. Une balle de plomb lancée par une arme à feu est à une température élevée après avoir choqué la cible qui l'arrête.

**Combustion.** — Les corps que l'on brûle pour se procurer de la chaleur sont le carbone et l'hydrogène. Ils sont rarement purs; mais, combinés entre eux ou avec d'autres corps, ils forment nos combustibles usuels: la houille, le coke, le bois, les huiles, le pétrole, le gaz d'éclairage.

L'étude de la combustion appartient à la chimie. On y apprend qu'un combustible exige, pour brûler, un certain poids d'oxygène, ordinairement emprunté à l'air.

Nous savons, de plus, qu'il faut chauffer au rouge et au contact de l'air certains points du combustible pour que le carbone et l'hydrogène puissent se combiner avec l'oxygène.

Le carbone se transforme, en brûlant, en acide carbonique, l'hydrogène se change en eau; la chaleur transforme le bois

et la houille en corps volatils qui brûlent, ou qui se dégagent avec les gaz produits de la combustion et forment la *fumée*.

Dans le cas d'une combustion incomplète, celle-ci est noire et renferme des particules très fines de charbon.

Pour que la combustion soit complète et rapide, il faut diriger sur le combustible un fort courant d'air qui amène sans cesse la quantité d'oxygène nécessaire à la combustion.

C'est l'office des soufflets de nos appartements et des gros soufflets de forge.

Dans nos maisons et dans les usines, on utilise le tirage de la cheminée pour entretenir la combustion. Ce tirage est une conséquence de l'échauffement des gaz qui se forment dans le foyer ou qui le traversent. Un mètre cube d'air chaud pèse moins que le mètre cube d'air froid; dès lors, il s'élève dans l'atmosphère, et, s'il est enfermé dans un tuyau de cheminée, il détermine un courant d'air froid dirigé vers le foyer.

Ce courant est alimenté lui-même par l'air extérieur qui entre dans la chambre par des bouches d'air pratiquées d'avance dans les murs, ou par les fissures des portes et des fenêtres.

Si la chambre est trop bien fermée, la fumée y rentre par le foyer; la cheminée fume.

S'agit-il de brûler du pétrole, de l'huile, du gaz d'éclairage pour en obtenir une vive lumière? on entoure la flamme de nos lampes d'une cheminée de verre. Le tirage qu'elle détermine amène au contact de la flamme un grand volume d'air; la combustion est rapide, la température s'élève et la flamme devient plus blanche et plus éclairante. En même temps, la combustion est complète et la flamme ne donne pas de fumée.

Lorsqu'on emploie le gaz d'éclairage pour le chauffage, on cherche à lui faire produire le plus de chaleur possible, et, pour cela, on le mélange avec l'air avant de le faire arriver au bec où on l'enflamme.

Dans le bec Bunsen (*fig. 24*), le gaz arrive par le robinet A à un bec *o* percé d'un orifice étroit et placé au bas d'un tuyau C qui s'ouvre en D. Ce tuyau est percé d'une ouverture circulaire placée à la hauteur du bec. On l'ouvre ou on

le ferme à l'aide d'un anneau circulaire C qui entoure le tuyau et qui est également percé d'un trou. Cet anneau est mobile, ce qui permet de faire correspondre le trou avec l'ouverture circulaire du tuyau.

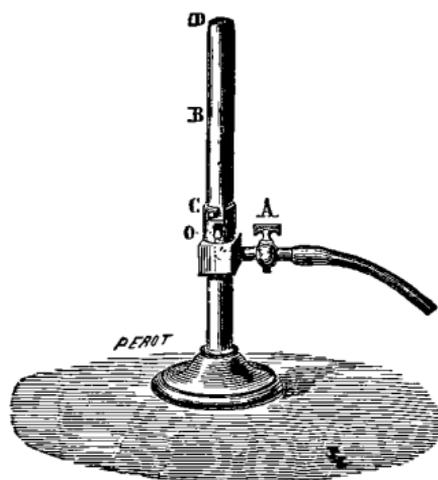


Fig. 24. — Bec Bunsen.

Le gaz brûle, à la manière ordinaire, avec une flamme éclairante si le tube est fermé en o.

S'il est ouvert, l'air extérieur, aspiré par le courant de gaz qui s'échappe du bec intérieur, se mélange avec lui, et la flamme qui se forme en D est pâle, bleuâtre et très chaude.

Ce système est appliqué dans les fourneaux à gaz qui servent à chauffer de larges surfaces.

### EXERCICES

1° Que vaut en degrés centigrades : 1° une température de 54 degrés Réaumur; 2° une température de 54 degrés Fahrenheit?

2° On fait entrer une tige de fer conique dans un anneau de cuivre chauffé au rouge. Pourquoi ne peut-on plus séparer le fer du cuivre lorsque celui-ci est complètement refroidi?

3° Une barre de cuivre a une longueur de 2<sup>m</sup>,758 à la température de 60°. Quelle serait sa longueur à la température de la glace fondante? Que deviendrait-elle si la barre était maintenue longtemps dans l'eau bouillante?

Le coefficient de dilatation du cuivre est 0,000017.

4° Deux barres : l'une de fer, l'autre de zinc, ont exactement la même longueur 3<sup>m</sup>,5 à 0°, quelle sera leur différence de longueur si on les place dans un four chauffé à 200°?

Coefficients de dilatation : 0,000012 pour le fer, 0,000031 pour le zinc.

5° Que devient à 300° le volume de 2 mètres cubes d'air mesuré à 0°? Que pèserait un volume de 2 mètres cubes d'air mesuré à 300°?

Un litre d'air pèse 1<sup>gr</sup>,3 à 0°, son coefficient de dilatation est 0,0037.

6° Une barre de cuivre dont la longueur est 1<sup>m</sup>,5 à 8° a une longueur de 1<sup>m</sup>,5204 à 80°. Quel est le coefficient de dilatation en longueur du métal? quel serait son coefficient de dilatation en volume?

7° Une masse d'eau de 100 kilogrammes est à la température de 95°. On demande le poids d'eau à 35° qu'il faut lui ajouter pour ramener sa température à 50°.

8° On plonge dans une masse d'eau pesant 12 kilogrammes et prise à la température de 10° un boulet de fer du poids de 4 kilogrammes, chauffé à 130°. Les deux corps prennent une température commune de 14°. — Quelle est la chaleur spécifique du fer?

9° Un bloc de glace pèse 24 kilogrammes. Il est dans une cuve que l'on remplit d'eau à 100°. La glace fond et la température du mélange est 0°. — Quel est le poids de l'eau chaude ajoutée?

Combien faudrait-il ajouter d'eau à 100° pour que la température du nouveau mélange fût 10°? — La chaleur de fusion de la glace est de 80 calories.

10° Une masse de cuivre pesant 700 grammes et chauffée à 85° est renfermée dans un bloc de glace qui l'enveloppe complètement. Le cuivre se refroidit jusqu'à 0° et on recueille 71 grammes d'eau provenant de la fusion de la glace. Quelle est la chaleur spécifique du cuivre? — Chaleur de fusion de la glace, 80 calories.

11° On touche successivement un morceau de bois et une barre de fer exposée depuis longtemps à l'air par un temps de forte gelée. Pourquoi la sensation de froid est-elle beaucoup plus grande au contact du fer?

12° On recouvre de mousseline une plaque de fer et une planche de bois; la mousseline bien tendue est en contact avec chacun des deux corps. On dépose à la surface des charbons rouges. Le tissu reste intact sur le fer, il est roussi sur le bois. — Expliquer cette expérience.

---

# LIVRE II

## DE LA LUMIÈRE

---

### CHAPITRE PREMIER

#### Réflexion.

La lumière nous vient naturellement du soleil et des autres astres. La combustion de certains corps, tels que l'huile, le pétrole, le gaz d'éclairage, la production de l'électricité nous fournissent des sources artificielles de lumière.

Tout corps devient lumineux lorsque sa température atteint ou dépasse 500° : La combustion, l'électricité ne servent qu'à échauffer fortement les corps et à les faire briller d'un éclat que nous utilisons pour l'éclairage. Quant au soleil, personne ne doute de l'élévation de sa température, car il nous envoie de la chaleur et de la lumière. Elles ne nous parviennent qu'après avoir traversé l'immense espace vide qui sépare la terre du soleil.

**Transparence.** — La lumière traverse, sans trop s'affaiblir, l'air, l'eau, le verre; ce sont des corps *transparents*.

Les métaux, le bois, les pierres arrêtent la lumière, même sous une faible épaisseur; ce sont des corps *opaques*.

Le papier blanc, le verre dépoli sont dans le groupe des corps *translucides*. Si les fenêtres d'une chambre sont garnies de verres dépolis, il passera au travers de ceux-ci assez de lumière pour éclairer la salle; mais on ne voit plus, de l'intérieur, la forme des objets qui sont au dehors.

**Rayons lumineux.** — Nous regardons une étoile brillante; puis, fermant un œil, nous plaçons devant l'autre un crayon qui nous cache l'étoile. Il se trouve alors dans l'alignement du point lumineux, c'est-à-dire sur la ligne qui joint le centre de la pupille à l'étoile.

Nous remplaçons le crayon par une carte percée d'un trou circulaire de 2 à 3 millimètres de diamètre; nous ne voyons l'étoile que si le centre du trou se trouve dans son alignement.

On résume ces expériences et d'autres analogues en disant que *la lumière partie d'un point lumineux se meut en ligne droite.*

Chacune de ces lignes droites a reçu le nom de *rayon lumineux*. Toute ligne droite qui passe par le point lumineux est un rayon de lumière. Ces lignes s'éloignent de la source de lumière en divergeant comme le font les rayons d'une sphère, elles vont, dans toutes les directions, éclairer les objets qu'elles rencontrent.

Un certain nombre de rayons voisins, issus du même point lumineux, forment un faisceau.

Si le point est, comme une étoile, placé à une distance infiniment grande, on peut regarder comme parallèles tous les rayons d'un même faisceau.

**Application.** — Lorsqu'un arpenteur veut tracer dans un champ une ligne droite, il en marque les extrémi-

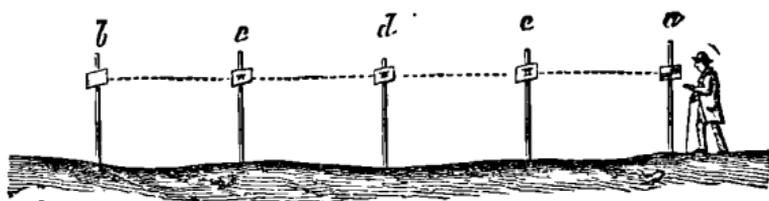


Fig. 25. — Tracé d'une ligne droite sur le terrain.

tés *a, b* (fig. 25) avec deux piquets. Il se place derrière le premier *a*, et prend l'alignement du second en faisant en sorte que le premier lui cache le second. Un aide enfonce dans le sol des piquets intermédiaires *c, d, e*. Chacun d'eux se trouve caché à l'œil de l'arpenteur par le piquet *a*. L'opé-

ration terminée, tous les piquets sont sur une même ligne droite.

**Vitesse de la lumière.** — La vitesse de la lumière est le nombre de kilomètres qu'elle parcourt en une seconde de temps. On l'a trouvée égale à 300000 kilomètres ou 75000 lieues, vitesse énorme dont nous n'avons aucune idée.

Nous ne la concevons pas mieux, si nous disons que la lumière franchit en 8' 16'' les 39000000 de lieues qui nous séparent du soleil.

Un boulet de canon, parcourant 300 mètres par seconde, mettrait environ seize ans à franchir cet espace. S'il y avait un chemin de fer établi entre la terre et le soleil, une locomotive faisant 20 lieues à l'heure et partant de la terre n'arriverait à destination qu'au bout de cent soixante-dix ans.

**Ombre.** — Un corps opaque est éclairé par une source lumineuse; il existe derrière lui un espace obscur dans lequel ne pénètre aucun des rayons qu'elle émet; c'est l'*ombre* du corps.

Dans le cas simple où le corps éclairant et le corps éclairé sont des sphères inégales, on peut tracer les limites de l'ombre :

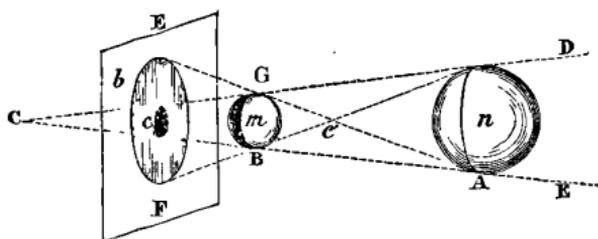


Fig. 26. — Ombre d'une sphère.

Le cône DCE (fig. 26), qui touche à la fois les deux sphères *m*, *n* en les envelop-

pant l'une et l'autre, détermine au delà de *m*, dans la portion GCB, l'ombre de la sphère opaque. Un œil placé dans cet espace ne pourrait voir la sphère lumineuse *n*.

Si la sphère *n* est le soleil et *m* la terre, le cône d'ombre s'étend, derrière celle-ci, bien au delà de la lune. A certaines époques, la lune le traverse; elle ne reçoit plus la lumière du soleil et elle cesse d'être visible; il y a alors éclipse de lune.

A d'autres époques, il y a éclipse de soleil, lorsque la lune se place entre le soleil et la terre et que son cône d'ombre

rencontre la surface terrestre. Le soleil devient invisible pour tout observateur placé dans ce cône d'ombre.

**Pénombre.** — Prenons des corps lumineux ou opaques de dimensions plus petites : le globe d'une lampe  $n$  et une boule opaque  $m$ . Plaçons un carton blanc derrière celle-ci. La portion  $c$ , qui est dans l'intérieur du cône d'ombre, est noire. C'est l'*ombre portée* du corps opaque. Les contours de cette tache noire ne sont pas nets, ils se fondent dans une teinte grise qui s'éclaircit de plus en plus, à mesure qu'on s'éloigne de l'ombre : c'est la *pénombre*.

Deux lignes qui se croisent au point  $c'$  en touchant à la fois les deux sphères  $m, n$  limitent, sur la figure, l'étendue de la pénombre. Un œil qui s'y trouve placé ne voit qu'une partie du corps lumineux.

La pénombre n'existe pas, si la source de lumière se réduit à un point, par exemple, une étoile.

**Intensité de la lumière.** — L'éclat d'un point lumineux s'affaiblit à mesure qu'on s'en éloigne. Si cet éclat mesure l'intensité de la lumière qui entre dans l'œil par la pupille, on peut dire que cette intensité diminue à mesure que la distance de l'œil au point lumineux augmente. Cela tient au mode de propagation de la lumière.

Prenons une source lumineuse  $S$  très étroite (*fig. 27*) et plaçons à une certaine distance (50 centimètres) un carton

$abcd$  opaque, ayant la forme d'un carré d'un décimètre de côté. Tous les rayons qu'il reçoit sont compris dans la figure  $Sabcd$ . Soit  $MN$ , un second carton parallèle au premier et situé

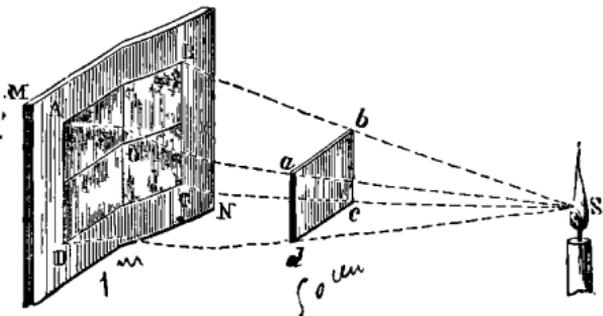


Fig. 27. — Intensité de la lumière.

à une distance de  $S$  égale à un mètre. L'ombre projetée par le premier carton couvrira un carré de 4 décimètres

carrés ABCD. Si on enlève le premier carton  $abcd$ , la lumière qu'il recevait illuminera le carré ABCD, chacun des décimètres carrés qui le composent ne recevra plus que le quart de la lumière qui éclairait  $abcd$ . A surface égale, l'intensité sera réduite au quart lorsque la distance est double; au neuvième, lorsqu'elle est triple. — En général, *le rapport des intensités est inverse de celui des carrés des distances.*

**Réflexion.** — Une bille d'ivoire lancée obliquement sur la bande d'un billard s'en éloigne dans une direction oblique, différente de celle qu'elle suivait avant le choc; on dit qu'elle s'est *réfléchi* sur la bande. — Il en est de même d'une balle qu'on lance contre un mur.

**Lois de la réflexion.** — La lumière en agit de même lorsqu'elle rencontre la surface d'un corps poli, d'un miroir. Un écolier, qui tient à la main un petit miroir éclairé par le soleil, voit les rayons réfléchis former sur un mur une tache lumineuse.

Représentons par MN (*fig.* 28) la trace sur le plan du papier d'un miroir que nous supposons plan et horizontal;

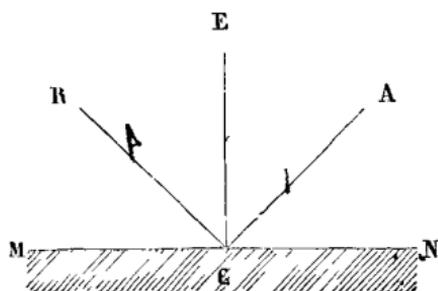


Fig. 28. — Lois de la réflexion.

soit AC un rayon lumineux qui se dirige vers le miroir. Il le rencontre au point C, et s'en éloigne dans la direction CR. AC est le *rayon incident*; CR, le *rayon réfléchi*. Menons la *verticale* CE, qui passe par le point C; elle fait avec la ligne MN un angle droit; elle est *perpendiculaire* au plan

du miroir; on l'appelle quelquefois la *normale*. L'expérience apprend que les deux angles ACE, RCE qu'elle fait avec AC et CR sont égaux. Le premier, ACE, est l'angle d'*incidence*, le second, RCE, l'angle de *réflexion*; ces deux angles sont l'un et l'autre dans un même plan, qui est ici le plan du papier.

La réflexion de la lumière est donc réglée par deux lois.

1° *L'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence.*

2° *Ces deux angles sont contenus dans un même plan perpendiculaire à la surface réfléchissante.*

On peut vérifier, sans grande précision, ces deux lois de la manière suivante :

On installe, sur une petite plate-forme circulaire A (fig. 29) horizontale, un miroir vertical M. On a tracé, en avant du miroir, une demi-circonférence divisée en parties égales, dix-huit, par exemple; une division vaut 10°.

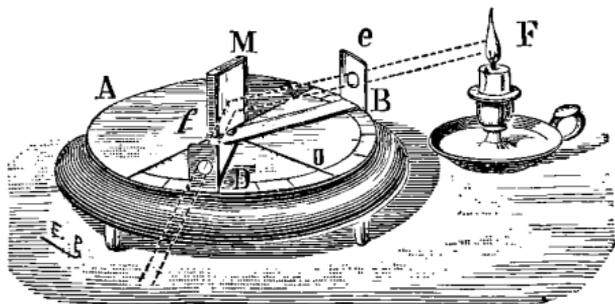


Fig. 29. — Vérification des lois de la réflexion.

Le milieu du miroir est au centre de la circonférence. Deux règles plates, B, D, sont mobiles autour du centre C et se déplacent sur la demi-circonférence; chacune d'elles porte à son extrémité une planchette verticale e, f percée d'un trou placé à la hauteur du milieu du miroir.

On commence par placer la règle B dans une direction perpendiculaire au miroir, ce que l'on reconnaît en éclairant l'orifice B à l'aide du soleil ou d'une flamme F. La lumière qui tombe sur le miroir en traversant cet orifice doit y revenir après sa réflexion et retourner directement vers la flamme.

On détermine ainsi, sur le cercle divisé, la position O de la normale au miroir. La division correspondante du cercle sera marquée 0°, et on désignera par des chiffres d'ordre, 1, 2, 3, etc., les divisions placées à droite et à gauche du 0.

Plaçons la règle B sur la division 4 à droite; disposons toujours l'appareil de telle sorte que la lumière de la flamme traverse l'orifice B pour parvenir au miroir. Tournons alors la règle D jusqu'à ce qu'en appliquant l'œil vis-à-vis de l'orifice qui s'y trouve on puisse voir dans le miroir l'image de la

flamme. On reconnaît que la règle D est alors à la division 4, à gauche.

Ce qui vérifie l'égalité des angles d'incidence et de réflexion. Ces deux angles sont dans un plan horizontal, conformément à la seconde loi.

On peut, à l'aide d'un miroir auxiliaire convenablement incliné, diriger horizontalement les rayons solaires vers le miroir, les faire passer dans l'orifice B et vérifier que les rayons réfléchis traversent l'orifice C quand les deux règles sont placées comme nous venons de le dire, sous cette forme, l'expérience est visible pour tous les élèves d'une classe.

**Miroir plan.** — Les glaces de nos appartements sont des miroirs plans. Nous savons que la réflexion de la lumière

fait voir les objets placés devant une glace comme s'ils étaient transportés par derrière, dans une position symétrique de celle qu'ils occupent réellement.

Un objet AB (fig. 30), par exemple, une flèche ayant cinquante centimètres de hauteur, est placée devant une glace M, à un mètre de distance; celle-ci est mesurée à l'aide d'une règle horizontale AE.

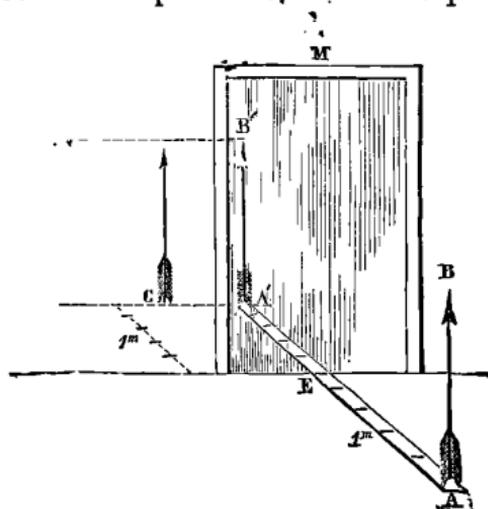


Fig. 30.

Image d'un objet vu dans un miroir plan.

On voit dans la glace l'image A'B' de AB, et celle de la règle. L'image produit, comme grandeur et comme aspect, le même effet qu'une flèche réelle CO de 0<sup>m</sup>,50 de long, placée à un mètre au delà du miroir, et ayant comme AB la pointe en haut.

En un mot, l'image est *droite*, égale en grandeur à l'objet. Elle est *symétrique* de l'objet par rapport au miroir; expliquons ce que nous entendons par là.

**Image d'un point.** — Prenons pour la commodité de la figure un miroir horizontal, et représentons-le par la ligne droite MN (fig. 31). Un point lumineux P se trouve au-dessus, il envoie vers le miroir un faisceau de rayons, tels que PA. Ils se réfléchissent sur le miroir, et parviennent à l'œil de l'observateur. Tous ces rayons prolongés géométriquement derrière le miroir vont passer par un point unique P', c'est là que se trouve l'image du point P. Les lois de la réflexion nous permettent de trouver la position de ce point P'.

Considérons un rayon lumineux quelconque PA, et élevons du point A la normale AD au miroir. Le rayon réfléchi est AC, et les angles CAD, PAD sont égaux. Abaissons du point P la perpendiculaire PB au miroir, et prolongeons le rayon réfléchi AC jusqu'à ce qu'il rencontre en P' cette perpendiculaire.

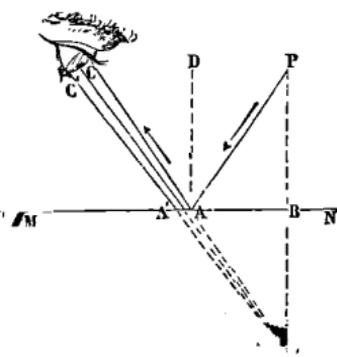


Fig. 31. — Image d'un point.

Les deux triangles PAB, P'AB sont rectangles en B; ils ont le côté AB commun. Les angles PAB et P'AB sont égaux; car P'AB égale CAM comme lui étant opposé par le sommet; et les angles PAB, CAM sont les suppléments des deux angles égaux d'incidence et de réflexion. Ce qui démontre leur égalité.

Les deux triangles sont donc égaux, et par suite les lignes PB et P'B sont égales.

Les points P, P', situés sur une même perpendiculaire au miroir et à égale distance de ce miroir, sont dits *symétriques* l'un de l'autre par rapport au miroir.

Notre démonstration convient à tout rayon lumineux parti du point P, et rencontrant le miroir. Ainsi les rayons lumineux se réfléchissent dans des directions qui vont toutes passer par le point P'.

L'œil de l'homme est tellement conformé, que, s'il reçoit un faisceau de rayons qui se coupent en un même point, il

attribue à celui-ci toutes les propriétés d'un point lumineux. Ainsi, dans un miroir plan, l'œil qui reçoit le faisceau réfléchi AC place en P' la source de lumière, bien que P' soit un point idéal, obtenu en prolongeant géométriquement chaque rayon réfléchi. Mais l'œil reçoit le même faisceau de lumière, soit que le point lumineux soit en P et le miroir en MN; soit que, le miroir étant enlevé, on transporte en P' le point lumineux. On a dans les deux cas même impression sur la rétine, qui est la partie sensible de l'œil, et par suite, même sensation.

**Image d'un objet.** — L'image d'un objet d'une certaine étendue est formée de l'ensemble des images individuelles de chacun de ses points, en ne prenant que ceux qui peuvent envoyer de la lumière au miroir.

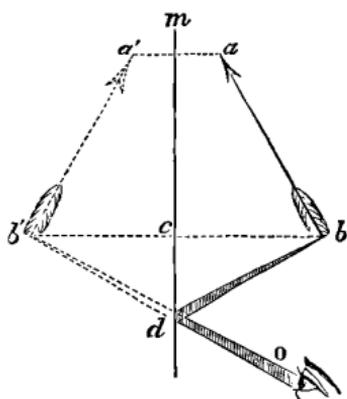


Fig. 32. — Image d'une ligne.

L'image d'une ligne droite lumineuse  $ab$  (fig. 32), vue dans le miroir  $m$ , est une seconde droite  $a'b'$  obtenue en prenant les points  $a'$ ,  $b'$  symétriques des points  $a$ ,  $b$ , par rapport au miroir  $md$ , et joignant ces deux points. Tous les points intermédiaires de  $ab$  auront leurs symétriques, c'est-à-dire leurs images sur  $a'b'$ .

L'image d'une ligne droite lumineuse  $ab$  (fig. 32), vue dans le miroir  $m$ , est une seconde droite  $a'b'$  obtenue en prenant les points  $a'$ ,  $b'$  symétriques des points  $a$ ,  $b$ , par rapport au miroir  $md$ , et joignant ces deux points. Tous les points intermédiaires de  $ab$  auront leurs symétriques, c'est-à-dire leurs images sur  $a'b'$ .

leurs symétriques, c'est-à-dire leurs images sur  $a'b'$ .

**Marche des rayons.** — Si l'on veut tracer sur le papier la marche des rayons qui font voir l'image du point  $b$  à un œil placé en  $O$ , on joint le point  $b'$  aux deux extrémités d'un diamètre de la pupille par deux lignes qui rencontrent le miroir en  $d$ . De ces points d'intersection partent deux lignes qui aboutissent au point  $b$ , elles limitent le faisceau incident.

Si le miroir ne s'étend pas jusqu'en  $d$ , l'œil ne voit pas l'image du point  $b$ .

L'image  $a'b'$  est symétrique de  $ab$ . On observe très bien cette symétrie des objets et de leurs images, en se promenant au bord de l'eau par une soirée calme. Sa surface fait l'office

de miroir, et le ciel, les maisons, les arbres du rivage, nous apparaissent au-dessous de cette surface dans des positions symétriques. Nous ne sommes pas dupes de cette illusion, parce que l'habitude, l'éducation de l'œil, nous apprennent de bonne heure à n'accorder à ces images aucune réalité.

**Spectres de théâtre.** — Il n'en est pas toujours ainsi, et l'on peut se placer dans des conditions propres à favoriser l'illusion, et à mettre notre jugement en défaut.

Imaginez un théâtre sur lequel se trouve une grande glace sans tain, analogue à celles qui ferment la devanture des grands magasins. Elle est inclinée du côté des spectateurs, et on a enlevé au-dessous d'elle le plancher du théâtre.

Dans le creux qui est ainsi formé, se tient un personnage C fortement éclairé par une lampe électrique D (*fig. 33*).

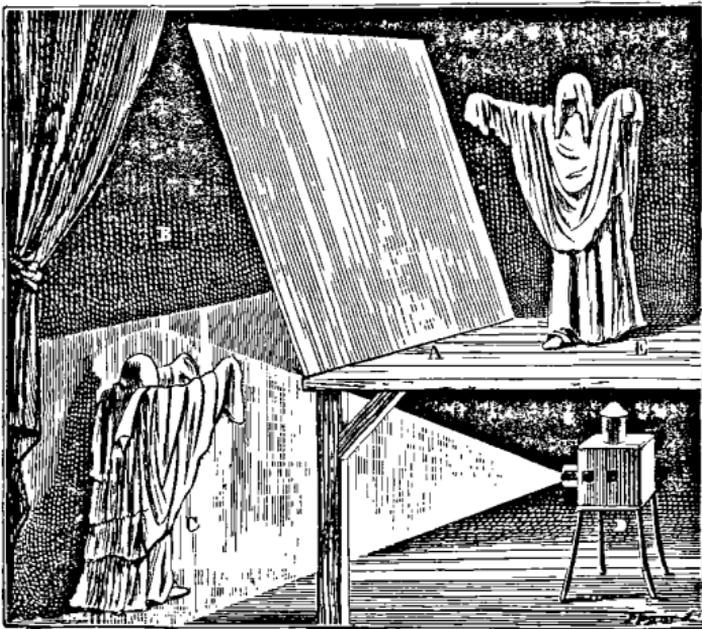


Fig. 33. — Spectres de théâtre.

Les spectateurs ne peuvent le voir directement; ils aperçoivent son image E derrière la glace, elle semble reposer sur le plancher du théâtre.

Nous l'avons dessinée pour en marquer la place ; il faut bien se rappeler que, dans la réalité, il n'y a rien du tout de pareil sur le théâtre, et que c'est dans l'œil même de chaque spectateur que se forme l'image de l'objet.

La salle est, ainsi que le théâtre, dans une obscurité complète ; la glace ne se voit pas et on n'en soupçonne pas la présence. Quand tout est bien disposé, le spectateur ne peut décider par le seul sens de la vue, s'il a devant les yeux un personnage véritable, ou si c'est une vaine image qui impressionne ses nerfs ; l'illusion est complète. L'image paraît ou disparaît, selon que l'on éclaire ou non le personnage véritable.

**Diffusion.** — Les objets qui nous entourent ne sont pas lumineux par eux-mêmes, car ils disparaissent, si on les place dans une salle complètement obscure. Nous les voyons, grâce à la lumière qu'ils reçoivent du soleil ou du ciel éclairé, et qu'ils nous renvoient. Il y a là une réflexion irrégulière, différente par ses effets de celle qui se produit à la surface d'un miroir poli. Cette lumière réfléchie s'éparpille dans tous les sens, et nous en recevons une partie, quelque place que nous occupions autour du corps. La lumière réfléchie par une feuille de papier est faible, si on la compare à celle que nous renvoie dans une direction unique un miroir éclairé par le soleil. On dit que c'est de la lumière *diffuse*.

Nous donnons également ce nom à la lumière qui traverse une feuille de papier ou, en général, un corps translucide. Un nuage nous renvoie de la lumière diffuse, soit qu'il réfléchisse à sa surface la lumière solaire, soit qu'il la transmette au travers de sa masse.

---

## CHAPITRE II

## Miroirs concaves.

**Miroir concave.** — On trouve chez les opticiens, sous le nom de *miroirs à barbe*, des glaces dont la surface est concave. Tel serait un verre de montre dont la surface concave, argentée et polie, réfléchirait la lumière à la manière d'un miroir. Au point de vue géométrique, un tel miroir est une portion de surface sphérique ; le rayon de la sphère est assez grand relativement à l'ouverture du miroir.

Nous le représenterons sur le papier par un arc de cercle

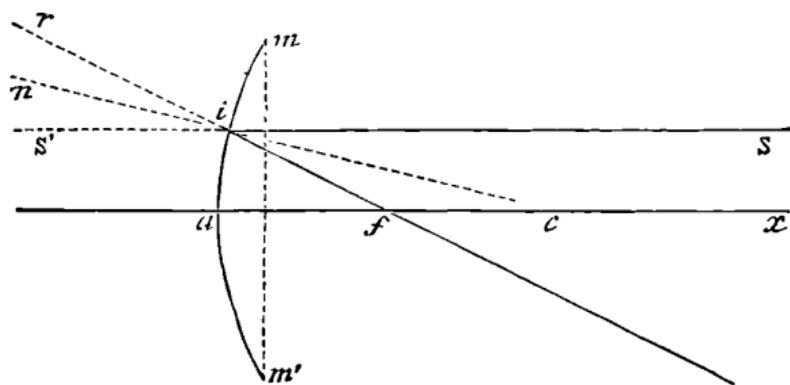


Fig. 34. — Miroirs courbes.

$am'$  (fig. 34), son centre  $c$  est le centre de la sphère. La ligne  $ca$ , qui joint ce centre au milieu  $a$  du miroir, porte le nom d'*axe principal*.

Un rayon  $si$  tombe sur le miroir ; il se réfléchit dans la direction  $if$ . La ligne  $ci$ , qui joint le point d'incidence  $i$  au centre  $c$ , est perpendiculaire au miroir au point  $i$  ; c'est la *normale*. Les trois lignes  $si$ ,  $ci$ ,  $if$  sont dans le même plan,

celui du papier. Les angles *sic* et *cif* sont égaux; l'un est l'angle d'incidence, l'autre l'angle de réflexion.

Si le miroir était poli sur sa surface convexe, et s'il recevait sur cette face un rayon de lumière *s'i*, la normale serait *in* prolongement de *ci*; le rayon réfléchi *ir* serait tel, que l'angle de réflexion *rin* égalerait l'angle d'incidence *s'in*, les deux angles étant encore dans le plan du papier.

L'expérience nous apprend que les rayons partis d'un point lumineux et qui rencontrent le miroir se dirigent, après la réflexion, vers un second point, comme nous l'avons vu pour les miroirs plans. C'est en ce second point qu'une personne voit l'*image* du point lumineux, si elle reçoit une partie des rayons réfléchis par le miroir. Cette propriété est commune aux miroirs concaves et aux miroirs convexes.

Tout point lumineux placé devant un miroir a son image, et tout objet lumineux a la sienne formée par l'ensemble des images de chacun de ses points.

**Foyer principal.** — Nous nous plaçons dans une salle

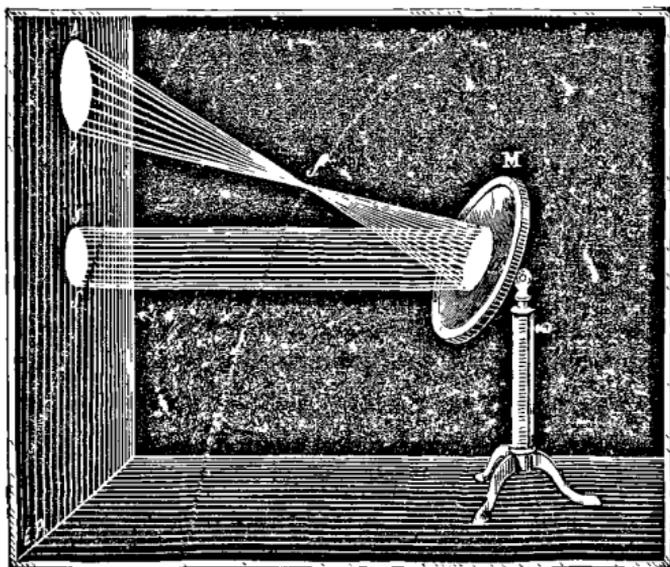


Fig. 35. — Foyer d'un miroir concave.

dont les volets sont fermés. L'un d'eux est percé d'une ouverture circulaire *SS* (*fig. 35*), et un miroir plan convena-

blement placé en dehors de la salle, réfléchit dans une direction horizontale les rayons solaires qui peuvent ainsi passer par l'orifice S. Ils tombent sur le miroir concave M; il les réfléchit dans une direction telle, qu'ils vont former sur le mur opposé une tache lumineuse  $ii'$ . Les poussières qui voltigent dans l'air sont illuminées par la lumière incidente, et par les rayons réfléchis. Elles font voir la forme cylindrique du faisceau incident. Le faisceau réfléchi a l'apparence de deux cônes ou cornets, dont le sommet commun est au point  $f$ .

Si on y place une carte blanche, ces rayons y dessinent un très petit cercle très brillant; c'est l'image du soleil. Il y a là une accumulation de lumière fort remarquable; il y a également accumulation de chaleur. Un morceau d'amadou, une allumette phosphorique brûlent aussitôt qu'on les place au point  $f$ . Un morceau de bois est roussi ou s'enflamme.

Cette expérience nous montre que la chaleur solaire se réfléchit sur un miroir concave, comme le fait la lumière. Les lois de la réflexion sont les mêmes, qu'il s'agisse de la chaleur ou de la lumière; c'est un résultat important à constater.

Le point  $f$  s'appelle le *foyer* du miroir; il change de place, si on change l'inclinaison de l'axe du miroir. Il se trouve toujours sur un rayon de la sphère, et au milieu de ce rayon.

Plaçons le miroir de telle sorte que son axe soit horizontal et passe par le centre de l'orifice S. La tache lumineuse  $ii'$  est alors un cercle concentrique à S. Le foyer est sur l'axe principal auquel sont parallèles les rayons incidents; on lui donne alors le nom de *foyer principal*. De là l'énoncé suivant :

*Tous les rayons lumineux parallèles à l'axe principal d'un miroir concave, et qui s'en écartent très peu, passent après la réflexion par le foyer principal situé sur l'axe au milieu du rayon de courbure du miroir.*

L'expérience qui vérifierait exactement cet énoncé, se ferait en recevant sur un miroir concave la lumière d'une étoile. Les rayons partis de l'étoile peuvent être regardés comme complètement parallèles; les rayons réfléchis passent

alors par un seul point, qui est le foyer principal si la direction des rayons est bien celle de l'axe du miroir.

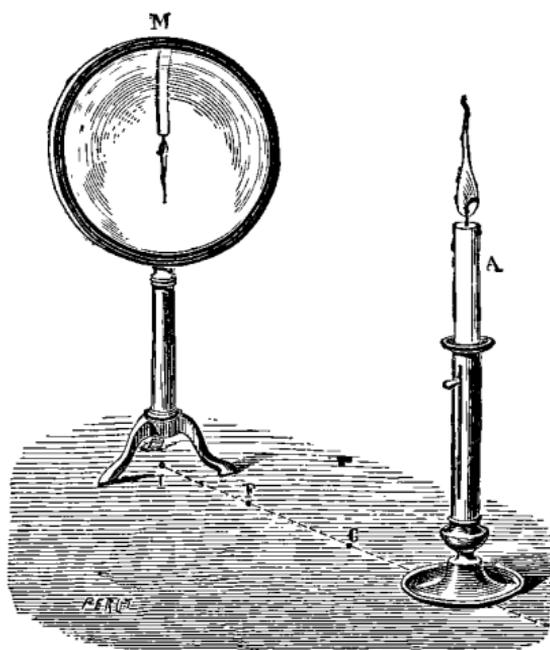


Fig. 36.  
Image d'un objet placé au delà du centre.

### Image d'un objet lumineux. —

Supposons un objet lumineux placé à une distance appréciable d'un miroir concave, et examinons les changements qu'éprouve son image si on fait varier cette distance. Nous prendrons pour objet la flamme d'une bougie A (fig. 36). Supposons-la placée au delà du centre du miroir et assez loin. En regardant dans le miroir, on voit l'image de la flamme renver-

sée et plus petite; elle semble placée en avant du miroir.

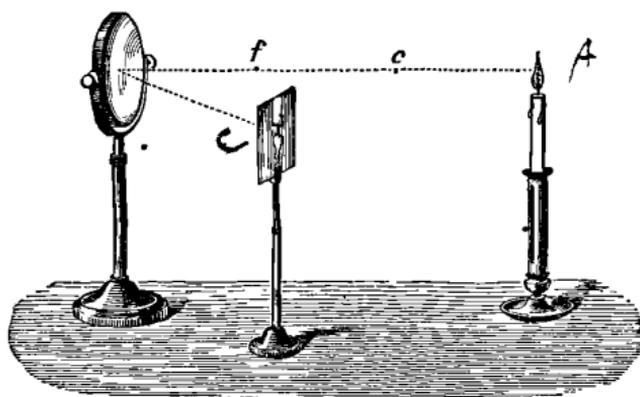


Fig. 37. — Image réelle projetée sur un écran.

Voici comment on s'assure qu'il en est bien ainsi.

L'expérience restant disposée comme nous venons de le dire, on prend un écran *e* (fig. 37), formé d'une feuille de papier tendue sur un cadre de bois, et on le promène entre le foyer

de la flamme et le miroir.

et le centre en faisant en sorte qu'il reçoive le faisceau de rayons réfléchis. On voit, à une certaine place, l'image de la bougie se dessiner sur l'écran, surtout si on opère dans une salle obscure. Chaque point de la flamme a un foyer particulier où se croisent les rayons réfléchis partis primitivement de ce point, ce foyer illumine un point de l'écran. L'ensemble des points du papier ainsi éclairés reproduit l'apparence de l'objet, en le supposant renversé et plus petit.

Il n'est plus nécessaire de recevoir dans l'œil les rayons réfléchis pour voir l'image. Elle est visible sur l'écran de tous les points d'une salle. Ces sortes d'images sont dites *réelles*.

Si le milieu de la flamme est sur l'axe principal du miroir, son image s'y trouve aussi. Si on le place un peu à droite de l'axe, l'image est rejetée vers la gauche. C'est la position que nous avons choisie dans la figure.

L'image grandit et se rapproche du centre *c*, à mesure que l'objet *A* s'en rapproche lui-même.

L'image d'un objet placé au centre se forme également en ce point, elle apparaît renversée immédiatement au-dessous de l'objet.

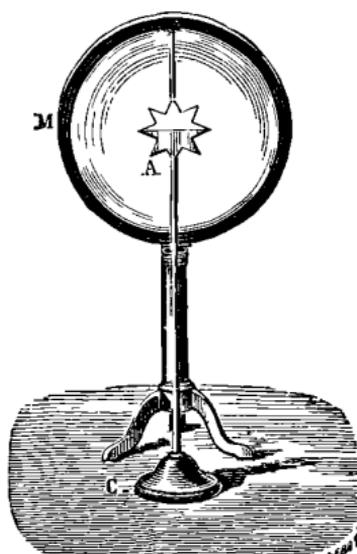


Fig. 38. — Image d'un objet placé au centre.

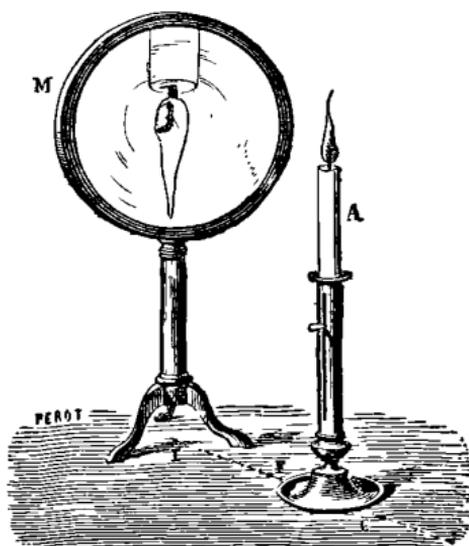


Fig. 39. — Image d'un objet placé entre le centre et le foyer.

On place au centre un morceau de carton A (*fig. 38*), ayant la forme d'une demi-étoile. En regardant de loin dans le miroir, on voit une étoile entière; la partie supérieure est l'image de la partie inférieure.

Rapprochons de nouveau la bougie A (*fig. 39*) du miroir; elle se trouve placée entre le centre et le foyer. En s'éloignant suffisamment, on voit encore une image renversée de la bougie; mais elle est plus grande que l'objet.

On peut recevoir cette image sur un écran; celui-ci doit être placé au delà du centre.

En nous reportant à la figure 37, nous dirons que, si on plaçait en *e* la bougie, il faudrait que l'écran fût en A pour recevoir son image.

L'image grandit à mesure que l'objet se rapproche du miroir. Elle disparaît lorsque la flamme est au foyer. Le miroir, vu de loin, a toute sa surface éclairée et comme lumineuse.

On adopte cette disposition dans les lanternes de voiture, pour projeter au loin la lumière de la flamme qu'elles renferment.

La bougie (*fig. 40*) est-elle entre le foyer et le miroir?

Elle semble, à l'œil, droite, grandie et située derrière le miroir. On ne peut plus la recevoir sur un écran; elle est de la nature des images données par les miroirs plans.

On donne à ces images le nom de *virtuelles*.

#### Miroirs convexes. —

Les boules de verre étamé, si communes dans les foires, sont des miroirs convexes. On y voit une image rapetissée des objets lumineux placés devant elles. Découpons une ca-

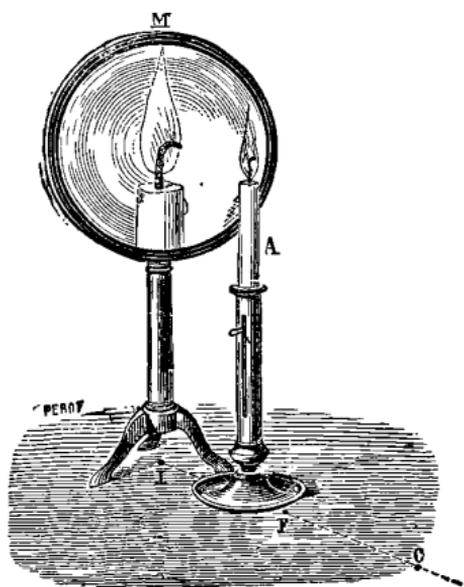


Fig. 40. — Image virtuelle d'un objet placé entre le miroir et le foyer.

lotte dans une telle boule, nous aurons le miroir convexe qui

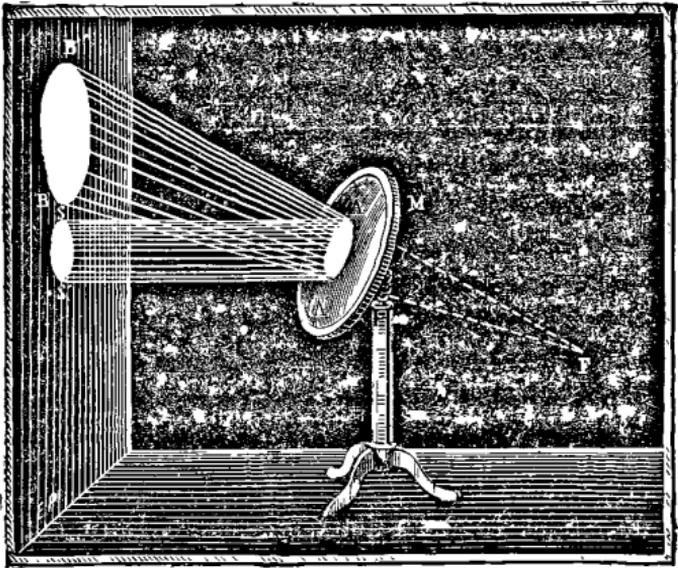


Fig. 41. — Faisceau réfléchi par un miroir convexe.

convient à nos expériences.

Répétons une expérience déjà décrite.

Nous recevons sur un miroir convexe *M* (fig. 41), placé dans une salle obscure, un faisceau horizontal de rayons solaires. Les rayons réfléchis forment un second faisceau qui s'évase à partir du miroir. Il forme sur le mur une tache lumineuse de grandes dimensions. Son sommet pourrait être trouvé géométriquement en prolongeant derrière le miroir les lignes qui représentent les rayons. On aurait en *f* un foyer *virtuel*.

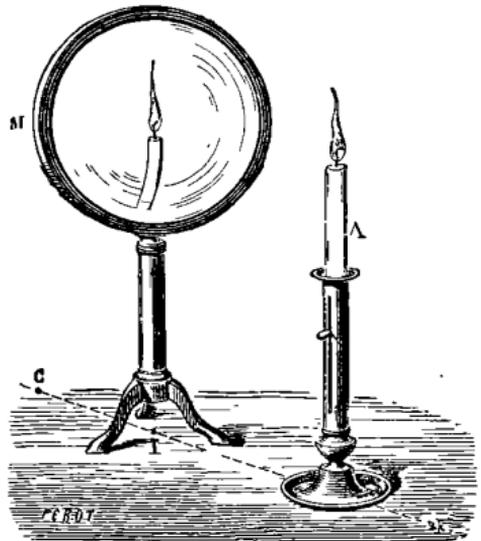


Fig. 42. — Image virtuelle d'un objet dans un miroir convexe.

Si nous regardons dans le miroir M (*fig. 42*) une bougie A, placée au-devant, nous en verrons une image droite rapetissée, et qui semble placée derrière le miroir, elle est virtuelle.

## CHAPITRE III

### Réfraction.

**Phénomènes généraux.** — Deux corps transparents, tels que l'air et l'eau, sont séparés par une surface plane. La lumière qui se meut dans l'air, arrivée à la surface de séparation, se partage en deux faisceaux. L'un est réfléchi, et retourne de bas en haut dans l'air; l'autre pénètre dans le liquide et éclaire les objets qui s'y trouvent.

Ceux-ci nous renvoient, sous forme de lumière diffuse, des rayons qui traversent de nouveau la surface de l'eau; du moins en partie, car il y a encore une portion de la lumière

qui se réfléchit à l'intérieur. Nous pouvons recevoir dans l'œil la portion qui sort de l'eau. Elle nous fait apercevoir les objets immergés, mais le plus souvent, à une place différente de celle qu'ils occupent réellement.

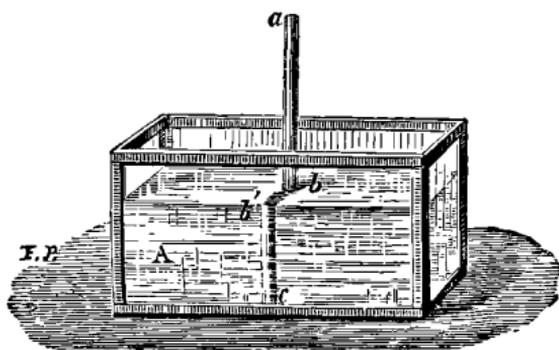


Fig. 43. — Image d'un bâton brisée par la réfraction.

Une cuve à parois de verre A (*fig. 43*) est pleine d'eau. On regarde obliquement une règle verticale *ab*, qui y est plongée. La portion immergée, *b'ce*, n'est plus dans le pro-

longement de la partie extérieure *ab*. La règle semble brisée en deux tronçons.

Enfoncez obliquement un bâton dans un baquet plein d'eau et regardez-le de côté, il semble brisé à la hauteur de la surface liquide. Il ne paraît plus droit; mais la partie immergée fait un angle sensible avec celle qui est dans l'air, comme si l'extrémité du bâton s'était rapprochée de la surface.

On met une pièce d'argent au fond d'une terrine ou d'une tasse, et on s'éloigne jusqu'à ce que les bords du vase cachent complètement la pièce. Une personne verse de l'eau dans le vase, la pièce réapparaît comme si elle s'était soulevée pour se rapprocher réellement de la surface.

On a donné le nom de *réfraction* à la modification qu'éprouve la lumière, lorsqu'elle passe d'un corps transparent dans un autre.

Tous les exemples que nous venons de citer se rapportent à la lumière qui sort de l'eau dans l'air. Occupons-nous de celle qui entre dans ce liquide.

Une cuvette de zinc, peu profonde, a la forme d'un demi-cylindre, fermé en avant par une paroi plane, *ab*.

Au milieu de celle-ci se trouve une fente étroite, *O* (fig. 44), sur laquelle on a mastiqué une

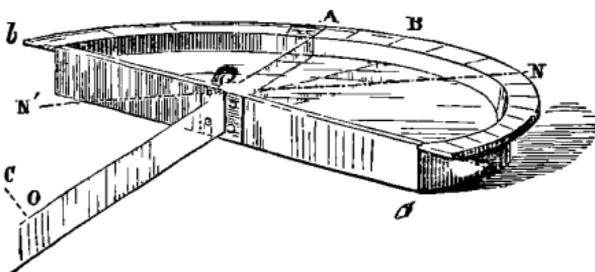


Fig. 44. — Vérification des lois de la réfraction.

lame de verre. La cuvette est en partie pleine d'eau.

Un faisceau horizontal de lumière solaire arrive sur la fente dans la direction *CO* oblique à la paroi *ab*. Une portion de ce faisceau continue sa route dans l'air et forme en *A* une tache lumineuse sur la paroi de la cuvette. Le reste du faisceau pénètre dans l'eau et rencontre la même paroi en *B*. La ligne *OB* est droite, mais elle n'est pas le prolongement de *CO*.

Considérons la ligne  $NN'$  perpendiculaire ou normale à la paroi plane. Elle passe par le point  $N$ , milieu de la demi-circonférence  $bNa$ . L'angle  $NOA$ , égal à  $CON'$ , est l'angle d'incidence des rayons solaires. L'angle  $BON$  est l'angle de réfraction des rayons qui entrent dans l'eau; il est plus petit que le premier.

Nous pouvons donc dire que, lorsqu'un rayon de lumière passe de l'air dans l'eau, l'effet de la réfraction est de le rapprocher de la normale.

Supposons qu'on place en  $B$  une ligne brillante, une aiguille à tricoter bien éclairée, et qu'on veuille la voir au travers de la fente, il faudra placer l'œil non pas dans la direction  $OB$  prolongée, mais dans la direction  $OC$ .

La lumière qui passe de l'eau dans l'air reprend donc la même route que celle qui va de l'air dans l'eau. Dans les deux cas, l'angle des rayons lumineux avec la normale est plus grand dans l'air que dans l'eau.

Il y a un cas où la réfraction disparaît, c'est lorsque le rayon incident est perpendiculaire à la surface de l'eau, il poursuit son chemin dans le liquide sans être dévié.

Ce que nous venons d'énoncer pour l'eau s'applique également au verre. Le verre et l'eau sont dits plus réfringents que l'air.

#### Lois de la réfraction. —

Représentons par une figure plane la cuvette  $aNb$  (fig. 45).  $O$  est le centre du cercle de rayon  $OA$ . Un rayon incident  $CO$  se propage dans l'air jus-

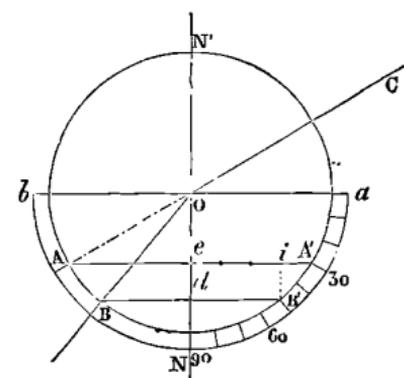


Fig. 45. — Lois de la réfraction.

qu'en  $O$ . Sa direction prolongée rencontre en  $A$  la circonférence du cercle. Le rayon réfracté est  $OB$ ;  $ON$  est la perpendiculaire à la surface plane  $ab$  qui sépare l'air de l'eau. L'angle d'incidence est  $AON$ ; l'angle de réfraction,  $BON$ .

Les distances des points  $A$  et  $B$  à la normale  $ON$  sont les perpendiculaires  $Ae$ ,  $Bd$  abaissées de ces points sur  $ON$ .

L'expérience nous apprend que  $Ae$  vaut les *quatre tiers* de  $Bd$ , si la lumière passe de l'air dans l'eau, et cela, quelle que soit la direction du rayon  $CO$ .

On voit, sur la figure, que  $ei$  qui représente les trois quarts de  $A'e$  est égale à  $dB'$ , ce qui est l'équivalent de ce que nous venons de dire, puisque  $A'e = Ae$  et  $B'd = Bd$ .

Si la lumière passe de l'air dans le verre, la distance  $Ae$  est toujours les *trois demies* de  $Bd$ , quel que soit l'angle d'incidence.

Si le rayon  $OA$  du cercle est égal à l'unité de longueur, les distances  $Ae$ ,  $Bd$ , mesurées avec cette unité, sont appelées par les mathématiciens les *sinus* des angles d'incidence et de réfraction.

Les lois de la réfraction, que l'on appelle les lois de Descartes, sont les suivantes :

1° *Il existe un rapport constant entre les sinus des angles d'incidence et de réfraction. Ce rapport porte le nom d'indice de réfraction.*

Sa valeur change avec la nature des corps traversés successivement par le rayon lumineux. Il est égal à  $4/3$  pour l'air et l'eau,  $3/2$  pour l'air et le verre. Il faut prendre les valeurs inverses de ces rapports  $3/4$  et  $2/3$ , si la lumière passe de l'eau dans l'air, ou du verre dans l'air.

2° *Les deux angles d'incidence et de réfraction sont dans le même plan perpendiculaire à la surface de séparation des deux corps que traverse la lumière.*

**Réflexion totale.** — Un rayon de lumière passe toujours de l'air dans l'eau ou dans le verre. En supposant que son angle d'incidence soit le plus grand possible, très voisin de  $90^\circ$ , ce qui correspond à un rayon qui rase la surface de l'eau, l'angle de réfraction ne sera que de  $48^\circ$  s'il s'agit de l'eau;  $42^\circ$ , si c'est du verre. Ce sont là les valeurs extrêmes des angles de réfraction.

Si la lumière passe de l'eau dans l'air, c'est-à-dire d'un corps plus réfringent dans un autre qui l'est moins, la réfraction n'est pas toujours possible.

Imaginons que la surface de séparation de l'eau et de l'air

soit représentée par la ligne horizontale  $aa'$  (fig. 46), et considérons les rayons qui, partis de tous les points du ciel, aboutissent au même point  $O$  de cette surface. Ils entreront tous dans l'eau, chacun d'eux se rapprochant de la normale  $nn'$  et ils seront tous enfermés dans un cône  $bob'$  dont les arêtes  $ob$ ,  $ob'$  font avec la normale un angle de  $48^\circ$ . L'angle serait de  $42^\circ$ , si on substituait le verre à l'eau. Le dernier rayon  $ob$  correspond à un rayon incident  $oa'$ , rasant la surface.

Si on suppose qu'il y ait dans l'eau un point lumineux,

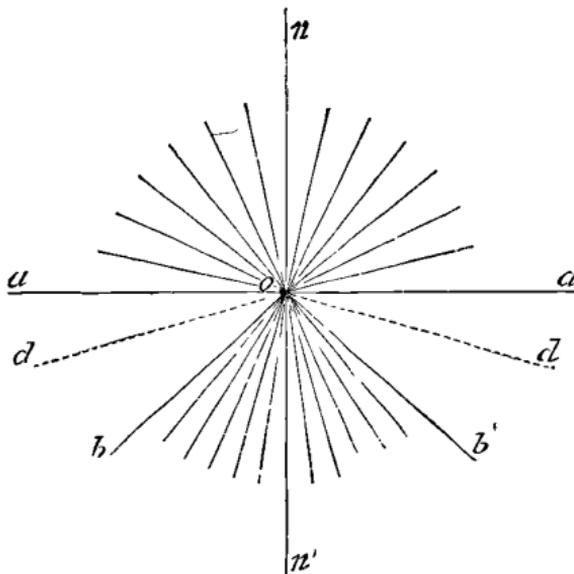


Fig. 46. — Faisceau conique de rayons réfractés.

comme le serait une petite étincelle électrique, qui envoie sa lumière au même point  $O$  et si elle se déplace dans l'intérieur du cône  $bob'$ , le rayon qu'elle envoie est une des lignes pleines tracées sur la figure entre les lignes  $ob$ ,  $ob'$ ; il fait avec  $on'$  un angle plus petit que  $48^\circ$ , il trouve en dehors une ligne qu'il peut suivre, et

qui est le rayon réfracté correspondant.

Si le point lumineux est sur une des lignes extrêmes  $ob$ ,  $ob'$ , le rayon a dans l'air les directions  $oa'$ ,  $oa$  et rase la surface.

Mais, si on transporte le point lumineux au point  $d$ , en dehors de l'angle  $bob'$ , l'angle d'incidence du rayon  $od$  est plus grand que  $48^\circ$ , il est par exemple  $60^\circ$ . Il ne correspond plus à aucun rayon situé dans l'air. Il n'y a plus de rayon réfracté et la lumière ne peut sortir de l'eau par le point  $O$ .

La réfraction est impossible; le rayon  $od$  se réfléchit alors

au point  $O$  comme il le ferait sur un miroir plan, et il s'éloigne de la surface dans la direction  $od'$ ; les angles  $don'$  et  $d'on'$  sont égaux, d'après la loi de la réflexion. La lumière passe tout entière du rayon  $do$  au rayon  $d'o$  sans s'affaiblir. On dit que la réflexion est *totale*, pour la distinguer de celle qu'éprouve un faisceau lumineux lorsqu'il passe de l'air dans l'eau. Il y a encore réflexion, mais elle est *partielle*; elle n'atteint pas, naturellement, la portion du faisceau qui pénètre dans l'eau.

Une bulle d'air qui monte du fond de l'eau à la surface prend un éclat argentin par suite de la réflexion totale. Les rayons qui se réfléchissent ainsi sont ceux qui ont été réfractés à la surface du liquide en pénétrant de l'air dans l'eau et qui rencontrent la surface de la bulle sous une incidence supérieure à  $48^\circ$ .

**Prisme.** — Ce qu'on appelle *prisme*, en optique, est ordinairement un morceau de verre limité par trois faces planes qui se coupent deux à deux suivant des lignes parallèles appelées *arêtes*; ces faces sont polies. Tout plan perpendiculaire aux arêtes est une *section droite* du prisme; c'est un triangle.

Dans ce qui va suivre, nous supposons que le rayon incident et le rayon réfracté sont l'un et l'autre dans la même section droite.

Le prisme  $P$  (*fig. 47*) est d'ordinaire porté par une garniture métallique mobile autour d'une charnière  $a$ , ce qui permet de rendre ses arêtes verticales ou horizontales. On peut, en outre, le faire tourner sur lui-même à l'aide du bouton  $b$ .

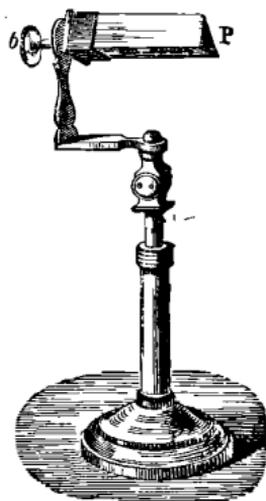


Fig. 47. — Prisme.

Nous allons chercher quelle est la marche des rayons lumineux qui traversent un prisme.

Soit  $ABC$  (*fig. 48*) la section droite du prisme,  $S$  un point lumineux, et  $IS$  un rayon incident.

Il rencontre la face AB au point I; la normale, à cette face, est  $nm$ . Le rayon SI, passant de l'air dans le verre, prend une direction IJ plus voisine de la normale. Arrivé en J sur la face AC, il doit sortir du verre en s'écartant de la normale  $n'm'$ ; soit OJ la nouvelle direction qu'il prend.

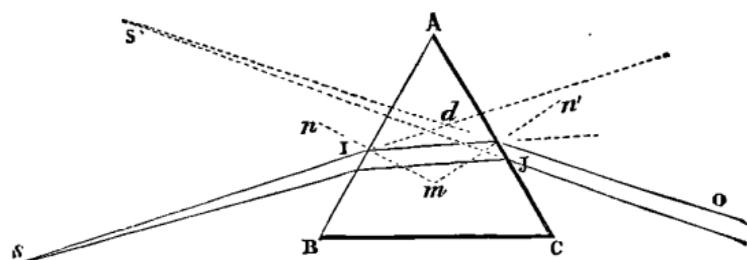


Fig. 48. — Marche des rayons dans le prisme.

Supposons qu'il parte du point S un faisceau de rayons très voisins de SI, chacun d'eux subira comme le premier une double déviation : l'une à l'entrée du prisme, l'autre à la sortie; et les rayons, tels que OJ, prolongés géométriquement de droite à gauche, se rencontreront sensiblement en un point S'. C'est en ce point que l'on verra le point S, si l'œil reçoit le faisceau OJ qui sort du prisme.

Les deux directions SI et JO du rayon à l'entrée du prisme et à sa sortie font un angle  $SdS'$ ; on le prend pour mesure de la *déviatio*n qu'il a éprouvée en traversant le prisme.

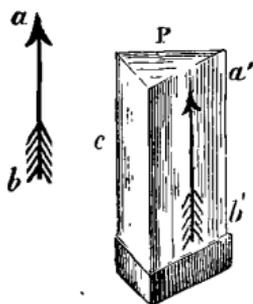


Fig. 49. — Image virtuelle donnée par un prisme.

La figure 49 montre le changement apparent qui s'opère dans la position de l'objet  $ab$  vu au travers du prisme. L'observateur regarde dans la face ombrée et l'image  $a'b''$  lui apparaît non dans le prisme comme semble l'indiquer la figure, mais bien au delà, et rejeté vers le sommet du prisme. La flèche est colorée sur les bords; nous reviendrons plus loin sur cette coloration.

**Réflexion totale.** — En se plaçant devant la face  $c$  du prisme, on peut voir parfois une nouvelle image de  $ab$ .

Elle est, cette fois, incolore et très brillante. Les rayons qui la forment ont subi dans le prisme la réflexion totale.

Représentons encore le prisme par sa section principale ABC (*fig. 50*); soit *sa* le rayon qui entre par la face AB; *ab* le rayon réfracté correspondant. Si l'angle *abn* qu'il fait avec la normale *nb* menée à la face AC est plus grand que  $42^\circ$ , ce rayon se réfléchit totalement sur cette face, et prend la direction *bec*; il peut alors sortir par la face BC en suivant la ligne *cd*. La face AC donne alors une

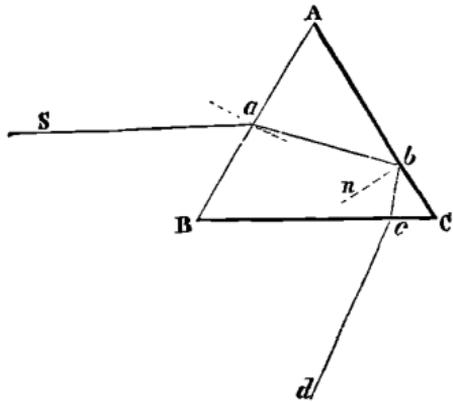


Fig. 50. — Réflexion totale.

Cette image a beaucoup d'éclat. On remplace parfois, dans les instruments d'optique, un miroir plan par un petit prisme donnant la réflexion totale.

## CHAPITRE IV

### Lentilles.

**Lentilles.** — Une *lentille* est un corps transparent, ordinairement le verre, limité par deux surfaces sphériques.

Ces surfaces ont chacune un centre. La ligne qui joint les deux centres s'appelle l'*axe principal* de la lentille.

Un plan mené par cet axe coupe la lentille en deux parties symétriques. Nous représentons ici les sections qu'il fait dans l'épaisseur du verre.

Les lentilles sont *convergentes* ou *divergentes*. Les pre-

mières, exposées au soleil, font converger les rayons lumineux vers un point, appelé *foyer*, qui est *réel*, comme nous l'avons vu à propos des miroirs concaves. Leur épaisseur est



Fig. 51. — Lentilles.

plus grande sur l'axe que près des bords. Telles sont (fig. 51) la lentille *biconvexe a* dont les deux faces sont convexes à l'extérieur; la lentille *plan-convexe b*, qui a une face plane et une convexe; la lentille *convexe-concave c*, une des faces est convexe, l'autre concave.

Les rayons solaires qui ont traversé une lentille divergente s'écartent les uns des autres, et leur foyer est virtuel. Telles sont les lentilles *biconcaves a'*, *plan-concaves b'* ou *concaves-convexes c'*. Leur épaisseur est plus grande sur les bords qu'au milieu. Elles agissent comme des miroirs convexes.

**Lentilles convergentes.** — Une lentille bicon-

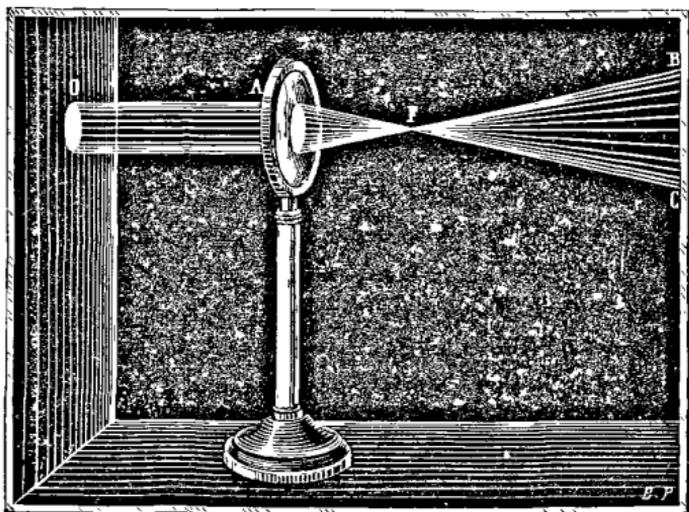


Fig. 52. — Foyer principal d'une lentille convergente.

vexe A (fig. 52), placée verticalement dans une chambre obscure, reçoit un faisceau horizontal de rayons solaires qui pénètre par l'orifice O percé dans un volet.

On voit, par l'illumination des poussières qui voltigent

dans l'air, le faisceau cylindrique des rayons incidents transformé par la lentille en un double cône de rayons réfractés. Le sommet commun  $F$  de ces cônes est le *foyer principal* de la lentille.

Nous le définirons : *le point de l'axe principal par où passent tous les rayons réfractés par la lentille, lorsqu'ils proviennent de rayons incidents parallèles à l'axe et peu éloignés de cet axe.*

Cette dernière condition est nécessaire, car les rayons solaires qui tombent sur les bords d'une lentille un peu large ne passent plus par le foyer ainsi défini.

La distance du foyer à la lentille, la *distance focale*, change avec la nature de la lentille (verre, eau, cristal de roche) et aussi, pour la même substance (le verre), avec la courbure de ses faces. Elle diminue avec les rayons des surfaces sphériques qui limitent la lentille. Il y a deux foyers, l'un à droite, l'autre à gauche, suivant que la lumière solaire tombe sur l'une ou l'autre face de la lentille.

La lumière se trouve concentrée au foyer. Si on reçoit le faisceau réfracté sur un carton blanc qu'on éloigne progressivement de la lentille, on voit une portion circulaire de ce carton illuminé; son diamètre diminue à mesure qu'on s'approche du foyer; il grandit de plus en plus une fois qu'on l'a dépassé. Au foyer même, cette portion se réduit à un petit cercle, très brillant, qui est une image réelle du soleil.

La lumière d'une étoile, concentrée au foyer, ne marquerait qu'un point brillant sur l'écran.

La chaleur solaire est concentrée également au foyer; en y plaçant un morceau d'amadou, une planche noircie, on les voit brûler.

Ainsi, la chaleur rayonnante lumineuse se réfracte, comme la lumière, en traversant le verre et d'après les mêmes lois. L'expérience nous apprend qu'il en serait de même de la chaleur obscure.

Si la lumière solaire tombe sur la lentille dans la direction  $os'$  oblique à l'axe  $OF$  (*fig.* 53), le foyer des rayons réfractés se fait en  $f$ ; la ligne  $of$ , prolongée jusqu'au soleil,

passerait par le centre de cet astre. C'est un axe *secondaire*, de même que  $f$  est un *foyer secondaire*. Tous ces foyers sont dans un plan perpendiculaire à l'axe au point F. On l'appelle le *plan focal* de la lentille.

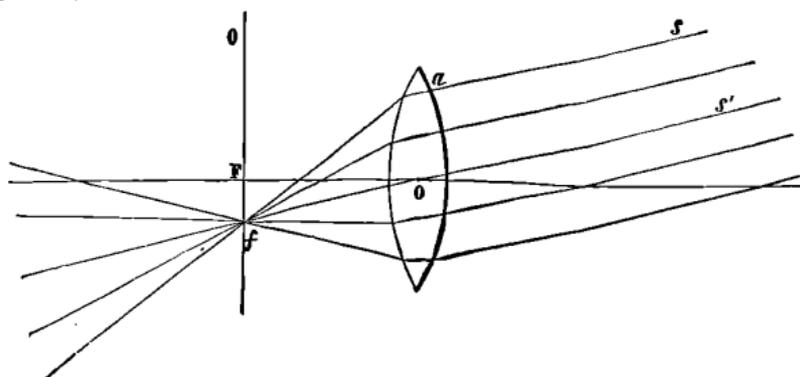


Fig. 53. — Plan focal.

Les rayons solaires étant supposés faire de très petits angles avec l'axe principal, les distances focales secondaires sont sensiblement égales à la distance focale principale.

Tous les axes secondaires, tels que OF,  $of$ , qui traversent la lentille sans éprouver de déviations, passent par un point O, que l'on appelle le *centre optique*.

**Marche d'un rayon dans une lentille.** — Il est bon

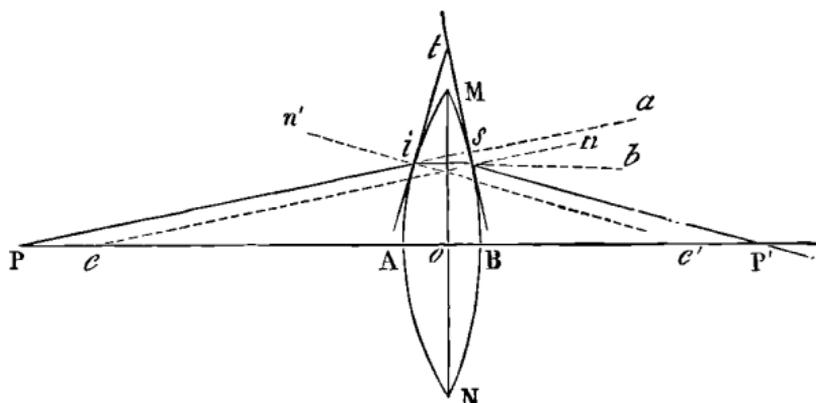


Fig. 54. — Marche d'un rayon dans une lentille convergente.

de se rendre compte de la route que suit un rayon de lumière qui traverse une lentille MN (fig. 54). PP' est son axe, o son

centre optique,  $c$ ,  $c'$  les centres de courbure, c'est-à-dire les centres des surfaces sphériques représentées par les deux arcs MAN, MBN. Un point lumineux P est sur l'axe; il envoie un rayon qui rencontre en  $i$  la face MAN; la normale en  $i$  est  $c'in'$ . Le rayon entrant de l'air dans le verre prend une direction  $isb$  plus rapprochée de la normale.

Il rencontre en  $s$  la face de sortie MBN, et, en passant dans l'air, il prend une direction  $sP'$ , plus écartée de la nouvelle normale  $cn$ . La lentille dévie ce rayon lumineux comme le ferait un prisme dont les faces  $it$ ,  $ts$  toucheraient en  $i$  et en  $s$  ces deux surfaces.

L'expérience montre que tous les rayons voisins de l'axe qui partent du point P et qui traversent la lentille passent par le point P' et réciproquement.

Les points P et P', dont l'un est l'objet et l'autre l'image, sont appelés *foyers conjugués*.

La lentille donne une image réelle ou virtuelle de tout point lumineux. L'image d'un objet lumineux est l'ensemble des images de chacun de ses points. Nous allons recourir à l'expérience pour décrire ces images.

**Images d'un objet.** — Lorsqu'on regarde au travers d'une lentille un objet lumineux ou éclairé, très éloigné, on le voit renversé et très petit.

Cette image est *réelle* et peut se peindre sur un écran blanc placé derrière la lentille, à l'opposé de l'objet.

C'est ce que nous avons déjà vu avec un miroir concave. L'image est située un peu au delà du foyer principal.

Elle s'en éloigne et grandit si l'objet se rapproche de la lentille. Lorsque l'objet est à une distance de la lentille double de la distance focale, son image se trouve, de l'autre côté, à une distance égale, et elle a la grandeur de l'objet.

Si l'objet, une flamme de bougie BS (*fig. 55*), se place entre le foyer et le double de la distance focale, son image s'éloigne et grandit de nouveau. Elle peut encore être reçue sur un écran B'S'; elle est réelle, renversée et plus grande que l'objet.

On cesse de l'apercevoir lorsque la flamme est dans le

plan focal de la lentille, il n'y a plus d'image; les rayons qui

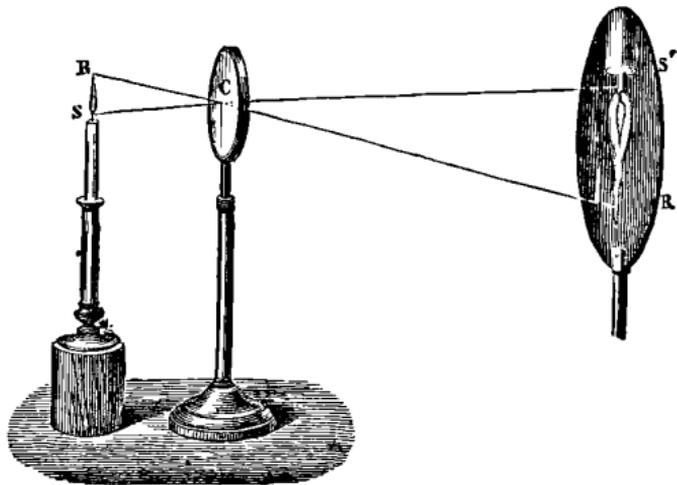


Fig. 55. — Image réelle projetée sur un écran.

sont émis par un point de la flamme sortent de la lentille dans des directions parallèles.

L'image reparaît quand la bougie est placée entre le foyer et la lentille; mais, pour la voir, il faut recevoir directement dans l'œil les rayons qui sortent de celle-ci; c'est une image *virtuelle* qui ne peut plus être reçue sur un écran; elle est droite et plus grande que l'objet (*fig. 56*).

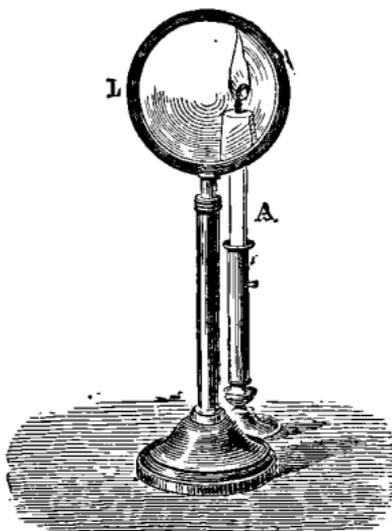


Fig. 56. — Image virtuelle donnée par une lentille convergente.

En résumé : marquons sur l'axe, de chaque côté de la lentille, deux points, l'un au foyer principal, l'autre au double de la distance focale.

1° L'image d'un objet est réelle et renversée tant que sa distance à la lentille est plus

grande que la distance focale. Elle est virtuelle et droite dans le cas contraire.

2° L'image est plus petite que l'objet s'il se trouve au delà du double de la distance focale. Elle a la grandeur de l'objet s'il est au double de la distance focale. Elle est plus grande que l'objet situé entre le double de la distance focale et la lentille.

**Phares.** — Lorsqu'on place une flamme au foyer d'une lentille convergente, les rayons lumineux qui la traversent forment, à la sortie, un faisceau de rayons parallèles à l'axe, qui peut se propager au loin sans s'affaiblir. On utilise cette propriété pour l'éclairage des côtes.

Un phare est une tour élevée au sommet de laquelle on place une source puissante de lumière : une très grosse lampe, ou un appareil électrique.

Cette source se trouve au foyer de très grandes lentilles de verre. La lumière qu'elles transmettent parvient à une grande distance de la côte et guide les marins dans leurs manœuvres.

**Lentilles divergentes.** — Une lentille biconcave A (fig. 57), placée dans une chambre obscure sur le trajet d'un faisceau horizontal de rayons solaires, le transforme en un cône divergent de rayons BC.

Le point de rencontre de tous ces rayons prolongés géométriquement est à gauche de la lentille. C'est un foyer *virtuel*.

**Marche des**

**rayons.** — Soit une lentille biconcave MN (fig. 58) ; C et C'

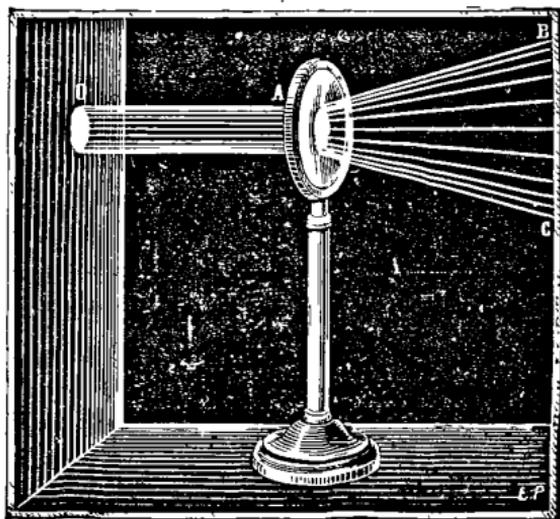


Fig. 57. — Faisceau solaire rendu divergent par une lentille concave.

sont les rayons de courbure, et  $CC'$  est l'axe principal. Un rayon  $RI$  tombe sur la lentille en un point  $I$  qui a pour normale la ligne  $CI$ ; il s'en rapproche en entrant dans le

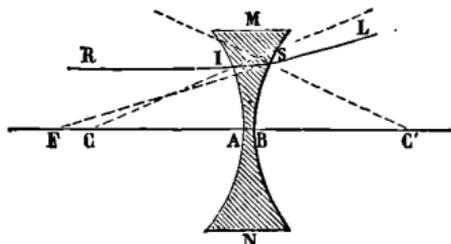


Fig. 58. — Marche d'un rayon dans une lentille divergente.

verre et atteint la seconde face dans la direction  $IS$ . La normale au point  $S$  est  $C'S$ ; le rayon s'en éloigne en sortant du verre, et suit la ligne  $SL$ . Cette ligne prolongée rencontre l'axe au point  $F$ . Ce sera le foyer principal de la lentille, si, comme le montre la figure,  $RI$  est parallèle à l'axe. Ce foyer est évidemment virtuel.

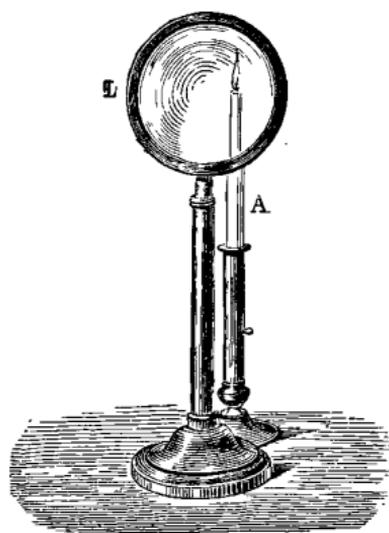


Fig. 59. — Image virtuelle donnée par une lentille divergente.

Images.—La lentille donne des images virtuelles des points ou des objets lumineux qui sont placés devant elles. Ces images sont droites, plus petites que l'objet; elles paraissent situées de son côté et ne peuvent être reçues sur un écran; elles sont *virtuelles*. La figure 59 montre l'aspect que prend une bougie vue au travers d'une lentille biconcave. Il se forme dans l'œil de l'observateur une image qui conviendrait à une bougie, de dimensions plus petites que la bougie réelle placée à une distance moindre, et qu'il verrait directement, sans l'interposition de la lentille.

## CHAPITRE V

## Composition de la lumière blanche.

Newton<sup>1</sup> a établi, par une série d'expériences admirablement conduites, que la lumière solaire est composée d'une infinité de lumières diversement colorées.

**Décomposition de la lumière solaire.** — Un faisceau horizontal de lumière solaire pénètre dans une salle obscure par un orifice étroit, ou mieux par une fente hori-

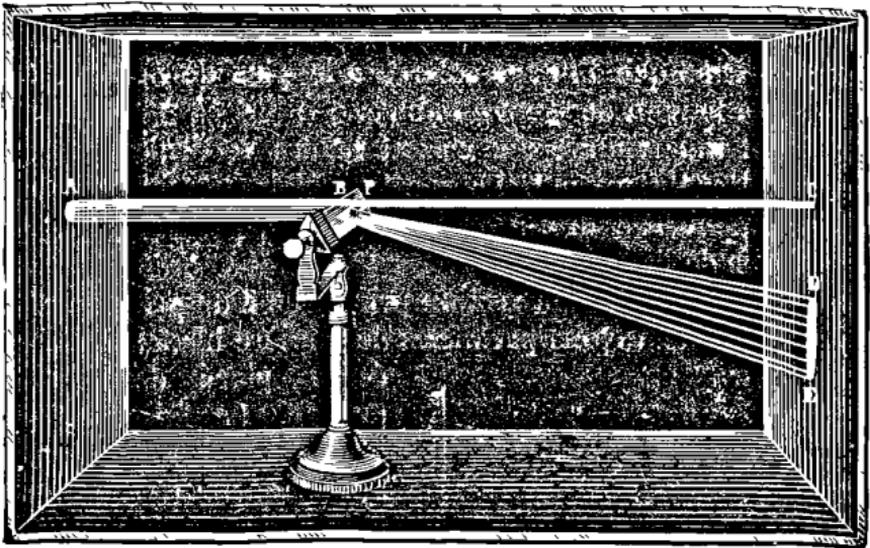


Fig. 60. — Décomposition de la lumière blanche.

zontale étroite A (fig. 60). Il se forme sur le mur opposé une tache lumineuse c ronde ou allongée selon la forme de l'ouverture.

Il y a avantage à disposer sur le trajet du faisceau une

1. Newton (Isaac), né dans le comté de Lincoln, en 1642, mort en 1723.

lentille convergente qui donne sur le mur une image nette, réelle, de la fente.

Au delà de cette lentille, on place un prisme de verre P dont les arêtes sont horizontales; le sommet tourné vers le haut. Nous avons supposé sur la figure qu'il rencontre une partie du faisceau. La lumière qui le traverse est déviée, et forme sur le mur une tache lumineuse DE. Cette tache n'est plus blanche; mais, en allant de bas en haut, on y distingue successivement les couleurs :

*Violet, indigo, bleu, vert, jaune, orangé, rouge.*

Lorsqu'on fait tourner le prisme sur lui-même, on voit cette image se rapprocher de l'image de la fente formée en *c* par les rayons qui n'ont pas traversé le prisme, puis elle s'en éloigne. Il y a une position du prisme pour laquelle la *dévi*ation des rayons est la plus petite possible. C'est dans cette position que l'image colorée a le plus de netteté. On lui donne le nom de *spectre solaire*.

Il vaut mieux, dans une classe, rendre verticales la fente et les arêtes du prisme. Le spectre solaire est alors rejeté horizontalement à droite ou à gauche du point C, et il est plus facile de le voir.

Soit ABC (*fig. 61*), la section principale d'un prisme; *abef* un faisceau de rayons parallèles de lumière blanche; E, un écran placé derrière le prisme. Le faisceau, s'il n'eût pas traversé le prisme, aurait rencontré l'écran au point *i*, et aurait alors formé en ce point une tache blanche. Les rayons se réfractent en entrant dans le prisme, et forment un fais-

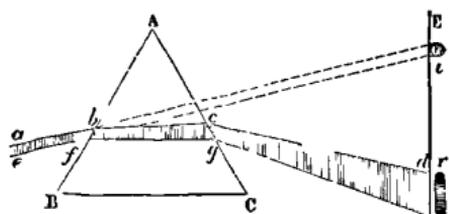


Fig. 61. — Décomposition d'un faisceau de lumière blanche.

ceau *bfcg* qui, à la sortie, se trouve dévié de nouveau et prend la forme *cgdh*. Il est formé de rayons divergents. Ceux qui sont le plus fortement déviés *gh* sont les violets : les rayons rouges éprouvent la déviation la plus faible, et prennent la

direction *cd*. Les autres couleurs se placent entre ces deux extrêmes. Le spectre solaire se forme donc entre les points *d* et *h* de l'écran.

Les couleurs voisines sont fondues l'une avec l'autre. On passe insensiblement du rouge à l'orangé..., du jaune au vert, etc. Il y a dans le spectre une infinité de jaunes, pour ne citer qu'un groupe, depuis la couleur du bouton d'or jusqu'au jaune verdâtre des jeunes pousses du printemps.

On peut dire qu'il y a dans la lumière blanche du soleil une infinité de couleurs comprises entre le rouge et le violet.

Ce dernier est plus fortement dévié par le prisme que le rouge. On exprime ce fait en un langage un peu plus scientifique, en disant que le violet est plus *réfrangible* que le rouge.

Dans l'acte de la réfraction, si deux rayons : l'un rouge, l'autre violet, rencontrent la surface du verre ou de l'eau, sous la même incidence, le rayon violet se rapproche plus de la normale que le rouge, s'il passe de l'air dans le verre; il s'en écarte plus, s'il sort du verre dans l'air.

On dit que les rayons colorés du spectre sont simples parce qu'ils se conservent tels qu'ils sont, sans être altérés par une nouvelle réfraction ou par la réflexion. Un petit faisceau rouge ne donne pas d'autre couleur, et reste rouge si on le reçoit sur un miroir qui le réfléchit ou s'il traverse un prisme, une lentille.

**Couleurs des corps.** — On reçoit le spectre solaire sur un écran couvert de drap ou de papier rouge. Toutes les couleurs sont éteintes, sauf le rouge qui brille d'un vif éclat; un écran de drap vert éteint au contraire le rouge et fait briller le vert. Un écran de drap noir ne renvoie aucune couleur; un drap blanc n'altère au contraire aucune des couleurs du spectre et les renvoie toutes par diffusion.

Les corps ne sont visibles que par la lumière qu'ils diffusent. S'ils nous renvoient indifféremment tous les rayons colorés du spectre, ils paraissent blancs; s'ils n'en renvoient aucun, ils sont noirs; s'ils ont la propriété d'éteindre

certains rayons et d'en diffuser d'autres, ils sont *colorés*.

Les corps transparents sont, de même, incolores ou colorés, selon qu'ils se laissent traverser également bien par tous les rayons colorés du spectre, comme le verre blanc; ou selon qu'ils font une sorte de triage, laissant passer, par exemple, les rayons rouges et jaunes, arrêtant les rayons verts et bleus.

Observez un paysage au travers d'un verre rouge, les fleurs rouges brillent d'un grand éclat; les fleurs blanches paraissent rouges, le ciel bleu, les feuilles vertes sont plus ou moins sombres ou noires.

Les rayons de lumières artificielles émises par les lampes, les becs de gaz, donnent, en traversant un prisme, des spectres qui sont moins complets que le spectre solaire. Il y manque surtout une certaine proportion de rayons bleus et violets.

Les flammes sont dès lors jaunâtres ou rouges, et les étoffes colorées changent d'aspect, selon qu'on les éclaire par la lumière du jour ou par celle d'un bec de gaz.

**Recomposition de la lumière.** — Le blanc est la sensation produite par le mélange de toutes les couleurs du spectre.

Le prisme qui reçoit la lumière blanche sépare les couleurs en leur assignant des places distinctes dans le faisceau qui le traverse. Si on venait à diriger tous les rayons de ce faisceau vers un seul point, ce point paraîtrait blanc.

Nous opérons encore dans l'obscurité, et le prisme P (*fig. 62*) reçoit un faisceau de lumière horizontal solaire  $Aa$ ; la partie  $ab$  qui sort du prisme est colorée, et rencontre une lentille convergente L qui dirige ces rayons colorés vers un point  $c$  où ils se croisent, puis ils continuent leur marche à partir de ce point en divergeant de nouveau. Si on place un écran E en avant du point  $c$ , on voit sur l'écran l'image d'un spectre dans lequel le rouge est en haut, et le violet en bas; au delà du point  $c$ , l'écran reçoit un nouveau spectre présentant le violet en haut, et le rouge en bas. Les rayons se sont croisés en  $c$ . Plaçons-y l'écran, nous y verrons une

tache blanche *c* produite par le mélange de toutes les couleurs qui s'y croisent en chaque point.

Cette tache est l'image que la lentille donne de l'espace blanc *a* formé sur la face de sortie du prisme par la lumière qui l'a traversé.

En mettant une carte au foyer de la lentille, on aurait un spectre très pur. Si la carte intercepte une portion du faisceau coloré, les rayons rouges et orangés, la tache *c* qui se forme sur l'écran *E* cesse d'être blanche et prend une couleur verte. Elle aurait une teinte rouge, si on avait intercepté les rayons bleus et violets, ce qui prouve bien que cette tache n'est blanche que si elle est illuminée en même temps par tous les faisceaux colorés qui sortent du prisme.

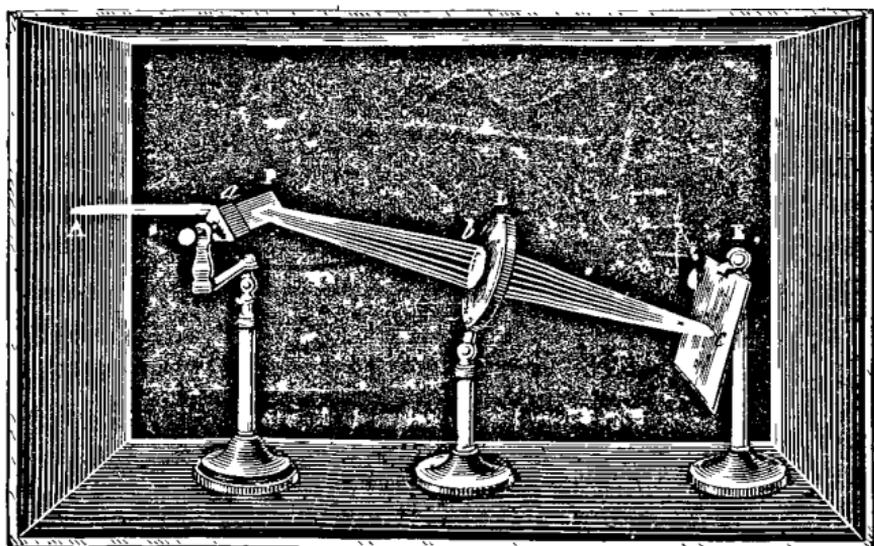


Fig. 62. — Recomposition de la lumière blanche à l'aide d'une lentille.

Deux teintes sont dites *complémentaires* lorsque leur mélange donne du blanc. Les teintes *rouge, orangé, jaune* ont pour complémentaires des teintes *vert, bleu ou violet*.

On peut encore montrer l'effet du mélange des couleurs à l'aide de l'expérience suivante, qui est cependant moins nette que la précédente.

On colle sur un disque de carton des papiers colorés

taillés en secteurs. Leur ensemble rappelle la disposition des couleurs du spectre. C'est dire assez que l'on a sept secteurs dont les couleurs vont du rouge au violet et qui se succèdent comme dans le spectre.

On fait tourner vivement ce disque autour d'un axe perpendiculaire à son plan. Les couleurs se mêlent, disparaissent, et font place à une teinte grise uniforme qui couvre le disque.

On réalise facilement cette expérience en collant le disque D sur une toupie d'Allemagne T, que l'on fait tourner à l'aide d'une ficelle (*fig. 63*).

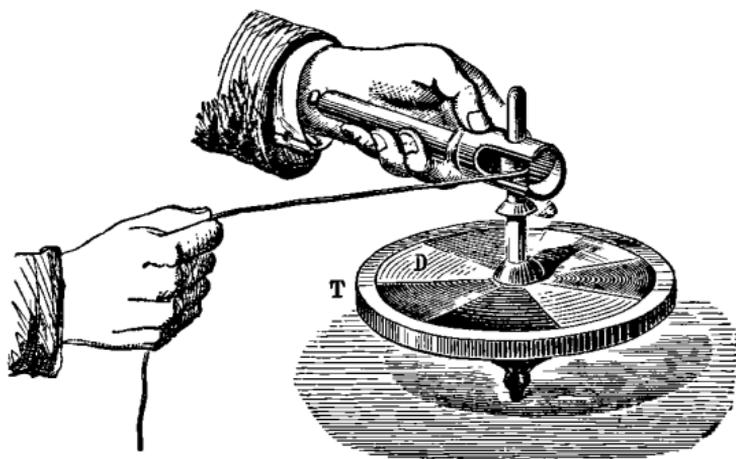


Fig. 63. — Disque coloré de Newton.

Pour se rendre compte de cette expérience, il faut savoir que la sensation produite dans notre œil par un éclat subit de lumière, un éclair, persiste pendant un dixième de seconde.

Lorsqu'on agite vivement un charbon rouge, on voit un ruban de feu ; parce que le charbon en se déplaçant envoie de la lumière qui ébranle en différentes places la membrane sensible de l'œil. Par suite de la persistance des sensations, on voit briller simultanément tous les points par lesquels le charbon a passé pendant un dixième de seconde.

S'il n'existait sur le disque recouvert de papier noir qu'un

seul secteur coloré en rouge D, on le verrait de même dans toutes les positions que la rotation lui donne, et le disque entier prendrait une couleur rouge. Nous en dirons autant pour chacun des sept secteurs. Le disque paraîtra d'après cela revêtu en même temps des sept couleurs principales du spectre.

L'impression résultante serait le blanc, si les couleurs des papiers reproduisaient exactement celles du spectre; il n'en est rien, et l'on voit un blanc affaibli, c'est-à-dire du gris.

Les faits de décomposition de la lumière solaire en riches couleurs ne sont pas rares.

On l'observe dans les girandoles des lustres qui sont composées de morceaux de verre taillés à facettes, et formant de véritables prismes; ils lancent des éclats de lumière verte ou rouge, pour ne citer que les couleurs les plus visibles, lorsque les bougies du lustre sont allumées.

On voit de pareils éclats dans les gouttes de rosée éclairées par le soleil; ils tiennent à la même cause. La lumière qui pénètre dans ces gouttes s'y trouve décomposée, elle se réfléchit à l'intérieur et nous revient colorée.

L'arc-en-ciel n'est qu'un magnifique spectre solaire de forme circulaire. Ce sont encore les gouttes de pluie, qui, éclairées par le soleil, décomposent la lumière comme le font les gouttes de rosée.

La lumière colorée ne nous parvient qu'après s'être réfléchi à l'intérieur de la goutte; l'arc-en-ciel n'est donc visible que si l'on regarde le nuage qui se résout en pluie, en tournant le dos au soleil qui l'éclaire.

L'arc-en-ciel est coloré en rouge sur son contour extérieur, et en violet à l'intérieur; entre ces deux couleurs se placent l'orangé, le jaune, le vert et le bleu.

Il n'est pas rare de voir ce premier arc entouré d'un second plus pâle qui a le rouge en dedans et le violet au dehors.

On aperçoit des portions d'arc-en-ciel lorsque l'on observe un jet d'eau éclairé par le soleil. Cet astre ne doit pas être très élevé sur l'horizon, l'observateur doit lui tourner le dos, et choisir une place convenable.

**Rayons de chaleur.** — La chaleur accompagne la lumière solaire. Elle n'est pas répartie également dans le spectre. La région violette et bleue est très peu chaude. La région rouge l'est beaucoup plus ; il existe en avant du rouge un certain espace occupé par des rayons solaires qui n'impressionnent plus l'œil ; ils sont invisibles. Ce sont des *rayons de chaleur*.

On reconnaît leur présence en mettant dans cet espace un thermomètre sensible, il s'échauffe aussitôt.

**Rayons chimiques.** — La lumière solaire fait pâlir et disparaître les couleurs de nos étoffes et de nos papiers peints. Elle joue un grand rôle dans la photographie ; elle donne aux parties vertes des plantes la propriété de décomposer l'acide carbonique et contribue ainsi à la nutrition de la plante.

Ce pouvoir chimique de la lumière n'appartient pas aux rayons rouges, il est très faible dans le jaune et le vert ; il grandit dans le bleu et le violet, et atteint sa plus grande force dans une partie du spectre peu visible qui se trouve au delà du violet.

L'ensemble des rayons que nous envoie le soleil forme donc un spectre plus étendu que celui que nous voyons. Ce dernier est encadré en quelque sorte entre deux autres : l'un, qui nous apporte une grande partie de la chaleur solaire, est placé avant le rouge ; l'autre, situé après le violet, renferme les rayons chimiques les plus actifs, rayons sans lesquels toute végétation serait impossible.

### EXERCICES

1° Les astronomes estiment qu'une des étoiles de la Constellation du Centaure est à une distance de la terre égale à 227000 fois la distance moyenne de la terre au soleil. Combien faut-il d'années pour que la lumière de l'étoile puisse nous parvenir ?

2° Une sphère lumineuse de  $0^m,02$  de rayon éclaire une sphère opaque dont le rayon est  $0^m,01$  ; la distance qui sépare les centres des deux sphères est de  $0^m,10$ .

Trouver par une construction graphique la longueur du cône d'ombre qui s'étend au delà de la sphère opaque.

3° Un point lumineux A est placé à  $0^m,06$  au-dessus d'un miroir

horizontal. L'œil de l'observateur est situé sur l'horizontale qui passe par le point A, à une distance de ce point égale à  $0^m,08$ .

Tracer sur une figure faite avec soin la place où l'observateur verra l'image du point A et aussi la position du faisceau de lumière qui partie du point A parvient à l'œil.

4° Une plaque de métal argenté bien polie est verticale; elle reçoit un faisceau de rayons solaires dans une direction horizontale, sous l'incidence de  $60^\circ$ . Dans quelle direction doit-on placer la boule d'un thermomètre pour qu'il s'échauffe le plus possible sous l'action des rayons solaires renvoyés par le miroir? Quelle doit être en outre la nature de la surface du thermomètre?

5° Un faisceau de rayons solaires arrive sur un miroir plan en faisant avec la verticale un angle de  $60^\circ$ . La normale du miroir est dans le plan d'incidence. Quel angle doit-elle faire avec la verticale pour que le rayon soit réfléchi par le miroir dans une direction horizontale?

6° Un rayon solaire tombe sur un miroir plan sous l'angle de  $20^\circ$  et il s'y réfléchit. On fait tourner le miroir de  $5^\circ$  sans que le plan d'incidence change; le rayon réfléchi se déplace d'un certain angle que l'on propose de calculer.

7° Une pyramide triangulaire, à faces inégales, a ses quatre sommets placés au-dessus d'un miroir plan horizontal. On propose de déterminer par une construction graphique la position de l'image de la pyramide et de montrer qu'il serait impossible de superposer cette image à la pyramide.

8° On possède un miroir concave de grande dimension. Il est exposé au soleil dont il réfléchit les rayons. Où devrait-on placer un petit vase de métal mince, plein d'eau, pour porter ce liquide à l'ébullition en concentrant sur lui pendant un temps assez long la chaleur solaire? La nature de la surface du vase est-elle indifférente?

9° Une personne se regarde dans un miroir concave en se plaçant tantôt près du miroir, tantôt assez loin, puis elle se met devant une glace ordinaire et enfin devant un miroir convexe. Indiquer sous quels aspects elle se verra dans ces divers miroirs.

10° Un ballon de verre plein d'eau est placé sur une planche et exposé au soleil. Au bout d'un certain temps la planche peut prendre feu. Expliquer dans quelle circonstance cette inflammation est à craindre.

11° Un enfant prend les lunettes de sa grand'mère et veut s'en servir pour enflammer une allumette chimique au moyen de la chaleur solaire. Comment doit-il s'y prendre?

12° Un rayon lumineux passe de l'air dans une masse indéfinie de verre; l'angle d'incidence est  $45^\circ$ . Trouver par une construction géométrique faite avec la règle et le compas la direction du rayon réfracté et mesurer avec un rapporteur l'angle de réfraction. L'indice de réfraction du verre est  $\frac{3}{2}$ .

13° On regarde un massif de géraniums rouges dans un jardin éclairé successivement par des feux de Bengale qui sont tantôt verts, tantôt rouges. Quel est dans les deux cas l'aspect que présente le massif.

# LIVRE III

## CHAPITRE PREMIER

### Du son.

**Élasticité.** — On peut doubler la longueur d'un fil ou

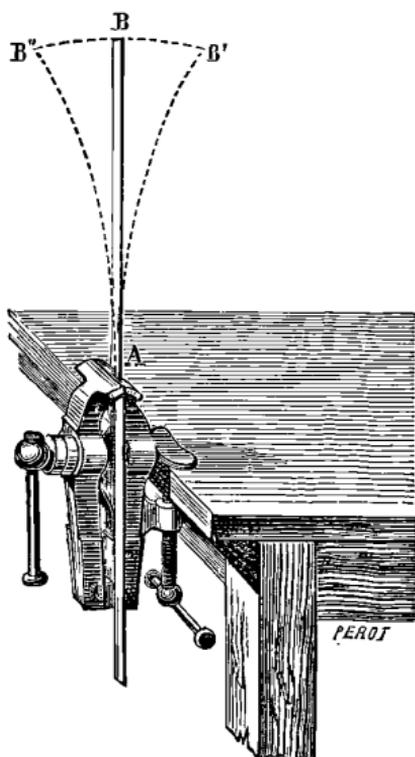


Fig. 64.

Vibration d'une verge élastique.

d'un tube de caoutchouc, en les étirant. Ils reprennent, comme on le sait, leur longueur primitive, si on cesse d'agir sur eux. On déforme un ballon plein d'air en le comprimant avec la main; la forme redevient sphérique si on cesse de le presser.

L'élasticité est la propriété que possèdent certains corps, tels que l'acier, le caoutchouc, l'air, de reprendre d'eux-mêmes leur forme ou leurs dimensions, quand elles ont été altérées par une action mécanique momentanée.

L'acier, disons-nous, est élastique, et c'est pourquoi il est employé exclusivement à la fabrication des ressorts.

Le plomb est au contraire dépourvu d'élasticité.

**Vibrations d'une verge d'acier.** — Une verge

d'acier rectiligne AB (*fig. 64*), telle qu'une lame de fleuret ou une aiguille à tricoter, est serrée dans un étau. On la courbe, en lui donnant la position AB', puis on l'abandonne à elle-même. Elle revient vers AB, dépasse cette ligne, se courbe en sens inverse, et s'arrête en AB'', qui est à peu près symétrique de AB' par rapport à la droite AB. Elle a fait ainsi une *oscillation*.

Elle revient alors vers AB, et s'arrête très près de AB'. C'est la fin d'une seconde oscillation; celle-ci la ramène au point de départ. On dit qu'elle a accompli une *vibration*. Il faut deux oscillations de sens inverse pour faire une vibration. La distance BB' mesure la grandeur ou, comme on dit, l'*amplitude* de la vibration du point extrême B de la verge.

Le mouvement vibratoire se poursuit assez longtemps, mais son amplitude diminue à chaque oscillation nouvelle; la verge redevient rectiligne et immobile, après un certain nombre de vibrations.

**Production du son.** — Une longue verge vibre lentement et sans bruit. Si on la raccourcit, les vibrations sont plus rapides; il arrive un moment où l'on entend un son grave qui persiste autant que le mouvement de la verge. Le son devient plus aigu si on donne à la verge vibrante une plus petite longueur, et son acuité augmente à mesure que la longueur diminue. Il est assez net, assez prolongé, pour qu'on puisse en prendre l'*unisson* à l'aide de la voix; c'est un son *musical*.

Les sons de courte durée, comme le choc d'un marteau sur l'enclume, sont appelés des *bruits*. Il en est de même d'un mélange confus de sons divers : le sifflement du vent, le bruit des vagues, le tumulte d'une foule.

**Corps sonores.** — Les corps sonores sont des corps élastiques que l'on a fait vibrer par une action mécanique, et dont les parties ont un mouvement de va-et-vient analogue à celui d'une verge.

Une petite boule de bois est suspendue à un fil (*fig. 65*), et forme, à l'état de repos, un petit pendule vertical; la boule touche alors la paroi d'une cloche en verre ou simple-

ment un verre à pied. On fait vibrer la cloche ou le verre, en en frottant les bords avec un archet.

La boule s'écarte de la cloche, comme si elle en avait reçu une impulsion; elle retombe sur le verre, s'en éloigne de nouveau, et son mouvement de va-et-vient reproduit grossièrement celui qui agite les diverses parties de la cloche; en même temps on entend un son.

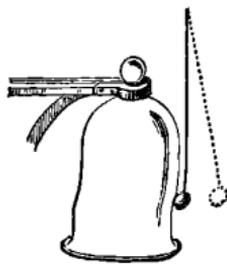


Fig. 65.  
Vibration d'une cloche.

Si on met la main sur la cloche, on éprouve dans les doigts un frémissement qui rend sensible le mouvement du verre. Si on appuie la main plus fortement, ce qui arrête les vibrations, le son s'éteint aussitôt.

**Vibration d'un fil.** — Serrez un fil blanc entre les dents, et tendez-le avec une des mains; si avec l'autre vous courbez momentanément le fil, vous entendrez un son et le fil vous paraîtra renflé au milieu, ayant la forme d'un fuseau (*fig. 66*).



Fig. 66. — Vibration d'une corde.

Cette apparence tient à ce que, par suite de la durée des sensations, on voit le fil dans toutes les positions que lui donne son mouvement de va-et-vient. Ses deux extrémités



Fig. 67. — Tracé des vibrations d'un diapason.

sont fixes, tandis que le milieu s'éloigne alternativement au-dessus et au-dessous de la position qu'il occuperait à l'état de repos.

**Vibration d'un diapason.** — Un diapason *d* (*fig. 67*)

est une lame d'acier recourbée en U. On le fait vibrer en introduisant entre les deux branches une baguette qui les écarte et que l'on retire vivement, ou encore, en frappant l'une des branches avec un tampon.

Une soie de porc assez courte est fixée à l'aide d'un peu de cire à l'une des branches du diapason. Mettons l'extrémité de cette soie sur une lame de verre recouverte de noir de fumée, et attirons le diapason en ligne droite. Le noir est enlevé partout où passe la soie. Il se forme sur le verre une ligne transparente *ab* qui est droite.

Faisons vibrer le diapason, et recommençons l'expérience.

La soie trace une ligne sinueuse, en zigzag, qui montre que son extrémité s'est portée alternativement à droite et à gauche de la ligne *ab*. La branche du diapason a le même mouvement par rapport à sa position de repos. Cette expérience rend ce mouvement sensible aux yeux, et permettrait, au besoin, de compter le nombre des oscillations faites par le diapason.

**Propagation du son.** — *Le son ne se propage pas dans le vide ; c'est-à-dire dans un espace dont on a retiré l'air, sans le remplacer par un autre corps.* Un ballon de verre, dont le col entre dans une garniture en cuivre pourvue d'un robinet *r* (fig. 68), renferme une clochette *c* suspendue à la garniture par des fils de coton. On entend le son de la clochette lorsqu'on agite le ballon plein d'air. Enlevons la majeure partie de ce gaz à l'aide d'une pompe dite machine pneumatique. Agitons de nouveau le ballon pour faire vibrer la cloche ; le son n'est plus perceptible, ou, tout au moins, se trouve très affaibli. On ne l'entendrait plus, s'il était possible de retirer complètement l'air qui est dans le ballon.

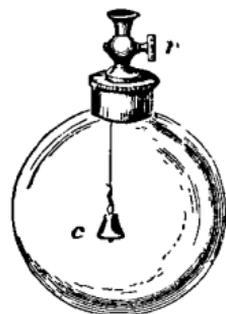


Fig. 68.  
Clochette dans le vide.

Le son des cloches, la musique d'un orchestre, la voix de l'homme, ne parviennent à nos oreilles que grâce à l'air qui existe entre elles et le corps sonore. Ce son s'affaiblit si on

est dans un air raréfié : en aérostat, ou au sommet d'une montagne.

La transmission du son peut se faire par l'intermédiaire de l'eau. Les pêcheurs à la ligne savent bien que les poissons entendent les bruits du rivage, et c'est pourquoi ils gardent le silence. Un plongeur entend également du fond de l'eau les bruits qui se font sur la rive.

Les corps solides transmettent le son, s'ils sont élastiques. Appliquez l'oreille contre l'extrémité d'une poutre, vous entendrez un bruit très léger, comme celui du choc d'une épingle contre l'autre extrémité.

Les bruits lointains, celui d'une voiture, la détonation du canon, s'entendent, si on applique l'oreille contre terre. Ils sont alors transmis par le sol plus énergiquement que par l'air.

**Téléphone à ficelle.** — Prenez deux cornets de carton dont le fond est fermé par une feuille de papier ou de parchemin tendue. Fixez au milieu de chaque fond une petite ficelle longue d'une dizaine de mètres. Deux personnes saisissent chacune l'un des cornets, et s'éloignent assez pour que la ficelle soit tendue. L'une applique contre l'oreille l'ouverture de son cornet, l'autre parle à voix basse dans l'intérieur de celui qu'elle tient à la main; la première entend nettement les paroles. Elles ne sont pas perceptibles pour une troisième personne placée entre les deux autres.

La voix de celle qui parle fait vibrer la feuille de parchemin, les vibrations se communiquent à la seconde feuille par l'intermédiaire de la ficelle; elles font vibrer l'air du second cornet, et parviennent ainsi à l'oreille de la personne qui écoute.

**Mode de propagation du son.** — Nous venons de dire comment on peut concevoir que le son du corps sonore parvienne à l'oreille. Il est nécessaire que l'air ou un autre corps élastique reçoive les vibrations du corps sonore, vibre lui-même et communique, de proche en proche, ces vibrations jusqu'à ce qu'elles parviennent à l'oreille. Comment une telle transmission peut-elle se réaliser? Il nous serait difficile

de répondre à cette question dans un cours élémentaire. Nous aurons recours à l'observation de faits bien connus pour en donner une idée.

Qu'un mouvement puisse se communiquer de proche en proche au travers de corps qui se touchent, c'est ce que l'on voit tous les jours, et ce que démontre l'expérience suivante.

Une planche *p* (fig. 69) porte une rainure *r* dans laquelle

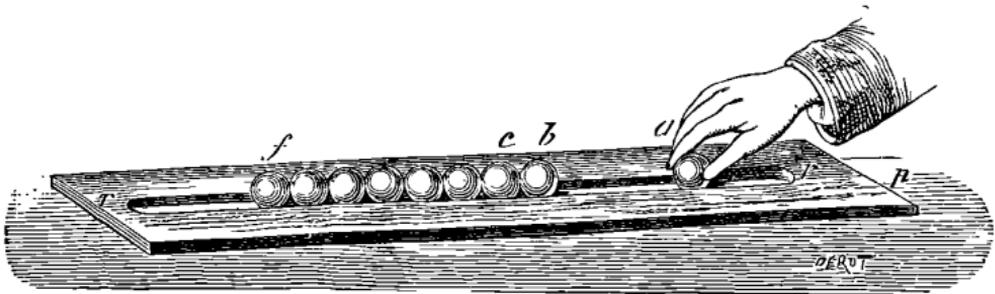


Fig. 69. — Choc de billes.

sont alignées un certain nombre de billes de verre; elles se touchent toutes. On prend la première *a* et on la lance sur la bille *b*. Toutes les billes restent en repos, excepté la dernière *f* qui se détache de la file et s'en éloigne. Voilà donc le mouvement que possédait la bille *a* transmis à la boule *f*, sans que les autres aient changé de place.

Un mouvement vibratoire, qui n'est après tout qu'un mouvement de va-et-vient,

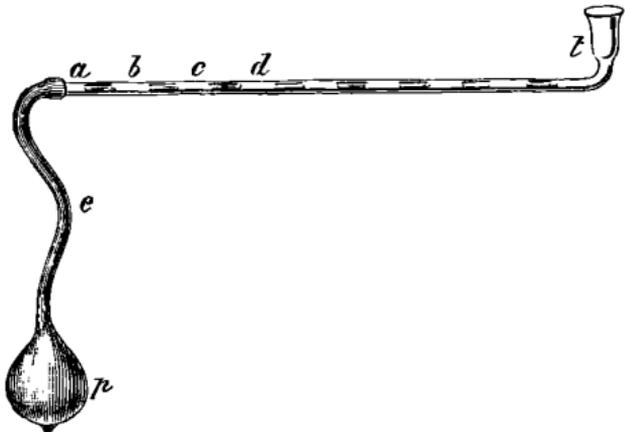


Fig. 70. — Transmission d'un mouvement vibratoire.

peut être transmis par l'air en passant successivement d'une couche d'air à la couche suivante.

Il nous faut, pour le démontrer, une poire de caoutchouc  $p$  (fig. 70), terminée par un tube de même substance  $e$ . Faisons-le aboutir à un tube de verre  $t$  dans lequel nous avons introduit des gouttes d'eau colorée, qui séparent de petites tranches d'air  $a, b, c, d$ .

Si nous appuyons avec la main sur la poire  $p$  pour en faire sortir l'air, il en résulte une pression qui pousse en avant la première goutte d'eau de gauche à droite. La tranche d'air  $b$  se trouve comprimée, et elle exerce sur la goutte de gauche une contre-pression qui l'arrête, tandis qu'elle pousse la goutte de droite et la fait avancer. Le même effet va se reproduire avec chacune des gouttes qui remplissent le tube  $t$ , elles vont se porter successivement de gauche à droite. Si on cesse de presser la poire  $p$ , l'air y rentre et détermine de droite à gauche un mouvement inverse de toutes les gouttes. En sorte qu'en exerçant à des intervalles de temps égaux des pressions sur le caoutchouc, on détermine un mouvement permanent de va-et-vient dans toutes les parties du tube  $t$ . Si les mouvements de la main sont lents, les vibrations des gouttes sont également lentes; sont-ils rapides? on voit les vibrations s'accélérer, il s'en produit dans un même temps un bien plus grand nombre.

Il se passe des phénomènes analogues dans la transmission des vibrations des corps sonores par l'air. Toutes ces vibrations, qu'elles soient lentes ou rapides, grandes ou petites, répétées par l'air, arrivent à notre oreille et y font naître les sensations de sons graves ou aigus, intenses ou faibles.

**Ondes liquides.** — Nous aurions pu rapprocher la transmission des vibrations dans l'air de ce qui se passe, lorsqu'on jette une pierre au milieu d'une eau tranquille. Il se forme, autour du point choqué par la pierre, des vagues circulaires sur lesquelles l'eau s'élève au-dessus du niveau général, elles sont séparées par des vagues creuses dont la surface est au-dessous. Ces vagues courent à la surface de l'eau en augmentant sans cesse de diamètre. Si une feuille d'arbre flotte à la surface, elle est soulevée par les premières, abaissée par les secondes, et elle prend un mouvement de

va-et-vient vertical qui reproduit le mouvement de l'eau. Ce mouvement se fait sur place. Le mouvement de l'eau n'est pas horizontal, mais simplement vertical; seulement il se transmet dans le sens horizontal, et la transmission est rendue sensible par le mouvement apparent des vagues qui se propagent à la surface du liquide.

Ce que nous venons de dire est applicable aux vagues de la mer. Elles semblent courir à sa surface, et cependant, lorsqu'elles atteignent une barque, elles la soulèvent ou l'abaissent sans l'entraîner avec elles vers la terre, à moins qu'on ne soit trop près du rivage.

**Vitesse du son.** — Comme les vagues, le son met un certain temps à se propager dans l'air.

Si l'on se trouve à une certaine distance d'un canon que l'on tire, on voit la lumière et la fumée produites par l'inflammation de la poudre avant d'entendre le bruit de l'explosion.

L'éclair précède le tonnerre, bien que l'un et l'autre se produisent en même temps.

On a fait à Paris, en 1822, des expériences pour déterminer le nombre de mètres que le son parcourt en une seconde de temps. C'est ce qu'on appelle la *vitesse du son*.

Le procédé que l'on a employé consiste à se placer à une distance assez grande, 18 kilomètres par exemple, d'une pièce de canon que l'on peut apercevoir. Les observateurs ont des montres à secondes, et notent le temps qui s'écoule entre le moment où, dans la nuit, on voit la lumière produite par la combustion de la poudre, et le moment où l'on entend la détonation. Ce temps a été trouvé égal à 54 secondes. En divisant 18000 mètres par 54, on a la vitesse du son, qui est 340 mètres à la température de 16°. Elle serait un peu moindre, 330 mètres, à 0°.

Elle sera plus grande dans le sens du vent qu'en sens contraire, ce qui se conçoit facilement.

**Réflexion du son.** — Le mouvement vibratoire de l'air excité par un corps sonore se réfléchit sur un mur comme la lumière sur un miroir, et d'après les mêmes lois.

Lorsqu'une vague frappe obliquement la jetée qui protège l'entrée d'un port, on voit une seconde vague naître du choc et retourner vers la pleine mer, comme le ferait un boulet qui viendrait ricocher sur la digue. Cette seconde vague est produite par la réflexion de la première sur l'obstacle qu'elle rencontre.

De même que les rayons de lumière réfléchis sur un miroir nous donnent l'illusion d'un corps lumineux placé derrière celui-ci et qui nous enverrait directement sa lumière, la réflexion d'un mouvement sonore sur un mur impressionne notre oreille comme si le corps sonore était placé derrière le mur, dans une place symétrique de celle qu'il occupe réellement en avant.

**Echo.** — De là le phénomène de l'écho. Placez-vous devant un mur à une distance de 17 mètres et poussez un cri, il s'en produit un autre en tout semblable qui arrive du côté du mur, et qui est parfaitement distinct du premier.

Si vous vous portez à une distance de 34 mètres, et si vous prononcez un mot de deux syllabes, tel que *bonjour*, il revient également et semble prononcé par un personnage invisible. Si vous êtes placé près de la personne qui prononce ce mot, vous l'entendrez deux fois : une première fois, par transmission directe et puis un peu après. Dans le premier cas, le son franchit rapidement la distance qui vous sépare de la personne qui parle; dans le second, le mouvement sonore va jusqu'au mur, revient jusqu'à votre oreille, parcourt ainsi 68 mètres, ce qui exige environ deux dixièmes de seconde; le mot est prononcé, lorsque l'écho le fait entendre de nouveau et très distinctement.

On n'entend pas l'écho dans une salle, eût-elle 8 à 10 mètres de long, parce que le son réfléchi revient avant que le son émis soit éteint; les deux sensations se confondent, il y a simplement renforcement de la voix. On dit qu'il y a *résonance*. La résonance est forte dans une chambre vide, parce que les meubles, les rideaux, gênent la réflexion du son et, comme on le dit, *étouffent la voix*.

Le son se réfléchit sur un massif d'arbres, sur les nuages, sur la surface de l'eau.

Disons en finissant que le son s'affaiblit à mesure qu'on s'éloigne du corps sonore, parce qu'il se répand dans des espaces de plus en plus grands. L'expérience de tous les jours le prouve surabondamment. Il n'en serait plus de même, si on parlait à l'orifice d'un tuyau; la dissémination du son n'est plus à craindre, et l'affaiblissement est très faible même pour de grandes distances parcourues.

On installe fréquemment, dans de grands édifices, des tuyaux de caoutchouc ou de fer-blanc, qui permettent à deux personnes d'entretenir une conversation, bien qu'elles soient placées dans des salles fort éloignées l'une de l'autre.

---

## CHAPITRE II

### Magnétisme.

Certains minerais de fer exploités en Norvège et à l'île d'Elbe ont la propriété d'attirer le fer pris sous forme d'aiguilles ou de limaille : c'est l'oxyde de fer magnétique.

On les appelle des *pierres d'aimant* ou des *aimants naturels*.

La cause de cette singulière attraction a reçu le nom de *magnétisme*. Le fer, l'acier sont, comme les pierres d'aimant, des corps *magnétiques*.

Une barre d'acier s'aimante si on la frotte d'une certaine manière avec un aimant naturel. Elle peut communiquer ses propriétés magnétiques à un second barreau d'acier.

On obtient ainsi des *aimants artificiels* plus puissants, plus faciles à manier que les aimants naturels; nous nous en servirons exclusivement.

**Pôles.** — Un barreau aimanté plongé en entier dans la

limaille de fer ne manifeste pas en tous ses points la propriété magnétique. La limaille s'attache surtout aux extrémités du barreau; elle y forme de petites houppes composées de grains de limaille adhérents les uns aux autres (*fig. 71*). Leur longueur décroît lorsqu'on s'approche du milieu du



Fig. 71. — Pôles et ligne neutre.

barreau. En cette dernière place, la limaille ne s'attache plus à l'aimant. On dirait que l'acier n'est plus aimanté. On se trouve là sur la *ligne neutre* de l'aimant.

Les deux extrémités, N, S, qui présentent la plus forte aimantation, sont les *pôles*.

**Aiguille aimantée.** — Nous appelons ainsi une lame d'acier aimanté, *ns* (*fig. 72*), ayant la forme d'un losange, traversée en son milieu par une chape creuse qui repose sur une tige effilée en pointe aiguë.



Fig. 72. — Aiguille aimantée.

L'aiguille tourne autour de cette pointe comme sur un pivot, tout en restant horizontale.

Elle prend d'elle-même une position fixe, à laquelle elle revient si on l'en dérange. La ligne *ns* forme l'axe de cette aiguille et se met, à peu près, dans la direction du nord au sud.

Les deux pôles de l'aiguille ne sont donc pas de même nature. J'appellerai pôle *nord* celui qui se dirige vers le nord, et pôle *sud* celui qui se tourne vers le sud.

Dans les aiguilles du commerce, la moitié de la lame qui correspond au pôle nord a une couleur bleue produite par l'oxydation de l'acier; la moitié sud a l'aspect brillant du métal poli.

L'expérience précédente réussit également si on dépose une plume d'acier aimantée sur un petit morceau de liège flottant sur l'eau. Un petit barreau d'acier suspendu horizon-

talement à l'aide d'un fil s'oriente comme le fait l'aiguille aimantée.

**Action réciproque de deux aimants.** — Une aiguille aimantée est repoussée si on approche de son pôle nord le pôle nord d'un second aimant.

Les deux pôles sud se repoussent également.

Mais le pôle nord de l'aiguille est attiré par le pôle sud de l'aimant fixe.

*Les pôles de même nom de deux aimants se repoussent; les pôles de nom contraire s'attirent.*

Pour reconnaître si un barreau d'acier est aimanté, on en approche successivement les deux extrémités du pôle nord d'une aiguille aimantée.

S'il y a attraction dans les deux cas, l'acier n'est pas aimanté.

Si l'aiguille est attirée par une des extrémités et repoussée par l'autre, le barreau est aimanté, et l'extrémité qui repousse le pôle nord de l'aiguille est elle-même un pôle nord.

Nous excluons le cas où les deux extrémités du barreau repousseraient, l'une et l'autre, l'un des pôles de l'aiguille. Ces barreaux ont une aimantation irrégulière. Ils ont, par exemple, un pôle nord aux deux bouts et un pôle sud au milieu.

**Aimantation du fer.** — Un morceau de fer pur, appelé aussi *fer doux*, s'aimante quand il est placé dans le voisinage du pôle d'un aimant; il perd toute aimantation, si on l'en éloigne.

L'aimantation se reconnaît à ce que le fer, voisin d'un barreau aimanté, attire la limaille de fer.

Un aimant *ns* (*fig. 73*) soutient

par son pôle nord un petit barreau de fer *a*; l'extrémité inférieure de ce barreau repousse le pôle nord d'une petite aiguille aimantée qu'on en approche: c'est donc un pôle nord. L'extrémité voisine du barreau *ns* est un pôle sud.

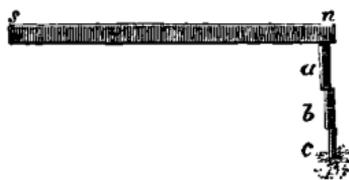


Fig. 73. — Le fer s'aimante par son contact avec un aimant.

Le barreau *a* peut en soutenir un second *b*. Celui-ci en soutient un troisième *c*, et ce dernier est encore assez aimanté pour attirer la limaille de fer.

Retirons doucement l'aimant, en soutenant le barreau *a* avec la main, les barreaux *b*, *c*, la limaille tombent aussitôt. Ils ne sont plus aimantés.

L'expérience réussit encore si on sépare le pôle *n* et le barreau *a* par un morceau de papier, une lame de verre ou de cuivre, corps qui ne sont pas magnétiques.

**Figures magnétiques.** — Un aimant est placé au-dessous d'un carton sur lequel on répand de la limaille de fer; de petites secousses données au carton agitent la limaille, elle obéit alors aux actions magnétiques de l'aimant.

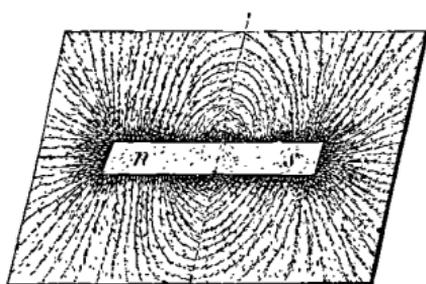


Fig. 74. — Figures magnétiques.

Chaque grain devient un petit aimant qui s'accroche au suivant par des pôles de nom contraire. Ces chapelets de limailles forment des lignes droites ou courbes, partout où se fait sentir l'action de l'aimant.

La place de l'aimant se dessine en blanc *n*, *s* (fig. 74).

Les courbes de limaille prolongées géométriquement se coupent toutes aux points *n*, *s*, appelés plus spécialement les pôles de l'aimant.

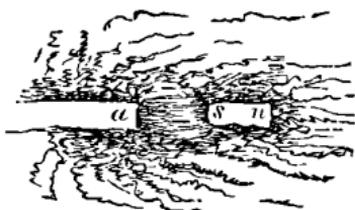


Fig. 75. — Aimantation du fer.

Plaçons dans le voisinage de l'aimant *a* un barreau de fer doux, *n*, *s* (fig. 75), la figure dessinée par la limaille change; le fer semble agir comme un véritable aimant ayant deux pôles, *n*, *s*. C'est une nouvelle preuve de l'aimantation

qu'il acquiert sous l'influence de l'aimant *a*.

Il ne produit rien de pareil, si on le soustrait à son influence. Il est rare cependant que la désaimantation du fer soit complète, parce qu'il est rare d'opérer avec des barreaux

de fer complètement pur. Le fer du commerce est presque toujours un peu aciéré.

**Aimantation de l'acier.** — L'acier est un composé de fer et de carbone. L'acier trempé est seul propre à recevoir et à garder l'aimantation. On l'obtient en refroidissant brusquement dans de l'eau froide une barre d'acier chauffée au rouge.

L'acier placé dans le voisinage d'un aimant s'aimante lentement. Une fois aimanté, il conserve sa propriété magnétique; c'est un aimant *permanent*.

**Constitution d'un aimant.** — Les pôles de nom contraire de deux aimants, mis en contact, neutralisent leurs effets.

Le pôle nord N (*fig. 76*), d'un aimant horizontal NS, soutient un morceau de fer *ab*. Plaçons au-dessus le pôle sud S' d'un second aimant vertical N'S', le fer *ab* se détache et tombe.

Aimantons un ressort de montre *nms* (*fig. 77*), et courbons-le en réunissant les deux extrémités *n, s*. Si on les approche alors d'un des pôles d'une aiguille aimantée, elles ne produisent ni attraction ni répulsion.

Prenons une aiguille à tricoter, aimantée, *ns* (*fig. 78*). Elle présente deux pôles de nom contraire, *n, s*, qui attirent la limaille de fer. Brisons-la en son milieu, à l'endroit de la ligne neutre; chaque moitié est un aimant complet, ayant deux pôles de nom contraire. Les deux surfaces de la fracture sont également de nom contraire : l'une attire le pôle nord d'une aiguille, l'autre le repousse.

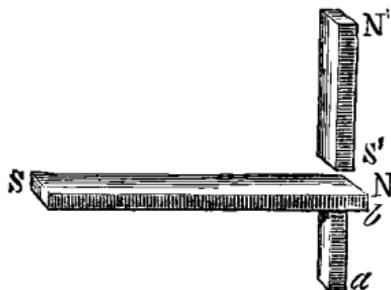


Fig. 76. — Neutralisation des actions de deux pôles opposés.



Fig. 77. — Neutralisation des actions des pôles d'un aimant.

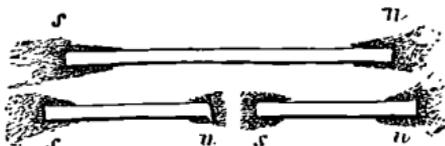


Fig. 78. — Rupture d'un aimant.

Le même effet se reproduit si on brise chaque moitié en plusieurs morceaux; chacun d'eux est un aimant complet.

Un barreau aimanté ressemble à une succession de barreaux beaucoup plus petits, se raccordant par leurs pôles contraires.

**Effets de la chaleur.** — L'aimant n'attire plus un morceau de fer chauffé au rouge.

Un aimant perd ses propriétés magnétiques si on le chauffe au rouge. Son magnétisme diminue graduellement à mesure que la température s'élève.

**Aimantation.** — Les lames d'acier trempé, avec lesquelles on fabrique les aiguilles, s'aimantent en faisant glisser sur elles l'un des pôles d'un aimant. On le promène, toujours dans le même sens, d'une extrémité à l'autre, et on répète ces frictions sur chaque face de l'aiguille. Si l'aiguille est frottée avec un pôle nord, son pôle sud se trouve à l'extrémité qui est touchée en dernier lieu par l'aimant.

**Touche séparée.** — Le procédé suivant donne une aimantation plus régulière et plus énergique.

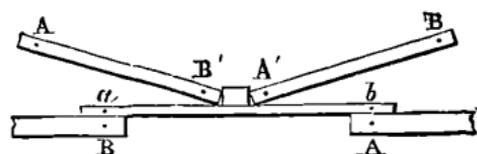


Fig. 79. — Aimantation par touche séparée.

Le barreau *ab* (fig. 79) est horizontal; il repose sur les pôles de nom contraire; A, B, de deux aimants fixes. On place au milieu du barreau les pôles opposés, A', B', de deux aimants mobiles, légèrement inclinés sur *ab*. Les pôles nord, A, A', des barreaux fixe et mobile, sont du même côté.

On fait glisser les aimants mobiles dans des sens opposés, du milieu vers les extrémités *a*, *b*.

Ces frictions sont répétées le même nombre de fois sur les deux faces du barreau. Il se forme un pôle nord *a*, du côté des pôles sud B, B' des aimants. Les aimants fixes servent à rendre permanente l'aimantation que le déplacement des barreaux mobiles détermine dans l'acier *ab*.

Immédiatement après cette opération, le barreau *ab*, isolé

des aimants, perd une partie de son aimantation; il en conserve une partie qui demeure sensiblement constante.

**Faisceaux magnétiques.** — L'aimantation d'un barreau épais est superficielle; elle ne pénètre pas jusqu'au centre.

On compose les aimants puissants de lames d'acier ayant  $0^m,005$  à  $0^m,006$  d'épaisseur. Elles sont aimantées isolément, autant qu'on peut le faire.



Fig. 80. — Faisceau magnétique.

On les superpose ensuite, en ayant soin de mettre du même côté les pôles de même nom (*fig. 80*).

Quelquefois on les sépare par des feuilles de carton, en réunissant leurs extrémités par des pièces, *a*, de fer doux.

Si l'on veut utiliser les deux pôles d'un aimant, pour soulever un poids, on donne aux lames que l'on aimante isolément la forme d'un fer à cheval (*fig. 81*).

Les pôles de même nom sont du même côté; les pôles contraires sont en regard. Une pièce de fer doux les réunit, c'est le *contact*; elle adhère aux surfaces polaires et on peut attacher un poids au crochet qui la termine, sans qu'elle se détache de l'aimant.

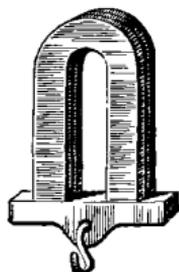


Fig 81.  
Aimant en fer  
à cheval.

Le contact de fer s'aimante et contribue à accroître le magnétisme de l'aimant. Il peut supporter de jour en jour des poids croissants; si la charge est trop forte, le contact tombe, l'aimant perd une partie de sa force et ne peut plus soutenir le poids qu'il portait primitivement.

Pour conserver deux barreaux aimantés, il faut les placer parallèlement dans une boîte, en les séparant par une règle de bois et en disposant en regard les pôles de nom contraire. Deux contacts de fer doux réunissent les pôles; leur aimantation maintient constante la force des aimants.

L'effet serait tout autre, et le magnétisme des barreaux serait promptement affaibli si les pôles de même nom étaient tournés du même côté.

**Aimantation par l'action de la terre.** — Une barre de fer verticale est aimantée par l'action de la terre. Son extrémité inférieure est un pôle nord; il repousse le pôle nord d'une aiguille aimantée qu'on en approche.

Cette aimantation est faible. Elle est sensible dans les croix des clochers, les tiges des paratonnerres. C'est la terre qui aimante les limes des serruriers accrochées au mur des ateliers et qui demeurent longtemps dans la position verticale.

Les vaisseaux de fer, lorsqu'ils sont à l'ancre dans une rade, prennent d'eux-mêmes l'orientation de l'aiguille aimantée; l'action magnétique de la terre les transforme en véritables aimants.

**Action de la terre sur les aimants.** — Comment expliquer cette action de la terre sur le fer et sur l'aiguille aimantée?

Plaçons une petite aiguille aimantée, mobile sur son pivot, au-dessus d'un barreau aimanté assez long, le pivot est sur la ligne neutre; l'aiguille tourne et se met parallèle à l'axe du barreau; le pôle nord de l'aiguille se tourne du côté du pôle sud du barreau. C'est sa position d'équilibre; elle y revient si on l'en dérange.

Naturellement, et en l'absence de tout aimant, l'axe de l'aiguille s'oriente du nord au sud.

On pourrait, par analogie, considérer la terre comme un grand aimant qui aurait deux pôles. L'un, placé dans l'hémisphère nord, attirerait le pôle nord de l'aiguille; l'autre, situé dans l'hémisphère sud, attirerait le pôle sud.

**Déclinaison.** — La direction de l'aiguille aimantée prise au repos n'est pas rigoureusement celle de la ligne qui, dans chaque lieu, va du nord au sud. On appelle cette ligne la *méridienne* du lieu.

Pour la déterminer, on enfonce une tige verticale *it* (*fig. 82*) sur une planche horizontale. L'ombre de la tige éclairée

par le soleil se projette sur le sol, comme on le voit sur un cadran solaire. Elle est fort longue matin et soir, et la plus courte possible à midi. Marquons à cette heure la direction  $zSN$  de cette ombre, nous aurons celle de la méridienne. La ligne  $lt$  représente sur la figure la direction d'un rayon solaire à midi.

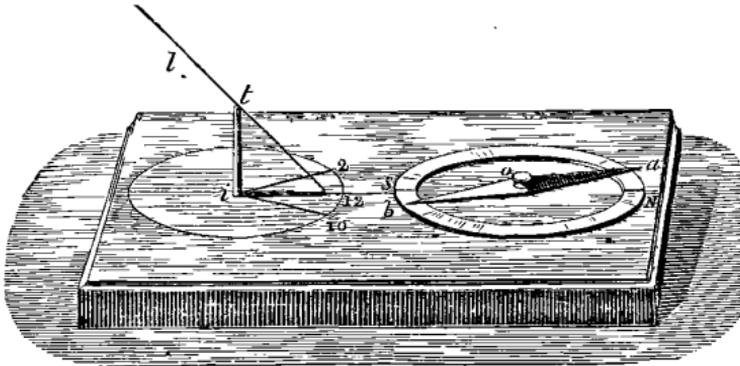


Fig. 82.

Plaçons sur la même planche un cercle divisé dont le centre  $O$  soit sur la méridienne  $NS$ . Ce centre est le pied d'un pivot vertical sur lequel repose la chape d'une aiguille aimantée.

L'axe  $ab$  de l'aiguille fait avec la méridienne un angle  $NOa$  que l'on appelle l'*angle de déclinaison* ou, simplement, la *déclinaison* de l'aiguille.

En France, la pointe nord de celle-ci est à l'ouest de la méridienne; la déclinaison est *occidentale*. En ce moment, la déclinaison est à Paris de  $16^\circ$ . Elle varie d'une ville à l'autre; plus faible à Nancy qu'à Brest.

Dans la même ville elle change d'une année à l'autre. Prenons pour exemple Paris. En 1580, la pointe nord de l'aiguille était à  $41^\circ, 30'$  de la méridienne, du côté de l'est. L'aiguille se rapproche de la méridienne, d'année en année, et, en 1666, elle pointe vers le nord. Sa déclinaison d'abord orientale est devenue nulle. A partir de cette date la pointe nord s'éloigne peu à peu de la méridienne en se portant vers l'ouest. Sa déclinaison occidentale est  $22^\circ, 36'$  en 1814.

Depuis, on la voit décroître et, avec le temps, elle redeviendra nulle, et puis orientale.

Les marins savent bien que la déclinaison n'est pas la même en tous les points de la terre. Occidentale en Europe et sur l'océan Atlantique, elle est orientale sur l'océan Pacifique et nulle en certains points du continent américain.

**Boussole.** — Longtemps avant l'ère chrétienne, les Chinois se servaient de l'aiguille aimantée pour reconnaître la direction du sud.

Tantôt ils plaçaient l'aiguille sur une planchette flottant sur l'eau. D'autres fois, l'aiguille était mobile sur un pivot vertical; elle était recouverte d'une figurine dont le bras étendu se dirigeait vers le sud, lorsque l'aiguille avait pris sa position d'équilibre. Telle est l'origine de la *boussole*.

L'Europe connut d'abord la boussole à flotteur, elle fut remplacée au treizième siècle par la boussole à pivot.

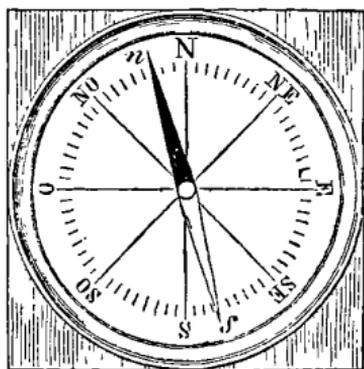


Fig. 83. — Boussole.

Dans les boussoles modernes, une aiguille aimantée *ns* (fig. 83) est mobile sur un pivot vertical qui occupe le centre d'un cercle divisé en 360°. On a, de plus, gravé sur le cercle quatre diamètres faisant entre eux un angle de 45°. Ils marquent les positions des points cardinaux : nord, sud, est, ouest, et des

points intermédiaires : nord-est, sud-est, sud-ouest et nord-ouest. Ce sont les éléments principaux de la *rose des vents*.

Pour se servir de la boussole en un lieu dont la déclinaison est de 17°, il faut placer la boîte horizontale, pour donner à l'aiguille toute liberté de mouvement. On tourne cette boîte jusqu'à ce que la pointe soit vis-à-vis le 17° degré pris à l'ouest de la ligne NS. Cette ligne, qui passe par le zéro de la graduation, est alors dans la direction de la méridienne.

**Boussole marine.** — Les marins font un usage cons-

tant de la boussole, qu'ils appellent le *compas de route*, pour reconnaître la direction de la méridienne. Elle change naturellement à mesure que le vaisseau se déplace sur les mers. Ils doivent en outre connaître une valeur approchée de la déclinaison de l'aiguille aimantée.

L'aiguille est mobile sur un pivot vertical ; elle est adhérente à un cercle de mica très léger sur lequel est tracée la *rose des vents* (fig. 84).

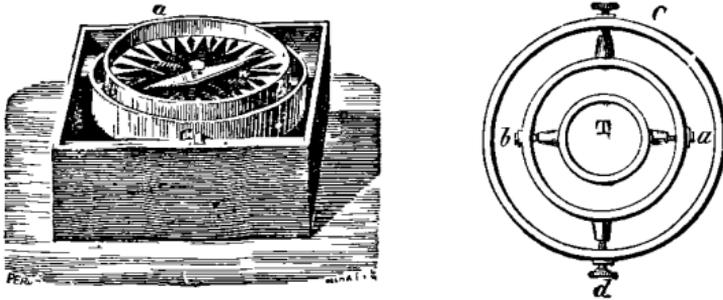


Fig. 84. — Boussole marine et suspension à la Cardan.

Ce cercle est rendu visible pendant la nuit, à l'aide d'une lampe qui l'éclaire en dessous. Sur la boîte de la boussole se trouve marquée la direction de l'axe du navire.

Le timonier doit maintenir cet axe dans une direction déterminée par le capitaine ; il gouverne de telle sorte que l'axe coïncide toujours avec une des branches de la rose des vents qui lui est indiquée à l'avance.

Le roulis et le tangage gênent les mouvements de l'aiguille. Pour la soustraire à ces balancements continuels, on suspend la boîte à deux anneaux mobiles autour d'axes horizontaux. La boîte T se balance d'avant en arrière autour d'un axe *ab* supporté par le premier anneau. Celui-ci se balance à son tour de droite à gauche en tournant autour d'un axe *cd* perpendiculaire au premier. Le dernier anneau qui porte cet axe est fixe<sup>1</sup>.

Ces deux mouvements suffisent pour que la boussole,

1. Cardan, né à Pavie en 1507, a inventé ce mode de suspension.

convenablement lestée, reste horizontale, malgré les mouvements du navire.

### EXERCICES

Pourquoi fabrique-t-on les cloches avec du bronze et non avec du plomb? — Pourquoi n'entend-on pas le son d'une clochette renfermée dans une boîte enveloppée d'une couche épaisse de feutre ou de ouate?

On compte 10 secondes entre le moment où l'on voit un éclair et celui où on entend le coup de tonnerre, à quelle distance se trouve le nuage orageux? — On prendra 537 mètres pour la vitesse du son.

En admettant qu'il faille 6/10 de seconde pour prononcer un mot de six syllabes, à quelle distance d'un mur doit-on se placer pour entendre distinctement et par écho le mot qu'on vient de prononcer?

Comment reconnaît-on qu'un corps est aimanté? — Qu'est-ce qu'un aimant naturel, — artificiel? — Qu'appelle-t-on pôle d'un aimant? — Distinguer le pôle nord, — le pôle sud. — Quelle différence peut-on établir, au point de vue de l'aimantation, entre le fer et l'acier? — Comment aimante-t-on l'un et l'autre? — Quelle est l'action que la terre exerce, — sur un aimant, — sur une barre de fer ou d'acier verticale? — Usages de la boussole. — Définir ce qu'on entend par déclinaison de l'aiguille aimantée. — Comment peut-on s'orienter à l'aide d'une boussole.

---

# COURS DE DEUXIÈME ANNÉE

---

## LIVRE PREMIER

### PESANTEUR

---

#### CHAPITRE PREMIER

##### Notions générales.

**Etats des corps.** — Les corps qui nous entourent, et que nous nommons *matériels*, se révèlent à nous par la résistance qu'ils nous opposent lorsque nous voulons les déplacer.

On éprouve cette résistance s'il s'agit de pousser un wagon sur les rails d'un chemin de fer, de transporter une pierre, une poutre. La résistance de l'eau se fait sentir, si on cherche à la déplacer à l'aide d'une rame. Enfin, si on court rapidement, on sent la résistance de l'air que l'on met en mouvement.

Nous venons de parler de corps qui se présentent à nous sous des états différents : *solides*, *liquides*, *gazeux*. On connaît certains corps, tels que l'eau et le soufre, qui passent successivement par ces trois états.

A l'état solide, ils ont une forme qui leur est propre. Il faut, pour les briser, un certain effort : le choc d'un marteau, l'action d'un outil tranchant. Les diverses parties du corps tiennent avec force les unes aux autres : cette force qu'il faut vaincre pour les séparer porte le nom de *cohésion*. Les corps solides diminuent très peu de volume, si on les soumet à une forte pression ; ils sont peu *compressibles*.

La glace, le soufre, chauffés deviennent *liquides*. Les parties du corps tiennent si peu les unes aux autres, que l'on plonge sans grand effort la main dans l'eau, que l'on coupe facilement un jet de liquide. Le moindre mouvement fait glisser les unes sur les autres les molécules liquides. La forme d'un tel corps est déterminée par celle du vase qui le renferme. La mobilité et le peu de compressibilité sont les caractères essentiels du liquide.

L'eau et le soufre liquide chauffés fortement s'échappent en vapeur : c'est un troisième état que nous retrouvons dans l'air et les autres gaz.

La mobilité de l'air est bien plus grande encore que celle de l'eau ; les courants d'air s'établissent avec une remarquable facilité.

Un gaz n'a pas de forme déterminée, en cela il ressemble aux liquides. Mais il n'a pas plus de volume bien défini. Un litre d'eau, fût-il versé dans une barrique, a toujours le volume d'un décimètre cube.

Mettez un litre d'air dans un tonneau réellement vide, le gaz se dilatera assez pour qu'on le retrouve dans toutes les parties du tonneau. On pourra dire qu'il remplit ce vase. Un gaz est très dilatable et très compressible, ce en quoi il diffère d'un liquide.

Une propriété commune à tout corps, quel que soit son état, est d'avoir un poids déterminé, de pouvoir être pesé dans une balance.

**Pesanteur.** — La *pesanteur* est la cause inconnue qui fait tomber les corps à la surface de la terre, lorsque aucun obstacle ne les arrête. On observe ses effets dans tous les lieux accessibles à l'homme.

**Inertie.** — L'expérience de tous les jours nous apprend que les corps inanimés ne peuvent d'eux-mêmes se mettre en mouvement, changer de place. Il faut une action extérieure, ou, comme on le dit, une *force*, pour les déplacer. La force d'un cheval fait rouler une voiture ; la force de la vapeur entraîne un train sur les rails, et, pour faire tourner les ailes d'un moulin, il faut la force du vent.

Il faut également une force pour faire tomber une pierre.

**Verticale.** — Elle tombe en suivant une ligne droite qu'on appelle *verticale*. On peut la rendre visible à l'aide du *fil à plomb*.

On attache un morceau de plomb à un fil flexible que l'on tient à la main par une de ses extrémités (*fig. 85*). La résistance du fil empêche la chute du plomb. Mais ce fil ne résiste que dans le sens de sa longueur; il reste donc immobile dans la direction verticale que prendrait le corps en tombant.

**Horizontale.** — Une ligne perpendiculaire à la verticale est dite *horizontale*. On peut, par un même point, mener une infinité de lignes horizontales.

Elles sont toutes tracées sur un même plan que l'on dit être *horizontal*.

Prenons une équerre *abe* (*fig. 86*) dont un des côtés *ab* est dans la direction d'un fil à plomb, c'est-à-dire vertical; le côté *ae* sera horizontal. Si on fait tourner l'équerre autour du côté *ab* et si l'on a placé au-dessous un tas de sable qui se trouve nivelé par le mouvement du côté *ae*, la surface du tas sera horizontale.

**Equerre de maçon.** — Les maçons arrêtent les murs, posent les corniches suivant une ligne horizontale.

Ils se guident dans ce travail d'après les indications d'un appareil très simple, une *équerre de maçon*. C'est un triangle *ABC* (*fig. 87*) formé par trois règles de bois. Les côtés *AB*, *AC* sont de longueurs égales; le troisième, qui les

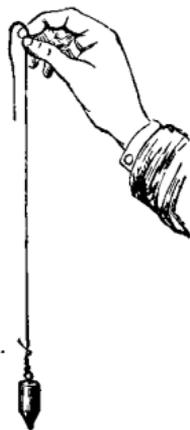


Fig. 85.  
Fil à plomb.

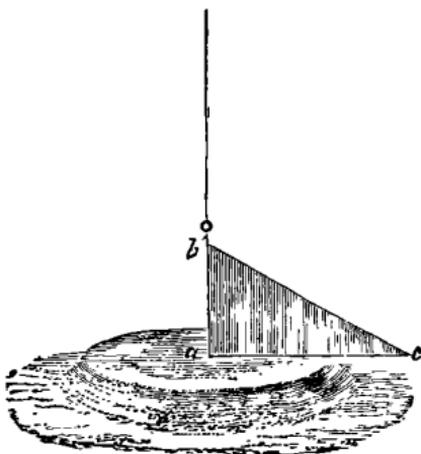


Fig. 86. — Plan horizontal.

réunit, porte, au milieu de sa longueur, un trait transversal D. Un fil à plomb, attaché au sommet A du triangle, pend librement.

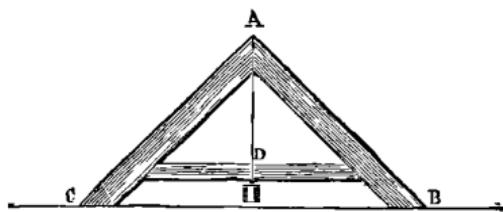


Fig. 87. — Equerre de maçon.

On reconnaît que les pieds B, C de l'équerre reposent sur une ligne horizontale, lorsque le fil à plomb recouvre exactement la ligne tracée en D. On utilise ainsi une propriété des triangles isocèles.

**Direction des verticales.** — La surface d'une eau tranquille, celle d'un étang, celle de la mer calme et sans vagues est horizontale. Cette dernière, qui couvre les trois quarts du globe terrestre, représente bien ce que nous appelons la surface de la terre. En chacun de ses points, la verticale tombe d'aplomb sans pencher plus d'un côté que de l'autre. On dit, en géométrie, qu'elle est perpendiculaire à la surface.

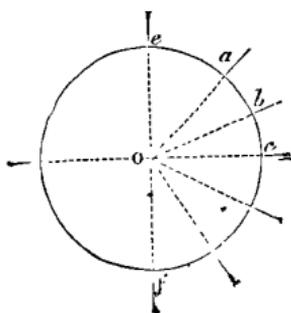


Fig. 88.  
Direction des verticales.

La surface de la terre est sensiblement sphérique, et la géométrie nous enseigne que toutes les lignes perpendiculaires à cette surface, en chacun de ses points, passent par le centre de la sphère et ne sont que les prolongements des rayons qui passent par ces points.

Si nous supposons, tracée sur la surface terrestre, une circonférence dont le centre coïncide avec celui de la terre, les lignes  $oa$ ,  $ob$ ,  $oc$  (fig. 88) qui passent par ce centre seront les directions des verticales aux points  $a$ ,  $b$ ,  $c$ . Elles ne sont pas parallèles, si ces points sont très éloignés sur la surface de la terre.

La verticale de Dunkerque fait, avec celle de Perpignan, un angle de  $9^\circ$  environ.

Dans une ville, deux verticales menées en deux quartiers

différents sont trop voisines pour qu'on puisse apprécier l'angle qu'elles font entre elles. On doit les considérer comme parallèles.

**Chute des corps.** — Tous les corps tomberaient également vite s'ils n'étaient pas enveloppés par l'air qu'ils doivent déplacer pour se mouvoir. Cette résistance de l'air est d'autant plus grande que le corps a une plus grande surface et se meut avec une plus grande vitesse. Il est plus facilement arrêté par l'air lorsque son poids est peu considérable. C'est pour cela qu'une pierre tombe lourdement et rapidement, tandis qu'une feuille d'arbre tournoie longtemps avant d'atteindre le sol.

Voici deux expériences bien simples qui mettent en évidence l'effet de la résistance de l'air.

On découpe un disque de papier en lui donnant les dimensions exactes d'une pièce de 10 centimes. On pose sur le bout du doigt la pièce, sur un autre doigt le disque de papier et on les laisse tomber de la même hauteur. La pièce de cuivre arrive sur le sol longtemps avant le papier; les surfaces sont égales, les poids sont différents, l'avantage est au plus fort.

On recommence l'expérience en posant le disque de papier sur la pièce de monnaie; celle-ci est maintenue horizontale sur le bout du doigt; elle tombe, le métal et le papier touchent le sol en même temps. La pièce a supporté seule la résistance de l'air et a frayé au disque de papier une route sans obstacle. Les deux corps tombent alors également vite.

**Espaces parcourus par un corps qui tombe.** — Il est utile de savoir calculer l'espace que parcourt en un temps donné un corps qui tombe librement.

Un corps qui part du repos parcourt, en tombant, environ 5 mètres (plus exactement, 4<sup>m</sup>,9) en une seconde. S'il tombe pendant un nombre de secondes représenté par  $t$ , on calcule l'espace parcouru en multipliant ~~5~~ par le carré du nombre  $t$ .

Ainsi, en 7 secondes, l'espace parcouru est  $5 \times 49$  ou 245 mètres.

**Poids d'un corps.** — On empêche la chute d'un corps

en le soutenant. Il faut, pour cela, développer un certain effort qui varie d'un corps à l'autre; il est égal à l'action que la pesanteur exerce sur chaque corps. On donne le nom de *poids* à cette action particulière.

Le poids d'un corps quelconque peut être comparé à un autre poids pris pour unité.

On sait que cette unité est, en France, le *gramme*, poids d'un centimètre cube d'eau pure, prise à la température de 4° et pesée à Paris, dans le vide.

**Balance.** — On pèse les corps à l'aide de la balance. La pièce principale d'une balance est une barre métallique, plus large au milieu qu'aux extrémités, assez résistante pour ne pas fléchir, lorsque la balance est chargée de poids; c'est le

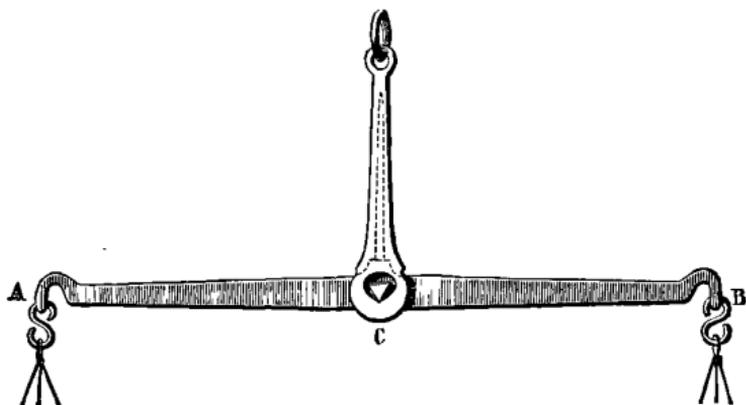


Fig. 89. — Fléau de la balance.

*fléau* AB (*fig.* 89). Une barre d'acier C la traverse en son milieu, elle a la forme du coin d'un casseur de bois; l'arête tranchante est en bas; on lui donne le nom de *couteau*; il repose, dans les balances communes, sur une pièce de fer courbée en U, la *chape*. Une *aiguille*, fixée au-dessus du couteau, est cachée par la chape lorsque le fléau est horizontal. Deux plateaux sont attachés, par des crochets et des chaînes, aux extrémités A, B du fléau. La condition essentielle est que les distances des points d'attache A et B à l'arête C du couteau soient égales.

Dans les balances faites avec soin, le fléau *ab* (fig. 90) repose sur des plans d'acier fixés à la partie supérieure d'une colonne *dd*. On peut la rendre verticale à l'aide des vis que l'on voit à la partie inférieure.

L'aiguille se meut devant un arc divisé *e*. Elle se fixe vis-à-vis du milieu de l'arc lorsque la balance est vide, ou lorsqu'elle supporte des poids égaux dans ses plateaux.

Si on l'écarte de cette position, elle y revient en faisant de part et d'autre du milieu de l'arc des oscillations de grandeurs égales. Si les poids ne sont pas égaux, le fléau s'abaisse du côté du poids le plus fort.

On reconnaît qu'une balance donne exactement le poids d'un corps, en faisant deux pesées successives. On le place dans le plateau A et on ajoute dans le plateau B assez de grammes pour que l'aiguille se fixe au repos au milieu de l'arc *e*, soit

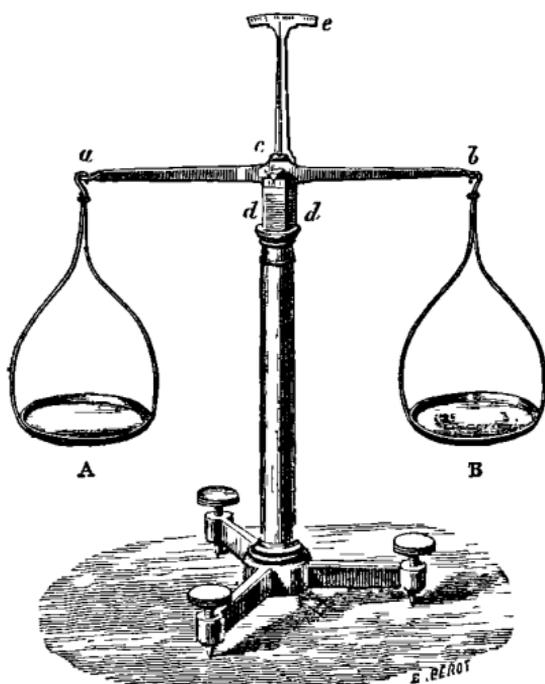


Fig. 90. — Balance.

500 grammes, par exemple. On place alors le corps dans le plateau B et on met les grammes en A. Si on retrouve 500 grammes, la balance est bonne. Si on trouve 504 grammes dans la seconde pesée, la balance est fautive, et le bras *ae* est plus petit que le bras *ad*.

Le poids réel peut se trouver à l'aide des deux pesées ; il suffit, pour cela, de prendre leur moyenne arithmétique, autrement dit, d'en faire la demi-somme. Le poids du corps est 502 grammes.

On peut faire autrement ces deux pesées. Le corps est déposé dans le plateau A; on met dans le plateau B du sable ou de la grenaille de plomb en quantité telle que le fléau redevienne horizontal. C'est ce qu'on appelle *faire la ture*. Enlevons le corps et remplaçons-le par des poids marqués, de manière à rétablir l'équilibre entre ces poids et la grenaille de plomb. Le nombre de grammes placés dans le plateau A donne le poids exact du corps qu'ils remplacent, et cela, quelle que soit l'inégalité des bras du fléau. Telle est la méthode de double pesée de Borda<sup>1</sup>.

**Pendule.** — Un fil à plomb Sa (fig. 91) est en équilibre dans la verticale. Son extrémité S est fixe, il soutient une

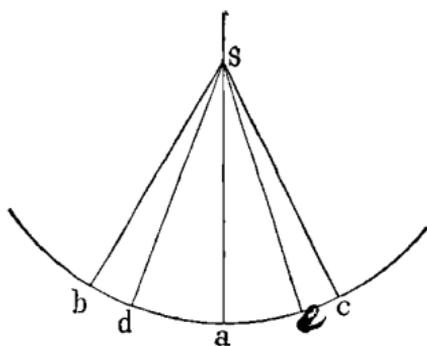


Fig. 91. — Pendule.

petite boule pesante a. On écarte cette boule en maintenant le fil tendu, on l'amène en b, et on l'abandonne. Cette boule tend à tomber, ce qu'elle ne peut faire qu'en décrivant l'arc de cercle ab, car elle doit toujours rester à la même distance du point S. Elle ne s'arrête pas au point le plus

bas, a, mais remonte du côté opposé en décrivant l'arc ac égal à ab. Elle a fait une *oscillation*. L'arrêt se fait en c, puis la boule décrit, en sens inverse, l'arc cab, qu'elle vient de parcourir.

La résistance de l'air ne lui permet pas de revenir exactement en b et elle s'arrête un peu au-dessous. Les oscillations se succèdent en devenant de plus en plus petites, et, au bout d'un certain temps, la boule se retrouve immobile en a.

Ce petit appareil porte le nom de *pendule*.

**Egalité de durée des oscillations.** — Supposez qu'on puisse évaluer, à l'aide d'une bonne montre à secondes, la durée de cinquante oscillations du pendule; puis, qu'on

1. Borda, savant ingénieur, né à Dax en 1733, mort à Paris en 1799.

fasse la même mesure pour les cinquante oscillations qui suivront les premières, et ainsi de suite, tant que les oscillations ont une grandeur appréciable; on trouve à chaque fois le même nombre de secondes, pourvu que l'arc *bc* d'une oscillation ne soit que de quelques degrés.

On en conclut que la durée d'une petite oscillation *ed* est la même que celle d'une oscillation plus grande *bc*; la durée des petites oscillations est indépendante de leur grandeur.

Cette loi, due à Galilée<sup>1</sup>, donne un moyen précis de mesurer le temps.

Si la distance *sa* du point de suspension au centre de la boule *a* est de 0<sup>m</sup>,993, et si l'on est à Paris, le pendule fera une oscillation en 1 seconde, 60 par minute, ou 86400 en un jour. Cette longueur, voisine du mètre, est celle du pendule à secondes.

La durée de l'oscillation change avec la longueur: Il faut donner au pendule une longueur quatre fois plus petite, environ 0<sup>m</sup>,25, pour qu'il batte la demi-seconde. Il lui faudrait une longueur quatre fois plus grande pour que son oscillation durât deux secondes.

**Application aux horloges.**

— Huyghens<sup>2</sup> s'est servi du pendule pour régulariser le mouvement des horloges.

Dans les horloges le plus communément employées, un poids *P* (fig. 92) est attaché à une corde qui s'enroule sur un cylindre

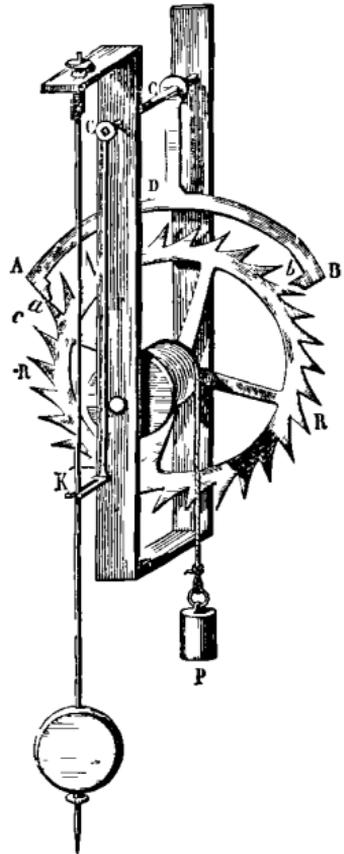


Fig. 92.  
Echappement à ancre.

1. Galilée, né à Pise en 1564, mort en 1642.

2. Huyghens (Constantin), né à La Haye, en 1629, mort en 1695.

mobile; par sa chute, il fait tourner le cylindre, et, par suite, tous les rouages de l'horloge. La chute libre allant sans cesse en s'accélégrant, il est important de ramener à chaque instant le poids au repos.

On y parvient à l'aide du pendule.

L'un des rouages, appelé *roue d'échappement* R, porte trente dents aiguës, et le poids moteur la fait tourner dans le sens de la flèche. Elle est placée au-dessous d'une pièce mobile D, ayant la forme d'une *ancree* armée de deux dents *a, b*. L'ancree tourne autour d'un axe horizontal CC, qui est relié à un pendule par une tige à fourche K. Le pendule ne peut se balancer sans entraîner la tige K et sans faire osciller l'ancree. Les deux extrémités *a, b* se placent alternativement entre les dents de la roue R et l'arrêtent tantôt à droite, tantôt à gauche. Tous les rouages, les aiguilles sont arrêtés par ce fait.

Donnons au pendule la longueur du pendule à seconde.

L'oscillation du pendule se faisant, par exemple, vers la gauche; l'ancree s'éloigne de la roue, du côté A, la dent *a* est libre, la roue tourne; mais elle est arrêtée par la branche B, après avoir fait un soixantième de tour. Si l'axe de la roue porte une aiguille, qui parcourt un cadran sur lequel sont tracées soixante divisions, cette aiguille s'avance d'une division à chaque oscillation du pendule; l'aiguille marque la seconde, et elle fait le tour du cadran en une minute.

Pendant l'été, la tige de fer du pendule se dilate et s'allonge; elle se raccourcit en hiver; son oscillation est plus lente en été, l'horloge retarde; plus rapide en hiver, l'horloge avance.

**Centre de gravité.** — Toutes les parties d'un corps sont pesantes; si on le brise, les morceaux tombent à terre aussi bien que le corps entier.

Il n'y en a pas moins dans le corps un point qu'il suffit de soutenir pour qu'il reste immobile, malgré l'action de la pesanteur. Ce point porte le nom de *centre de gravité*, et le corps immobile est dit en *équilibre*.

L'expérience nous apprend que, si un corps n'a qu'un point

fixe, il faut, pour l'équilibre, que le centre de gravité se trouve sur la verticale passant par ce point.

De là, un moyen de trouver, dans certains cas, la position du centre de gravité. Prenons un carton de forme triangulaire ABC (*fig. 93*), suspendons-le à un fil flexible par un des sommets A, et attendons qu'il soit immobile. Traçons alors sur le carton le prolongement Aa du fil, nous aurons une ligne sur laquelle se trouve le centre de gravité du triangle. Re commençons l'expérience en attachant le fil au sommet B, et soit Bb le prolongement du fil vertical.

Le centre de gravité est à l'intersection G des deux lignes, ou plutôt il est à l'intérieur du carton, vis-à-vis le point G, à égale distance des deux faces.

On s'en assure en posant le point G sur une tige taillée en pointe et pénétrant jusqu'à la moitié de l'épaisseur du carton, celui-ci reste immobile dans la position horizontale.

On trouve par le raisonnement, et l'expérience vérifie, que le centre de gravité d'une baguette cylindrique ou prismatique est au milieu de la ligne qui joint les centres de gravité des deux bases. Le centre de gravité d'un cercle, d'une sphère est au centre de figure.

Si une règle est formée de deux parties égales, l'une en bois, l'autre en cuivre, la seconde pèse beaucoup plus que la première, et le centre de gravité se trouve, non plus au milieu de la règle, mais dans la partie occupée par le cuivre.

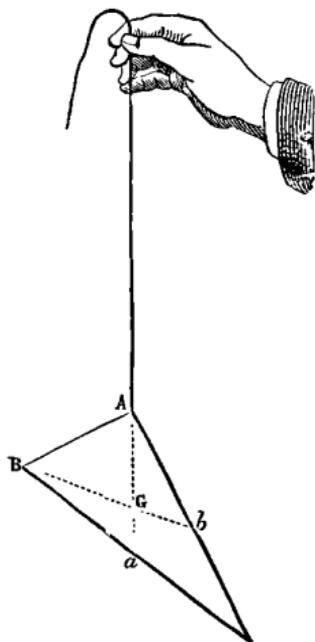


Fig. 93. — Détermination du centre de gravité.

## CHAPITRE II

### Propriétés des liquides.

Un liquide, avons-nous dit, est un corps très mobile, et dont la *compressibilité* est assez faible pour être négligée.

Nous allons étudier de préférence l'eau, qui est le liquide le plus commun; les propriétés que nous lui trouverons devront être étendues aux autres liquides.

**Surface d'une eau tranquille.** — Lorsque l'eau d'un lac n'est pas agitée par le vent ou par quelque cause extérieure, la pesanteur, qui agit seule sur elle, lui donne une surface plane et horizontale. Elle est alors en équilibre.

La surface est plane, car elle réfléchit la lumière comme le ferait un miroir plan, et l'image des arbres plantés sur les bords d'un étang se peint dans l'eau comme dans une glace.

La surface est horizontale. Nous pouvons remarquer qu'en vertu de son extrême mobilité, l'eau se meut sur une surface inclinée comme le ferait une bille d'ivoire, et mieux encore.

Si donc il se produit momentanément une vague à la surface de l'eau, comme les surfaces de la vague sont inclinées, les molécules d'eau les plus élevées roulent sur celles qui sont à la base, et le mouvement ne s'arrête que lorsque la surface totale du liquide est redevenue horizontale.

**Pression.** — Voici un mot dont nous nous servirons souvent, et qu'il est bon de définir.

Un corps pesant, que nous déposons sur une table, exerce sur elle, dans la direction verticale, une pression égale à son poids.

Dans une direction horizontale, la pression est nulle. Une colonne de bronze pèse de tout son poids sur le sol qui la

supporte ; mais, si on applique la main sur sa surface latérale, on ne sent aucune pression.

La grandeur de la pression ne peut être évaluée que si on connaît l'étendue de la surface pressée. Formons une pile de 20 briques égales, pesant chacune 2 kilogrammes, et ayant pour surface 2 décimètres carrés. Nous aurons une pression de 40 kilogrammes, répartie sur cette surface ; chaque décimètre carré supporte 20 kilogrammes.

Répartissons les briques en deux piles de 10 chacune ; le même poids, 20 kilogrammes, est soutenu par une surface de 4 décimètres carrés ; la pression est de 10 kilogrammes par décimètre carré.

Pour évaluer une pression, il ne suffit pas de connaître le poids du corps qui l'exerce, il faut connaître l'étendue de la surface pressée, et calculer la valeur de cette pression par unité de surface.

Un bloc de pierre pesant 2000 kilogrammes repose sur une surface carrée de 5 décimètres de côté ; cette surface est 25 décimètres carrés.

Si on prend le décimètre carré pour unité de surface, la pression sera  $\frac{2000}{25} = 80$  kilogrammes. Si l'unité de surface adoptée est le mètre carré, en supposant que chacun des 100 décimètres carrés qui la composent supporte la pression de 80 kilogrammes, on énoncera la même pression en disant qu'elle est de 8000 kilogrammes par mètre carré.

Rapporte-t-on la pression au centimètre carré, son expression sera 0<sup>kg</sup>,8 par centimètre carré.

Sous ces trois formes, la pression est rigoureusement la même. Elle s'obtient en divisant le poids du corps par la surface pressée, évaluée à l'aide de l'unité adoptée.

Une pression d'un kilogramme par millimètre carré est équivalente à 100 kilogrammes par centimètre carré, ou 10000 kilogrammes par décimètre carré.

**Pression exercée par un liquide.** — Les corps pesants solides n'exercent leur pression que dans la direction verticale. Un liquide pressé sur sa surface transmet dans

tous les sens, sur les parois du vase qui le renferme, la pression qu'il supporte.

Une boule métallique A (*fig. 94*), percée de trous, comme une pomme d'arrosoir, est surmontée d'un cylindre dans lequel se meut un piston qui frotte contre les parois. On le remplit, ainsi que la boule, en plongeant celle-ci dans l'eau, et retirant de bas en haut le piston. Si, alors, mettant tout l'appareil dans l'air, on presse sur le piston, on voit l'eau jaillir par tous les trous à la fois. La pression que l'on exerce à l'aide du piston se transmet donc dans tous les sens dans l'intérieur du liquide et le fait jaillir partout où il y a un orifice libre.

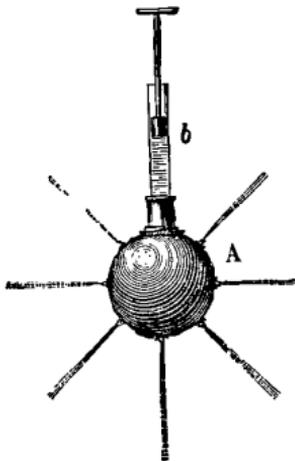


Fig. 94.  
Transmission de pression.

Examinons en détail cette transmission de pression.

#### **Pression d'un liquide sur le fond d'un vase.**

— On a plusieurs vases de verre ouverts aux deux bouts, ce qu'on appelle des manchons. L'un, A, est cylindrique; l'autre, B, est évasé; le troisième, C, est rétréci par le haut (*fig. 95*). Leurs orifices inférieurs ont même surface. On peut les visser successivement sur un support S. Les bords inférieurs sont dressés avec soin, et le vase est fermé, si on applique sur ses bords un disque de verre dépoli *m*, que nous appellerons l'*obturateur*.

Au centre de celui-ci est un crochet qui permet de le suspendre, à l'aide d'un fil, à l'un des plateaux d'une balance. Son poids fait pencher le fléau, mais on ramène celui-ci à l'horizontalité, en chargeant convenablement le second plateau de sable ou de grains de plomb; on fait ainsi la *tare* de l'*obturateur*.

On met ensuite dans ce second plateau un poids de 200 grammes, il détermine une pression du disque de verre sur les bords du vase A, et assure ainsi la fermeture complète de ce vase.

Cette pression est dirigée de bas en haut.

L'eau que l'on verse dans le vase ne peut s'écouler au dehors, mais son poids charge le disque *m* et tend à le détacher du manchon. Si l'on verse l'eau d'une manière continue, on voit à un certain moment des gouttes suinter entre le disque et le vase : on amène alors la tige horizontale *l* vis-à-vis du niveau de l'eau. La pression de la colonne de liquide sur le fond du vase est alors égale à 200 grammes, valeur de la pression qui retient le fond.

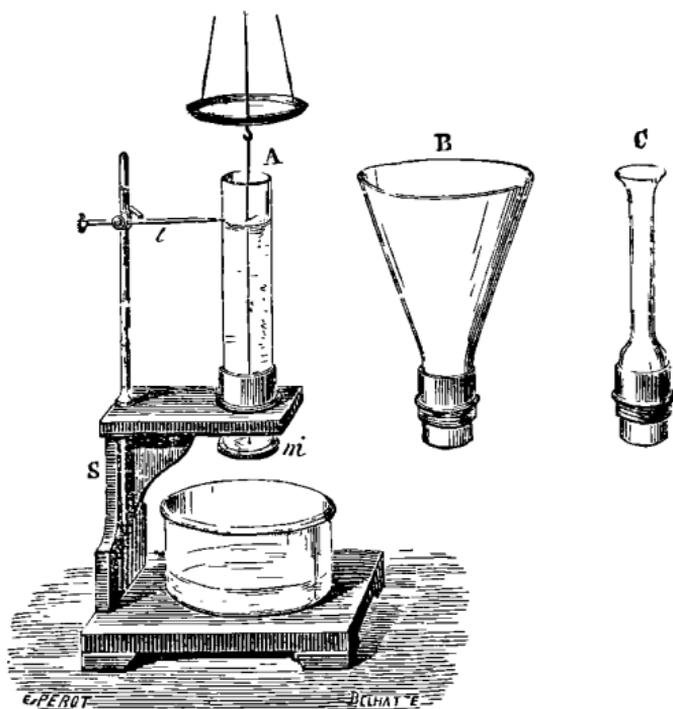


Fig. 95. — Pression sur le fond des vases.

On pourrait s'assurer, en vidant le vase A, que le poids d'eau qu'il contient est de 200 grammes. On peut donc affirmer que, dans un vase de forme cylindrique, l'eau pèse de tout son poids pour détacher le fond des parois latérales du vase.

C'est ce qu'on appelle la *pression sur le fond*.

Cette pression est indépendante de la forme du vase; elle ne dépend que de la hauteur du niveau libre du liquide, au-dessus du fond, si on l'évalue sur des surfaces égales.

On le reconnaît en substituant les manchons B, C au premier, A, et en recommençant pour chacun d'eux la même expérience. Si on amène dans chacune d'elles le niveau du liquide vis-à-vis de la tige t, qu'on a laissée dans la même place, on voit l'obturateur se détacher du vase. Dans chaque cas, la pression de l'eau est égale à 200 grammes, poids que l'on a laissé avec la tare dans le plateau de la balance.

Remarquez que le poids réel de l'eau varie d'un vase à l'autre, il est supérieur à 200 grammes dans le manchon évasé B, il lui est de beaucoup inférieur dans le vase C. C'est là ce qui fait l'importance de cette expérience.

Dans les trois vases, le fond a même surface, 20 centimètres carrés, par exemple; le niveau est amené dans chaque expérience à 10 centimètres du fond. Le produit de ces deux nombres donne le volume de l'eau qui est dans le vase cylindrique, et, par suite, son poids 200 grammes. C'est la valeur commune de la pression : On exprimerait ce fait en disant qu'elle est de 10 grammes par centimètre carré.

Quelle que soit la forme d'un vase ou d'une masse d'eau, la pression exercée sur une surface horizontale formant le fond ou une partie du fond d'un vase s'obtient, en grammes, en multipliant le nombre qui exprime en centimètres carrés la surface pressée par le nombre de centimètres qui mesure sa distance verticale au niveau libre du liquide.

On voit bien que cette pression est exclusivement due à ce que le liquide est pesant.

**Pression sur une tranche horizontale de liquide.** — Si nous plongeons dans un vase plein d'eau un des manchons qui nous ont servi plus haut, le cylindrique A, il découpera, sur la tranche horizontale à laquelle il s'arrête, une surface liquide que l'on pourra considérer comme le fond du vase. Cette surface, isolée en quelque sorte du reste de ce liquide, supporte le poids de l'eau qui est dans le manchon. La valeur de la pression de haut en bas qui en

résulte est la même que celle qui s'exercerait sur un fond solide. Elle ne change pas, si on déplace latéralement le manchon en maintenant toujours son ouverture inférieure dans le même plan horizontal, à une distance constante du niveau libre.

On peut étendre le résultat au cas où l'ouverture inférieure du manchon ne serait plus qu'un millimètre carré. La pression demeure la même, quel que soit le point de la tranche horizontale où l'on place ce millimètre carré.

*On en conclut que : dans un liquide en repos tous les points d'un plan horizontal mené à l'intérieur du liquide sont soumis à la même pression verticale dirigée de haut en bas.*

Cet énoncé s'applique également à la surface libre du liquide. Il n'y a équilibre, que si tous les points de cette surface supportent des pressions égales.

**Pression de bas en haut.** —

On peut se demander pourquoi cette pression ne met pas le liquide en mouvement? C'est qu'il existe une pression égale dirigée de bas en haut, et qui détruit complètement l'effet de la première.

Nous reprenons le manchon A (fig. 96), et, après l'avoir essuyé, nous le fermons à sa partie inférieure par un obturateur *m* déjà décrit. On maintient celui-ci appliqué contre les bords du manchon, en agissant sur le fil *b*.

Le manchon vide est plongé dans l'eau. On peut abandonner le fil, le disque de verre ne tombe pas. Il existe donc une pression du liquide, dirigée de bas en haut, qui soutient l'obturateur. Versons de l'eau dans le manchon, sa pression tend à détacher le disque; elle y parvient, lorsque le niveau de l'eau dans l'intérieur du manchon atteint le niveau extérieur du liquide. La pression extérieure a donc pour valeur le poids d'une colonne d'eau qui a pour base l'ouverture du manchon, et qui s'élève verticalement jusqu'au niveau

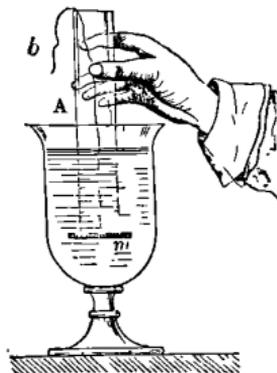


Fig. 96.  
Pression de bas en haut.

du liquide. C'est aussi la valeur de la pression intérieure.

De là vient que si on supprime le manchon, et si on soutient l'obturateur dans l'eau, on peut le faire mouvoir à l'aide du fil sans être gêné en rien par l'existence des pressions qui s'exercent sur ses deux faces, dans des directions opposées.

**Pressions latérales.** — Les parois latérales d'un vase sont pressées par le liquide qu'il renferme, lors même qu'elles ont une direction verticale.

Un vase à parois verticales est percé près du fond d'un

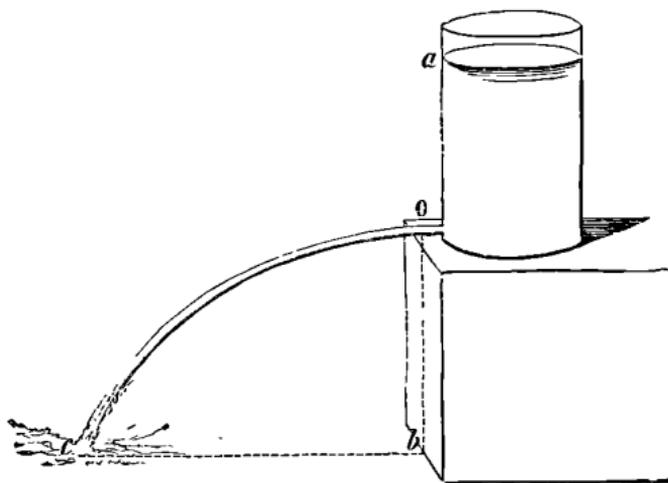


Fig. 97. — Pressions latérales.

trou *o* (fig. 97). On le remplit d'eau. Le liquide sort du vase sous forme d'un jet horizontal. Ce qui démontre l'existence d'une pression horizontale qui pousse le liquide de dedans en dehors. La paroi reçoit la même pression en chacun de ses points. Le jet se courbe avant d'arriver à terre : c'est un effet de la pesanteur qui fait toucher l'eau peu à peu, à mesure qu'elle s'éloigne du vase en vertu de la poussée qu'elle a reçue. Plus cette poussée est forte, et plus est grande l'amplitude *bc* du jet. On reconnaît qu'elle est proportionnelle à la distance *oa* de l'orifice au niveau libre, car, à mesure que le vase se vide et que le niveau *a* s'abaisse, le point *c* se rapproche de *b*.

La pression horizontale qui s'exerce en *o* est la même que la pression verticale qui convient au plan horizontal passant par le milieu *o* de l'orifice.

Elle est encore due à ce fait, que les tranches inférieures du liquide doivent supporter le poids des couches supérieures; mais la particularité du liquide c'est que cette pression qui devrait être verticale se transmet dans tous les sens, sans s'altérer, c'est-à-dire en restant la même, si on l'évalue sur chaque unité de surface.

La pression est indépendante de la forme du vase et par suite du poids réel de l'eau qui s'y trouve.

Pascal<sup>1</sup> l'a démontré, en remplissant d'eau un tonneau B (*fig. 98*). Un long tuyau de plomb A était mastiqué dans le fond du tonneau. On le remplissait d'eau; la pression sur les parois alla en augmentant à mesure que le niveau s'élevait dans le tube; elle devint assez forte pour faire éclater les cercles qui retenaient les douves du tonneau; et cependant le poids de l'eau versée dans le tuyau était très faible, relativement à celui du liquide que le tonneau renfermait. La distance verticale du niveau libre à la surface pressée et la grandeur de cette surface sont les seules quantités qui déterminent la valeur de la pression et qui permettent de la calculer.

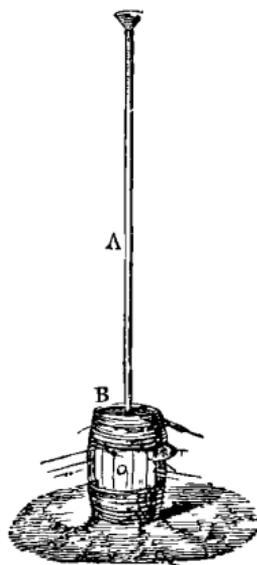


Fig. 98.  
Tonneau de Pascal.

**Recul d'un vase.** — Un vase rendu très mobile ABC (*fig. 99*) est plein d'eau, les pressions qu'il supporte en A et en B sur la même horizontale sont égales; elles le poussent dans des sens opposés, et leurs effets se détruisent. Perçons la paroi au point B; elle n'est plus pressée en ce point; mais l'eau jaillit par l'orifice. La pression

1. Pascal (Blaise), né à Clermont-Ferrand en 1623, mort à Paris en 1662.

qui poussait la paroi A vers la gauche persiste, et elle fait reculer le vase.

Un écoulement de gaz produit le même effet. Si l'on brûle

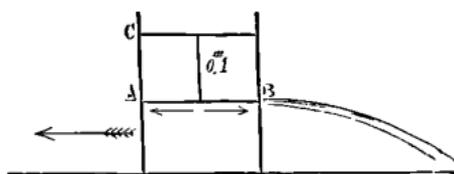


Fig. 99.

la poudre dans un canon, celui-ci recule au moment de l'explosion. Une fusée s'élève dans l'air par suite du recul d'une cartouche pleine de poudre. Les gaz produits par la combustion se dégagent de haut en bas, la cartouche file de bas en haut.

**Tourniquet hydraulique.** — On suspend à une

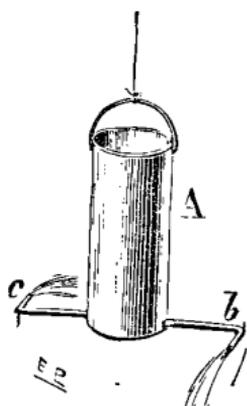


Fig. 100. — Tourniquet hydraulique.

ficelle un vase cylindrique A (fig. 100) qui porte à sa base deux tubes ouverts b, c, courbés à angle droit à leurs extrémités. L'eau que l'on verse dans ce vase s'écoule par les tubes dans des directions opposées, et le mouvement de recul qui en résulte fait tourner le vase en sens inverse de l'écoulement de l'eau.

Les turbines, organe moteur de certaines usines, sont une application remarquable de l'expérience précédente.

**Vases communicants.** — Con-

sidérons deux flacons tubulés A, B (fig. 101), qui communiquent entre eux par un tuyau de caoutchouc, comme l'indique la figure. On remplit d'eau le flacon A en maintenant le tuyau fermé. Si on vient à l'ouvrir, l'eau passe dans le flacon B, et n'est en équilibre que si les niveaux du liquide dans les deux vases sont sur le même plan horizontal mn.

Si on soulève alors le vase B, l'eau revient en A, et l'égalité de niveau se rétablit.

On peut considérer cette expérience comme la vérification d'une loi énoncée plus haut. Dans une masse liquide en équilibre, tous les points pris sur un plan horizontal doivent

subir des pressions égales et, par conséquent, être à la même distance du niveau libre du liquide.

— D'où résulte que les niveaux pris dans tous les vases doivent se trouver sur le même plan horizontal, quelle que soit la forme des vases ou des tubes de communication.

On fait une application constante de ce principe pour distribuer l'eau dans une ville. Cette eau est amenée par des aqueducs ou par l'action d'une pompe dans des réservoirs en maçonnerie placés au point culminant de la ville.

Des tuyaux de conduite en fonte partent de ce réservoir, ils sont enfouis en terre, et envoient à droite et à gauche des tuyaux plus petits qui se subdivisent à leur tour. Ce

réseau de tuyaux aboutit à des robinets situés dans les rues ou dans les maisons ; ils donnent de l'eau quand on les ouvre, à la condition d'être placés au-dessous du niveau de l'eau pris dans les grands réservoirs.

**Jet d'eau.** — Si un de ces robinets termine un tuyau vertical, l'eau jaillit de bas en haut : on a un *jet d'eau*.

On peut en faire l'expérience en adaptant à un vase percé

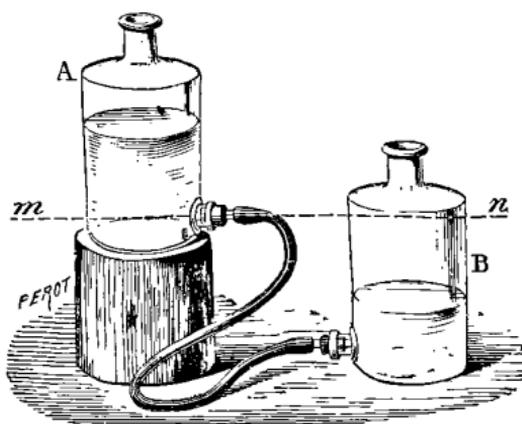


Fig. 101. — Vases communicants.

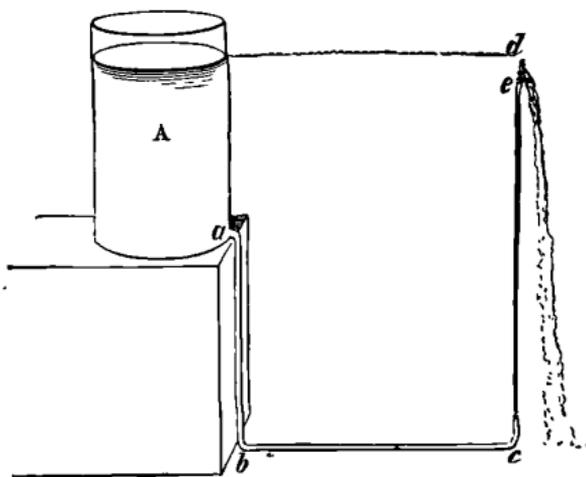


Fig. 102. — Théorie du jet d'eau.

à sa partie inférieure un tube *abc* (fig. 102), qui s'ouvre en *c* à une distance notable *cd* du niveau. La hauteur du jet est à peu près égale à cette distance. Elle est, comme on le voit, proportionnelle à la pression que le liquide exerce à l'orifice *c* du tube. Le frottement de l'eau dans le tuyau diminue la hauteur du jet.

**Puits.** — Les eaux pluviales en s'infiltrant dans le sol y forment des nappes souterraines dont la surface est horizontale. Si on creuse un puits jusqu'aux couches de sable qui contiennent ces nappes, l'eau pénètre dans le puits et y monte jusqu'à ce que son niveau soit à la hauteur du niveau général de la nappe. Parfois, ces couches perméables s'étendent jusqu'au sol, et des pluies prolongées font monter le niveau jusqu'à la hauteur des caves qui sont alors inondées. Lorsque les couches humides sont recouvertes par d'autres couches imperméables, leur niveau peut être beaucoup au-dessus du lieu dans lequel on perce le puits, alors la nappe d'eau jaillit au-dessus du sol; on a un puits artésien.

**Niveau d'eau.** — Nous trouvons encore une application

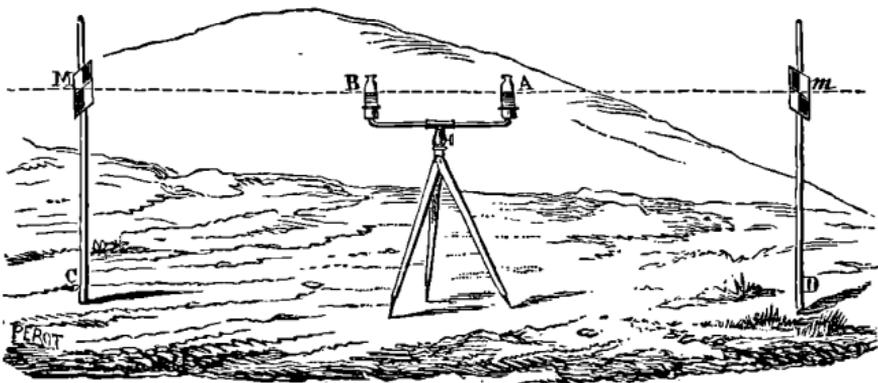


Fig. 103. — Opération du nivellement.

du principe des vases communicants dans le *niveau d'eau*, dont les arpenteurs se servent pour obtenir sur le terrain une ligne horizontale.

Un tube de fer-blanc se recourbe à ses deux extrémités et se termine par deux manchons de verre A, B (fig. 103). Il

est porté par un trépied. On y verse de l'eau qui se met de niveau dans les deux fioles. La ligne AB, qui passe par ces niveaux, est horizontale. L'arpenteur, plaçant l'œil à la hauteur de l'un d'eux A, vise l'autre B, et peut faire placer sur cette ligne de visée des mires M, m, dont les centres seront sur l'horizontale AB. Les distances MC, MD, de ces mires au sol lui font connaître la pente du terrain.

**Liquides superposés.** — Plaçons dans un flacon des liquides qui ne puissent se mélanger : mercure, eau, benzine,

Ils se rangent par ordre de *densité*. C'est-à-dire que le mercure, qui à *volume égal* pèse plus que l'eau, se place au fond ; il est recouvert par l'eau. La benzine se place au-dessus ; un litre de benzine pèse moins qu'un litre d'eau.

*Les surfaces de séparation des trois liquides sont horizontales.*

On peut agiter le flacon (*fig. 104*) et mélanger les liquides, ils reprennent d'eux-mêmes leurs positions lorsqu'on les laisse en repos.

Si on verse avec précaution du vin ou de l'eau-de-vie sur l'eau, les deux liquides se maintiennent ainsi séparés pendant un certain temps ; mais, à la longue, ils se mélangent intimement.



Fig. 101.  
Liquides superposés.

**Applications.** — Toutes les expériences que nous avons décrites vérifient un principe général énoncé par Pascal, et connu sous le nom de principe de transmission de pression.

Lorsqu'une certaine surface d'un liquide supporte une pression déterminée, celle-ci se transmet dans tous les sens et on la retrouve la même sur une surface égale à la première, quelles que soient la position et l'orientation de cette surface.

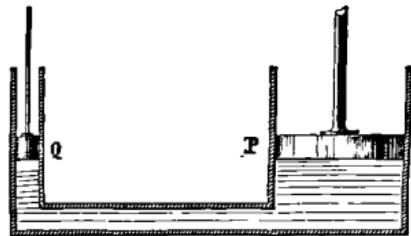


Fig. 105. — Transmission de pression.

Il en résulte que les pressions évaluées sur deux surfaces

différentes sont proportionnelles à l'étendue de ces surfaces.

**Presse hydraulique.** — Deux cylindres A, B (*fig. 105*), communiquent ensemble par un tuyau, ils sont pleins d'eau et bouchés par deux pistons P, Q qui reposent sur le liquide.

Leurs sections sont différentes. La surface de la plus petite étant prise pour *unité*, celle de la plus grande est *cent*. On charge le piston Q d'un poids de 20 kilogrammes, le liquide transmet cette pression au piston P, elle est encore de 20 kilogrammes par unité de surface, et par suite sur la surface entière du piston P la pression est  $20 \times 100$  ou 2000 kilogrammes. Tel est le poids dont il faudrait charger le grand piston pour l'empêcher de se soulever, et, malgré cette charge, un effort de 21 kilogrammes exercé sur le piston Q déterminera un mouvement lent du piston P dirigé de bas en haut.

Tel est le principe de la *presse hydraulique*, l'un des engins les plus puissants de l'industrie moderne. Un effort modéré exercé sur un piston de petite dimension Q est transformé par la transmission hydraulique en un effort considérable sur le piston P. Ce dernier peut soulever d'énormes fardeaux, la charpente en fer d'un pont suspendu par exemple. Le *vérin* hydraulique n'est pas autre chose. On peut exercer des pressions considérables sur un corps placé entre deux plates-formes : l'une qui est fixe et l'autre qui est poussée vers la première par la tige du piston P. Telle est la presse hydraulique qui sert à réduire à un petit volume les corps peu denses, tels que le coton ou le foin, à extraire le jus sucré de la betterave dans les fabriques de sucre ou l'huile des graines de colza, etc.

Si le piston se meut dans le sens horizontal, on peut s'en servir pour faire avancer de très lourds fardeaux.

Nous citerons encore, comme reposant sur le même principe : les grues hydrauliques que l'on emploie dans les docks pour charger ou décharger les vaisseaux ; les ascenseurs que l'on trouve installés dans les grands hôtels pour le service des divers étages. Dans ces deux dernières applications, on obtient souvent une pression suffisante, en faisant agir sur

des surfaces relativement faibles l'eau qui vient d'un réservoir très élevé et qui se trouve par là même fortement comprimée.

**Principe d'Archimède.** — Nous avons reconnu qu'un liquide, tel que l'eau, exerce sur la surface d'un corps qui s'y trouve plongé des pressions dont les directions sont très variées. Nous allons indiquer l'effet général de toutes ces pressions.

Deux cylindres de laiton (*fig. 106*), l'un plein *b*, l'autre vide *a*, sont tels qu'en introduisant le premier dans le second, il le remplisse exactement. On les suspend à l'aide d'un fil, l'un au-dessus de l'autre, et on accroche le cylindre creux *a* au plateau d'une balance. On leur fait équilibre, en mettant de la grenaille de plomb, ou du sable dans le second plateau. Lorsque le fléau est rendu horizontal, on plonge dans un vase plein d'eau le cylindre massif *b*.

Le plateau qui porte les deux cylindres se soulève, comme si sa charge se trouvait subitement diminuée. Pour rétablir l'équilibre, on remplit d'eau le cylindre creux *a*, et le fléau redevient horizontal.

Le liquide qui environne le cylindre *b*, exerce sur lui une action qui semble diminuer son poids comme le ferait une poussée verticale dirigée de bas en haut. La valeur de cette poussée est le poids de l'eau qui remplit le cylindre creux ; son volume est égal à celui du cylindre plein, ou, si l'on veut, c'est le volume d'eau déplacé par le cylindre.

Cette expérience a été faite par Galilée pour vérifier un principe ou une loi énoncée par Archimède<sup>1</sup>.

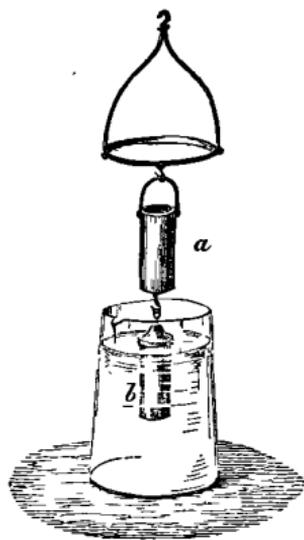


Fig. 106. — Vérification du principe d'Archimède.

1. Archimède, né à Syracuse, 287 ans av. J.-C., mort en 212.

*Un corps plongé dans un liquide y subit une poussée égale au poids du liquide dont il occupe la place.*

Nous disons un liquide, car, si on plongeait le cylindre plein dans un liquide autre que l'eau, dans l'alcool, il faudrait, pour rétablir l'équilibre, remplir d'alcool le cylindre creux.

Pour avoir le poids *réel* d'un corps, il faut le peser dans le vide. Plongé dans l'eau, il a un poids *apparent* plus faible, et la différence des deux poids est le poids de l'eau déplacée. Ce qui fait dire qu'en passant du vide dans l'eau il semble perdre une partie de son poids.

**Corps plongés dans l'eau.** — On doit concevoir le corps immergé dans l'eau comme soumis à deux actions contraires. La première vient de la pesanteur, elle constitue le *poids* du corps, force verticale qui le fait tomber, si elle est seule à agir. La seconde est la *poussée du liquide*, force verticale qui tend à le soulever et à l'amener à la surface ; elle est égale au poids de l'eau qu'il a déplacé. Supposons que ce corps soit un cube de fer de 0<sup>m</sup>,03 de côté, son poids est 212 grammes ; son volume est 0<sup>m</sup>0,00027 ; un tel volume d'eau pèse 27 grammes.

Le cube suspendu au plateau d'une balance la charge de 212 — 27 ou de 185 grammes, c'est son poids apparent. Il fait tomber le cube au fond de l'eau, si on cesse de le soutenir.

Prenons un cube de liège de même volume, la poussée qui le soulève est encore de 27 grammes, mais le poids du cube n'est que 7 grammes. La poussée l'emporte sur le poids, et le liège remonte à la surface. Il sort en partie de l'eau, et ne reste immobile que lorsqu'il déplace un volume d'eau pesant 7 grammes. Si on parvenait à fabriquer avec des lames de fer et de liège un cube ayant même volume que les précédents, et pesant 27 grammes, il flotterait dans l'eau, sans monter ni descendre. Les effets du poids et de la poussée se détruiraient mutuellement.

Nous avons dans les poissons un exemple de ce genre d'équilibre. Ils ont dans l'intérieur du corps une vessie

pleine d'air, qu'ils peuvent comprimer plus ou moins, ce qui fait varier, dans un sens ou dans l'autre, le volume de leur corps. La poussée devient tantôt plus grande que le poids, et alors le poisson est soulevé vers la surface; tantôt elle est moindre, et la pesanteur l'entraîne vers le fond.

**Ludion.** — On imite ces mouvements à l'aide d'un jouet appelé *ludion*.

Une boule de verre soufflé pleine d'air est percée d'un petit trou à sa partie inférieure. Elle est lestée par une figurine d'émail (*fig. 107*). Elle flotte naturellement à la surface de l'eau, ce liquide est dans une éprouvette fermée à l'aide d'une feuille de caoutchouc ou mieux à l'aide d'un bouchon. Un tube de verre traverse celui-ci, et on a ficelé à la partie supérieure du tube une poire en caoutchouc pleine d'air. Si on comprime cette poire avec la main, le ludion s'enfonce, et va au fond de l'éprouvette. Il remonte si la compression cesse; et, avec un peu d'adresse, on peut le maintenir entre deux eaux au milieu de l'éprouvette.

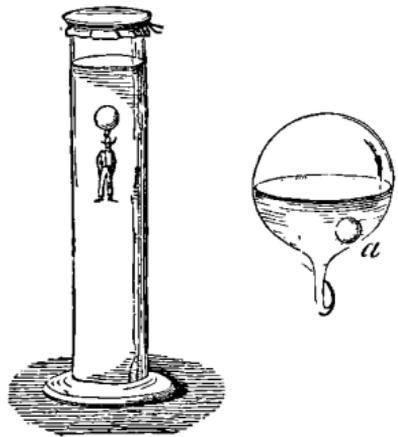


Fig. 107. — Ludion.

Dans le premier cas, on exerce, en comprimant la poire, une pression sur la surface de l'eau; elle se transmet à l'air qui remplit la boule de verre; cet air diminue de volume et il pénètre dans la boule une certaine quantité d'eau, ce qui diminue la poussée, et la rend inférieure au poids de la boule; le ludion descend. Si la compression cesse, l'air de la boule se dilate, chasse l'eau qui y était entrée; la poussée redevient supérieure au poids, et elle ramène le ludion à la surface.

**Corps flottants.** — Un corps flotte en équilibre sur un liquide, lorsque le poids du liquide déplacé est égal à son

propre poids. C'est le cas du bois, de la cire qui, à volume égal, pèsent moins que l'eau.

Un gobelet de fer convenablement lesté avec du sable flotte sur l'eau, sa forme est telle que son poids est égal à celui de l'eau qu'il déplace. On construit maintenant de grands vaisseaux dont la carcasse est en fer, ils sont pesamment chargés, et cependant la poussée de la mer les soutient à sa surface; ils déplacent un très grand volume de liquide, dont le poids égale celui du navire et de la cargaison.

Un corps flottant n'est pas en équilibre dans toutes les positions qu'on lui donne. Un bâton jeté dans l'eau flotte en se couchant horizontalement; on chercherait vainement à le mettre en équilibre dans la position verticale. Il faudrait, en effet, que le centre de gravité qui est au milieu G (*fig. 108*) du bâton entier fût au-dessous du milieu O de la partie du bâton qui est immergée, ce qui est impossible. Mais si on termine le bâton par une masse de fer ou de plomb, ce qu'on appelle le *lester*, le centre de gravité se trouve alors reporté en H, dans la masse de plomb; il est au-dessous du point O. La condition précédente est remplie, et le bâton se maintient vertical dans l'eau.

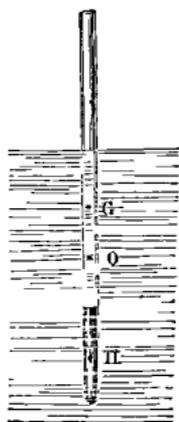


Fig. 108.  
Corps flottants.

C'est pour assurer l'équilibre d'une barque ou d'un navire que l'on remplit une partie de la cale de corps pesants, tels que la fonte ou le sable. C'est ce qu'on appelle *prendre du lest*. La forme du navire est d'ailleurs tellement choisie, que la poussée le relève lorsqu'il penche d'un côté.

**Poids spécifique.** — Le poids de l'unité de volume d'un corps est le *poids spécifique*. Il peut servir à caractériser ce corps. On distingue, par une simple pesée, un lingot d'or d'un autre lingot de cuivre doré, en déterminant leur poids spécifique, car un centimètre cube d'or pèse 19<sup>gr</sup>,26, et un même volume de cuivre, 8<sup>gr</sup>,35.

Dans notre système métrique, le poids d'un centimètre

cube d'eau est un gramme. On peut convenir de prendre pour unité le poids spécifique de l'eau, et de s'en servir pour exprimer les poids spécifiques des autres corps. Dans ce cas, le poids spécifique de l'or est 19,36; celui du cuivre, 8,33. Quelles que soient les unités de poids et de volume adoptées, et elles changent d'un pays à l'autre, l'or pèsera toujours 19 fois plus que l'eau à volume égal.

*Le poids spécifique est donc le rapport du poids d'un corps au poids d'un égal volume d'eau*

Cette seconde définition, d'après notre système de mesure, rentre dans la première.

### Mesure d'un poids spécifique.

**Corps solides.** — Prenons un morceau d'étain A (fig. 109), et suspendons-le par un fil très fin, au-dessous du plateau B d'une balance : faisons la tare, en mettant dans le second plateau assez de grenaille de plomb pour que le fléau soit horizontal.

Nous plongeons l'étain dans un vase C plein d'eau, il faut, pour l'équilibre, ajouter dans le plateau B un certain nombre de grammes, 9<sup>sr</sup>,7, par exemple. Ils représentent, d'après le principe d'Archimède, le poids d'un volume d'eau égal à celui du corps. Nous déterminons, en outre, par cette pesée, le volume du corps qui est 9<sup>cmc</sup>,7.

Si nous enlevons le corps, et si nous rétablissons l'équilibre de la balance avec des grammes déposés dans le plateau B, nous aurons le poids exact du corps; nous appliquons ainsi la méthode de la double pesée.

Je suppose que ce poids soit 70<sup>sr</sup>,81.

Le poids spécifique sera le quotient des deux nombres :  $\frac{70,81}{9,7} = 7,3$ . Ce nombre indique que l'étain pèse 7,3 fois plus que l'eau à volume égal, ou qu'un centimètre cube d'étain pèse 7<sup>sr</sup>,3.

**Seconde méthode.** — On a mastiqué une aiguille au

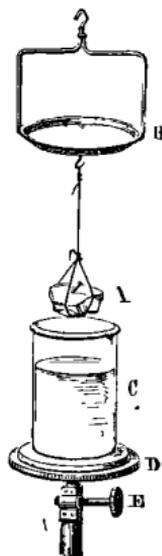


Fig. 109.  
Densité des corps flottants.

col d'un flacon A (fig. 110). On y verse de l'eau jusqu'à ce que le niveau affleure à la pointe de l'aiguille. On met alors le flacon dans le plateau d'une balance, en plaçant à côté le morceau d'étain, et on fait la tare.

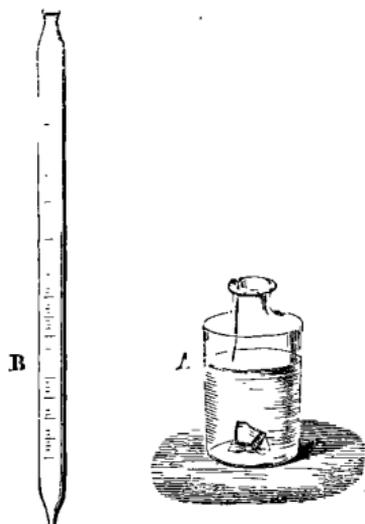


Fig. 110. — Méthode du flacon.

Si alors on enlève l'étain et qu'on le remplace par des grammes, on aura son poids que je suppose être 29<sup>gr</sup>,2.

Le flacon est retiré de la balance, on y introduit l'étain; le niveau de l'eau s'élève alors au-dessus de la pointe. On le ramène vis-à-vis de celle-ci en enlevant de l'eau à l'aide du tube de verre effilé B. L'eau que l'on a retirée ainsi a le volume du corps.

Le flacon remis dans le plateau de la balance ne fait plus équilibre à la tare, il faut ajouter 4 grammes pour que le fléau redevienne horizontal; c'est le poids de l'eau que l'on a enlevée. D'après cela, le poids spécifique de l'étain est  $\frac{29,2}{4}$ , ou 7,3.

**Corps liquides. Première méthode.** — On suspend au plateau d'une balance une boule de verre, et on fait la tare. Veut-on avoir le poids spécifique de l'alcool? On plonge la boule dans un vase plein de ce liquide, et, pour rétablir l'équilibre de la balance, on ajoute dans le plateau qui porte la boule 11<sup>gr</sup>,6, représentant le poids d'un volume d'alcool égal au volume du verre.

Après avoir essayé ce dernier, on le plonge dans un vase plein d'eau. Il y a encore une perte apparente de poids égale à 14<sup>gr</sup>,5. C'est le poids d'un volume d'eau égal à celui de la boule.

Le poids spécifique de l'alcool sera donc  $\frac{11,6}{14,5}$ , ou 0,8.

La seconde méthode est tout aussi simple. On fait la tare

du flacon à aiguille; on le remplit successivement d'alcool et d'eau, en amenant à chaque fois le niveau du liquide au contact de la pointe. On détermine par deux pesées successives les poids qu'il faut mettre du côté de la tare pour équilibrer le flacon plein d'alcool, puis le flacon plein d'eau. On obtient ainsi les poids de deux volumes égaux d'alcool et d'eau. En divisant le premier par le second, on a le *poids spécifique*.

On confond souvent dans le langage courant les expressions *poids spécifique* et *densité*, qui ont, en mécanique, des significations différentes. La densité de l'eau étant prise pour unité, le même nombre 7,3 représente à la fois le poids spécifique de l'étain ou sa densité rapportée à celle de l'eau.

**Aréomètres**<sup>1</sup>. — On trouve dans le commerce de petits appareils appelés *aréomètres*, ou encore *pèse-acides*, *pèse-alcools*, *pèse-lait*, etc. Ils sont construits sur le même principe. Nous prendrons comme exemple l'un des plus employés, le pèse-alcool ou *alcoomètre*. Il sert à déterminer le volume d'alcool qui se trouve dans une eau-de-vie, mélange d'alcool et d'eau.

Un tube de verre mince (*fig. 111*) est soudé à un tube plus large et il se termine par une boule que l'on remplit de mercure ou de grains de plomb. Ainsi lesté, le tube flotte verticalement sur un liquide. Si on le transporte dans des liquides de densités différentes, il s'y enfonce plus ou moins, et ne reste en équilibre que lorsque le poids du liquide qu'il déplace est égal à son propre poids.

Un mélange d'eau et d'alcool a une densité intermédiaire à celles des deux liquides.

Un litre d'eau pèse 1000 grammes; un litre d'alcool, 792 grammes. En remplaçant le quart du volume d'alcool par le même volume d'eau, on enlève 118 grammes pour en remettre 200; le litre du mélange ne pèse pas moins

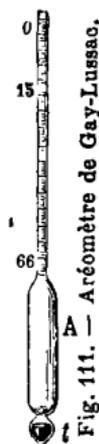


Fig. 111. — Aréomètre de Gay-Lussac.

1. Ne pouvant tout dire, nous négligeons à dessein les aréomètres à volume constant qui ne sont plus d'aucun usage.

de 794 grammes. Nous négligeons une petite diminution de volume qui se produit quand on mélange les deux liquides.

Un aréomètre placé successivement dans l'eau, dans le mélange et dans l'alcool pur, s'enfonce de plus en plus dans ces liquides. On conçoit qu'on puisse graduer la tige de l'aréomètre pour reconnaître la quantité d'alcool qui se trouve mêlée à l'eau.

L'instrument est lesté de telle manière que son point d'affleurement dans l'eau est au bas de la tige; c'est le zéro de la graduation. Il s'enfonce dans l'alcool jusqu'à la division 100 tracée en haut du tube.

On fait, à la température de 15°, avec toute la précision désirable des mélanges d'eau et d'alcool renfermant par litre 10, 20, 30..., 90 centilitres d'alcool. On plonge l'alcoomètre dans chacun de ces mélanges, et on marque à chaque fois le point d'affleurement; ce qui détermine sur l'échelle graduée logée dans l'intérieur de la tige la position des divisions 10, 20, 30..., 90. On divise chaque intervalle en dix parties égales.

Plongeons dans une eau-de-vie un alcoomètre, que l'on trouve tout gradué dans le commerce, il s'y enfonce jusqu'à la trente-sixième division; cela indique que l'eau-de-vie renferme 36 litres d'alcool par hectolitre, si on opère à la température de 15°. Sinon, on fait une correction indiquée dans des tableaux donnés par Gay-Lussac<sup>1</sup>.

**Usages des poids spécifiques.** — Les poids spécifiques permettent de calculer le poids d'un corps dont on connaît le volume, et réciproquement.

**Calcul du poids d'un corps.** — *Un bloc de granit a la forme d'un cube de 2 mètres de côté. On demande son poids, sa densité est 2,7.*

Le volume du bloc est 8 mètres cubes ou 8000 décimètres cubes. Un tel volume d'eau pèse 8000 kilogrammes : Le granit, à volume égal, pèse 2,7 fois plus que l'eau :

1. Gay-Lussac, né à Saint-Léonard (Haute-Vienne) en 1778, mort à Paris en 1850.

on poids est donc :  $8000 \times 2,7$  ou 21600 kilogrammes.

*Le poids d'un corps se calcule en multipliant son volume par son poids spécifique.*

Le poids est donné en tonnes de 1000 kilogrammes, si le volume est exprimé en mètres cubes. On a des kilogrammes, si l'unité de volume adoptée est le décimètre cube. Enfin, pour avoir le poids en grammes, il faut avoir l'expression du volume en centimètres cubes.

**Calcul du volume.** — Ce problème est l'inverse du précédent. *Le volume d'un corps s'obtient en divisant le poids du corps par son poids spécifique.*

*Quel est le volume de  $108^{\text{Kgr}},8$  de mercure dont le poids spécifique est 13,6.*

Si c'était de l'eau, le volume serait  $108^{\text{dmc}},8$ . Le volume du mercure, pour peser autant que l'eau, doit être 13,6 fois plus petit ou  $\frac{108,8}{13,6} = 8$  décimètres cubes.

TABLEAU DE POIDS SPÉCIFIQUES

|          |       |          |       |                   |       |
|----------|-------|----------|-------|-------------------|-------|
| Platine, | 21,1. | Zinc,    | 7,2.  | Mercure,          | 13,6. |
| Or,      | 19,3. | Verre,   | 2,5.  | Acide sulfurique, | 1,8.  |
| Plomb,   | 11,4. | Marbre,  | 2,8.  | Eau,              | 1,0.  |
| Argent,  | 10,5. | Houille, | 1,3.  | Vin,              | 0,98. |
| Cuivre,  | 8,9.  | Glace,   | 0,9.  | Huile d'olive.    | 0,90. |
| Fer,     | 7,8.  | Hêtre,   | 0,8.  | Alcool,           | 0,79. |
| Etain,   | 7,8.  | Liège,   | 0,24. | Ether,            | 0,71. |

Lorsque deux corps ont le même poids, le produit du volume de chacun d'eux par son poids spécifique est le même de part et d'autre. Par conséquent : *Les volumes des corps de même poids sont inversement proportionnels aux poids spécifiques.*

On verrait facilement que, *sous le même volume, les poids de deux corps sont proportionnels à leurs poids spécifiques.*

**Equilibre de liquides différents dans des vases communicants.** — Un tube recourbé BAC (fig. 112) a ses deux branches verticales et ouvertes par le

haut. Il peut être fixé à une planchette portant des règles divisées en millimètres.

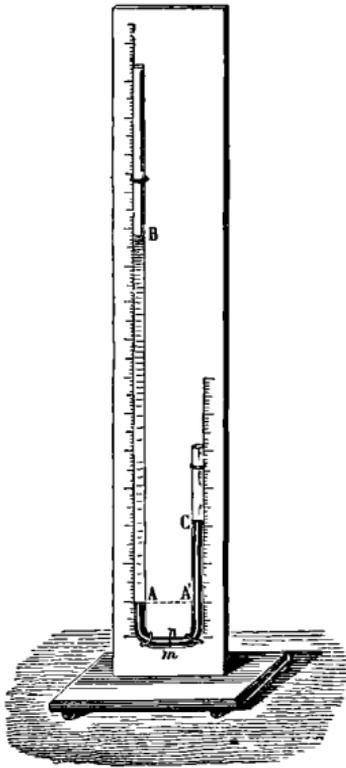


Fig. 112.  
Vases communicants.

On y verse d'abord du mercure qui se met de niveau dans les deux branches. On ajoute de l'eau dans la branche AB; sa pression fait baisser le niveau du mercure dans cette branche et le fait monter dans l'autre. L'équilibre une fois établi, on mesure la différence du niveau A'C du mercure dans les deux branches, et aussi la hauteur AB de la colonne d'eau. Le rapport  $\frac{AB}{A'C}$  est 13,6, c'est-à-dire égal au rapport des densités du mercure et de l'eau.

*Deux colonnes liquides placées dans des vases qui se communiquent sont en équilibre lorsque leurs hauteurs, comptées à partir du plan horizontal qui les sépare, sont inversement proportionnelles à leurs densités.*

Cette loi est indépendante de la forme des tubes. Elle

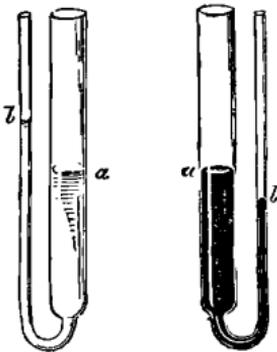


Fig. 113.  
Effets de la capillarité dans les vases communicants.

exprime que sur deux surfaces d'un centimètre carré prises dans le même plan horizontal, l'une en A au-dessous de l'eau, l'autre en A' au-dessous du mercure, les pressions sont égales; car, pour qu'une colonne d'eau pèse autant qu'une colonne de mercure, il faut que son volume soit 13,6 fois plus grand que le volume du mercure. Les bases sont égales; la hauteur de l'eau doit donc être 13,6 fois plus grande que celle du mercure, pour réaliser cette condition.

**Capillarité.** — Lorsque l'on met un liquide dans un tube recourbé en U (*fig. 113*), dont l'une des branches a un centimètre de diamètre ou plus, et l'autre un millimètre ou moins, on trouve que les niveaux ne sont plus sur le même plan horizontal. Avec l'eau, le niveau *b* est plus élevé dans le tube étroit que dans le plus large. C'est l'inverse, si on remplace l'eau par le mercure. On a donné le nom de *tubes capillaires* aux tubes très étroits, et on appelle *capillarité* la cause de cette dénivellation. Si on plonge dans l'eau un tube capillaire ouvert aux deux bouts, le liquide s'élève dans le tube qu'il mouille au-dessus du niveau extérieur. L'eau s'élève par capillarité dans un morceau de sucre qui la touche par un de ses points. L'huile s'élève de même dans la mèche de coton de nos lampes. Le mercure se déprime au contraire dans un tube de verre qu'il ne mouille pas.

## CHAPITRE III

### Propriétés des gaz.

La terre est entourée d'une couche d'air dont l'épaisseur mal connue peut être évaluée au moins à 60 kilomètres. Nous choisirons l'air comme le type des gaz.

**Poids de l'air.** — L'air est pesant comme tous les autres corps que nous connaissons. On le démontre facilement, à l'aide d'un ballon de verre de 5 à 6 litres fermé par une garniture métallique *D* portant un robinet (*fig. 114*). On le suspend au-dessous du plateau d'une balance et on en fait la tare. Puis, à l'aide d'une pompe à air, on retire du ballon la plus grande partie du gaz qui le remplit et, après avoir fermé

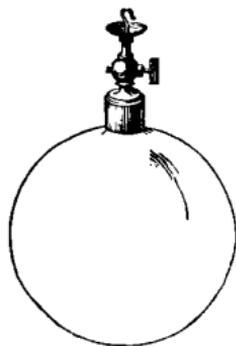


Fig. 114.  
Pesanteur des gaz.

le robinet, on l'accroche de nouveau au plateau de la balance. Le fléau penche du côté de la tare; le ballon pèse moins qu'auparavant; l'air que l'on en a retiré est pesant.

On ouvre alors le robinet, l'air rentre dans le ballon en produisant un sifflement; le fléau se relève progressivement et l'équilibre se trouve rétabli, lorsque le ballon est de nouveau plein d'air; la démonstration est complète.

**Compressibilité.** — L'air est très *compressible*. Il diminue de volume si on le soumet à une forte pression. Un tube de verre épais *ab* (fig. 115) est fermé à une de ses



Fig. 115. — Briquet à air.

extrémités *b*; un piston formé de rondelles de cuir empilées au bout d'une tige métallique *c* se meut dans le tube en frottant contre sa paroi et le bouche parfaitement. On enfonce le piston en appuyant fortement sur la poignée, ce qui réduit le volume au tiers ou au quart de sa valeur primitive. Si la pression cesse, l'air repousse le piston en vertu de son élasticité, et reprend son volume primitif.

Lorsque la compression est brusque, il se produit un dégagement de chaleur assez grand pour enflammer un morceau d'amadou logé dans une cavité pratiquée dans le piston. De là le nom de *briquet à air* donné à cet appareil.

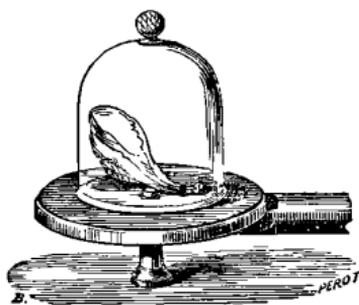


Fig. 116. — Pesanteur de l'air.

**Dilatabilité.** — L'air est très *dilatable*; il augmente rapidement de volume, si on diminue la pression qu'il subit, l'expérience précédente le prouve.

Veut-on montrer la dilatabilité de l'air ordinaire? On place sur une plaque de verre dépolie, appelée *platine*, une cloche de verre dont les bords dressés avec soin et recouverts de suif s'appliquent parfaitement sur la plaque.

On a là une masse d'air isolée de l'atmosphère (*fig. 116*). Dans la cloche se trouve une vessie de porc à demi gonflée d'air, et que l'on a fermée à l'aide d'une ficelle. Un tuyau ouvert débouche au centre de la platine, et communique par un tube de caoutchouc avec une pompe à air. On enlève par le jeu de cette pompe la majeure partie de l'air contenu dans la cloche, ce qui diminue la pression extérieure que subissaient la vessie et l'air qu'elle renferme. On voit alors la vessie se gonfler de plus en plus, ce qui montre que l'air intérieur presse sur la membrane de la vessie pour s'étendre et occuper un plus grand volume.

Si on fait rentrer l'air extérieur dans la cloche, la vessie reprend son volume primitif, car la pression qui s'exerçait sur elle au début de l'expérience se trouve rétablie.

L'air est très mobile, et par suite une masse d'air n'est en équilibre, que si chacun de ses points est également pressé en tout sens.

**Transmission de pression.** — S'il existe une pression exercée sur une partie de cette masse, cette pression se transmet dans tous les sens en conservant la même valeur par unité de surface.

Un gaz ne peut être pressé sans exercer une pression égale sur les corps qui s'opposent à son extension. Cette pression du gaz est appelée sa *tension* ou sa *force élastique*.

**Pression atmosphérique.** — Puisque l'air est pesant, les couches inférieures de l'atmosphère supportent le poids des couches supérieures; de là une charge que l'on appelle la *pression atmosphérique*.

Quelques expériences simples vont nous en démontrer l'existence.

**Crève-vessie.** — Un manchon de verre (*fig. 117*) repose sur la platine d'une pompe à air. Il est fermé par une peau de vessie que l'on a ficelée sur le col, lorsqu'elle était humide; elle se tend en se desséchant, et forme une surface plane. On enlève l'air qui remplit le manchon, par



Fig. 117.  
Crève-vessie.

le jeu de la pompe. La membrane devient concave. Elle se brise si on la choque légèrement avec une baguette, et une explosion accompagne la rentrée de l'air dans le manchon.

Au début, la membrane est plane, parce qu'elle est également pressée sur ses deux faces : à l'extérieur par l'atmosphère; à l'intérieur par la force élastique de l'air du manchon. En retirant cet air, on supprime en partie la pression intérieure. La pression extérieure est prédominante, elle donne à la peau de vessie une forme concave, et plus tard elle la brise.

Employons la chaleur pour raréfier l'air d'un vase. On introduit, dans une carafe à large goulot (*fig. 118*), des bandelettes de papier enflammées; l'air intérieur se dilate et sort en partie de la carafe. On la bouche alors avec un œuf dur, débarrassé de sa coquille, l'œuf s'allonge, pénètre dans le goulot et, fina-

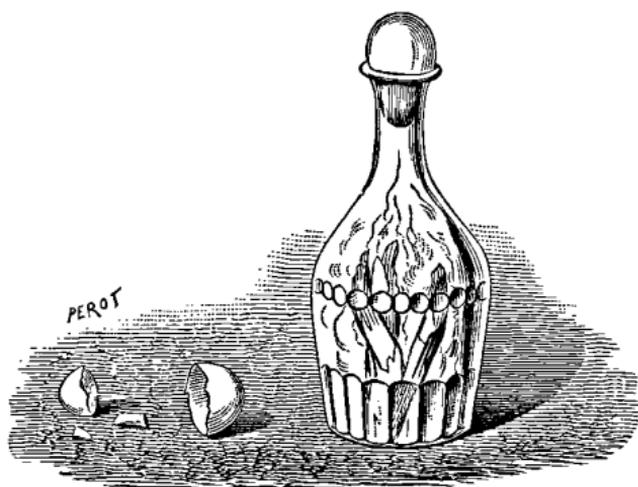


Fig. 118. — Raréfaction de l'air par échauffement.

lement, s'introduit en entier dans la carafe.

La chaleur a produit ici le même effet que la pompe à air dans le crève-vessie, elle a fait sortir du vase une partie de l'air qui s'y trouvait. La tension de cet air refroidi ne peut équilibrer la pression atmosphérique, et l'œuf cédant à cette pression est poussé dans la carafe.

**Pression de bas en haut.** — La pression atmosphérique s'exerce dans tous les sens.

**Pression de bas en haut.** — La pression atmosphérique s'exerce dans tous les sens.

On remplit d'eau un verre (*fig. 119*), on le recouvre avec une feuille de papier et on le retourne en maintenant avec

la main le papier contre le verre. En enlevant la main, on voit que le verre reste plein d'eau. Ce liquide est soutenu par la pression atmosphérique qui s'exerce sur le papier de bas en haut. L'expérience prend un tour plus piquant, si on remplace la feuille de papier par un morceau de tulle que l'on maintient sur les bords à l'aide de quelques tours de ficelle. L'eau ne tombe pas lorsqu'on a retourné le vase, parce que l'air ne peut traverser les trous nombreux dont le tulle est criblé.

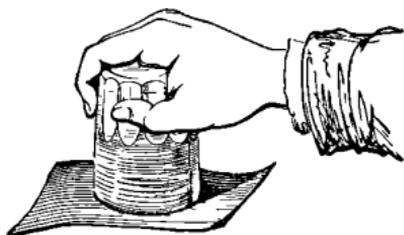


Fig. 119. — Pression de bas en haut.

**Tête-vin.** — Lorsqu'on veut goûter le vin d'un tonneau, on en retire une petite quantité à l'aide du *tête-vin*. C'est un tuyau de fer-blanc ouvert aux deux bouts, et dont l'orifice inférieur O (fig. 120) est très étroit. On l'introduit par la bonde dans le vin, en le maintenant ouvert. Le liquide y pénètre sans obstacle. On le retire ensuite plein de liquide, en ayant soin de boucher avec le doigt l'orifice supérieur. L'air ne peut rentrer dans le tuyau par le bas; le trou qui s'y trouve est trop petit; le liquide reste donc dans le tube et l'écoulement ne se produit que si on débouche le tuyau par le haut, ce qui permet l'entrée de l'air.



Fig. 120. — Tête-vin.

Les pipettes en verre dont on se sert dans les laboratoires reproduisent exactement les mêmes phénomènes.

**Expériences de Torricelli**<sup>1</sup>. — Un tube de verre de 80 centimètres de long, et de 6 à 8 millimètres de diamètre, est bouché à une de ses extrémités (fig. 121). On le remplit complètement de mercure; puis, le bouchant avec le

1. Torricelli, né à Faenza en 1608, mort en 1647.

doigt, on le retourne, on en plonge l'orifice dans une cuvette D pleine de mercure, et on enlève le doigt. Le mercure descend dans le tube et s'arrête en un point H, placé à une distance du niveau AB de la cuvette égale à 0<sup>m</sup>,76 environ.

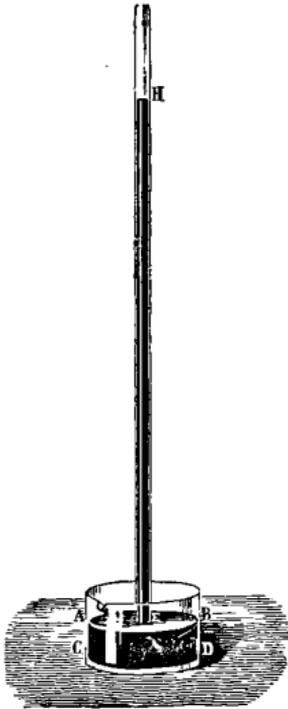
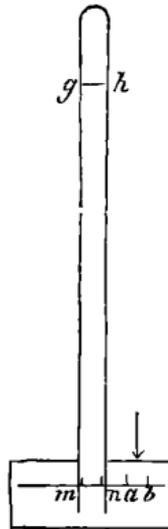


Fig. 121.  
Expérience de Torricelli.



Au-dessus de H, le tube est vide d'air, et la surface du mercure n'y subit aucune pression.

La pression atmosphérique qui s'exerce en dehors du tube sur la surface du mercure de la cuvette soutient la colonne EH.

Si nous considérons sur la surface de niveau A (fig. 121) deux petites surfaces d'un centimètre carré, l'une *mn*, intérieure au tube ; l'autre *ab*, extérieure, il faut, pour l'équi-

libre, qu'elles soient également pressées. La première supporte la charge d'une colonne de mercure de 0<sup>m</sup>,76 de hauteur ; la seconde, la pression atmosphérique.

Celle-ci est donc équivalente au poids de la colonne de mercure. Prenons pour unité de longueur le centimètre, l'unité de volume est le centimètre cube et le volume de la colonne de mercure qui pèse sur un centimètre carré est de 76 centimètres cubes. La densité du mercure est 13,6. Le poids de la colonne est  $76 \times 13,6$  ou 1 033 grammes.

La pression atmosphérique est donc 1<sup>Kgr</sup>,033, ou, en nombre rond, un kilogramme par centimètre carré ; résultat facile à retenir. On donne à cette pression le nom d'*atmo-*

*sphère*, et on en fait une *unité de pression*. On dira que la vapeur d'eau est à *dix atmosphères*, ce qui veut dire qu'elle exerce une pression de *dix kilogrammes* par centimètre carré.

L'expérience précédente fut faite en 1643, par un savant italien, Torricelli, à une époque où les expériences de physique étaient rares et mal comprises.

**Expériences de Pascal.** — Les philosophes du dix-septième siècle n'admettaient pas que l'air fût pesant et ne croyaient pas à une pression atmosphérique.

L'expérience de Torricelli ne les avait pas convaincus.

Pascal entreprit de donner des preuves de la réalité de cette pression.

En 1646, il refit, à Rouen, l'expérience du savant italien, en substituant l'eau au mercure. Il trouva que l'eau montait dans un tube vide à une hauteur de 10<sup>m</sup>,33, treize fois et demie plus grande que celle du mercure.

La pression de cette colonne d'eau sur un centimètre carré était encore 1<sup>kg</sup>,033, la même que celle du mercure; comme celle-ci, elle mesurait la pression atmosphérique.

Cette dernière doit diminuer si on la mesure au sommet d'une montagne. On laisse au-dessous de soi des couches d'air pesantes, d'une grande épaisseur, qui n'exercent plus aucune pression sur la cuvette du tube de Torricelli. Ainsi pensait Pascal. Il pria son beau-frère qui habitait Clermont-Ferrand, de répéter l'expérience précédente dans cette ville et ensuite sur le Puy-de-Dôme, dont la hauteur est de 1500 mètres. On vit alors le mercure se tenir dans le tube vide à des hauteurs différentes dans les deux stations. Il était plus bas au sommet du Puy-de-Dôme et la différence des hauteurs était de 0<sup>m</sup>,085.

Cette remarquable expérience, faite en 1648, dissipa tous les doutes; il fut démontré que l'air exerçait une pression sur tous les corps qu'il enveloppe.

Si les couches d'air qui avoisinent la terre sont en repos, bien qu'elles soutiennent le poids de celles qui sont au-dessus, c'est grâce à leur élasticité; elles sont pressées et

elles pressent à leur tour, elles transmettent dans tous les sens la pression qu'elles subissent. La pression est donc la même dans une chambre ou en plein air, qu'elle soit due au poids direct, effectif des couches d'air supérieures, ou à la force élastique du gaz.

Au niveau du sol et à l'air libre, cette force est encore un kilogramme par centimètre carré. On la retrouve la même dans une masse d'air que l'on emprisonne en bouchant une bouteille, ou en plaçant une cloche pleine d'air sur la platine d'une pompe à air.

Enfermez dans cette cloche la cuvette d'un tube de Torricelli comme on le voit (*fig. 122*), le mercure s'y maintiendra à une hauteur de  $0^m,76$  comme il le faisait dans l'air libre. Ce n'est pas le poids insignifiant de l'air de la cloche qui le soutient ainsi, mais bien sa force élastique.

Faites jouer la pompe et retirez l'air de la cloche, le mercure baissera peu à peu dans le tube. Si on faisait le vide parfait, le niveau du liquide serait le même dans le tube et dans la cuvette, et l'on démontrerait ainsi que la pression de l'air est nécessaire pour maintenir le mercure soulevé dans le tube de Torricelli.

**Baromètre.** — La pression atmosphérique éprouve des variations continuelles que l'on mesure à l'aide du *baromètre*. C'est un tube de Torricelli construit avec des précautions particulières.

On prend, comme nous l'avons dit, un tube de verre ayant à peu près  $0^m,80$  de long et un diamètre de 6 à 10 millimètres. On le remplit de mercure pur que l'on a soin de chauffer et de faire bouillir dans le tube pour chasser les bulles d'air ou la couche d'humidité adhérentes au verre et



Fig. 122. — Cuvette d'un tube de Torricelli.

obtenir ainsi un vide parfait dans la *chambre barométrique*, nous désignons ainsi l'espace qui reste au-dessus du mercure, lorsqu'on a retourné le tube et plongé son ouverture dans la cuvette.

Le tube et la cuvette A (*fig. 123*) sont fixés sur une planchette verticale. Une règle divisée en millimètres se trouve à la partie supérieure. Elle porte des chiffres qui vont de 0<sup>m</sup>,70 à 0<sup>m</sup>,80. Le zéro de ces divisions se trouve vis-à-vis du niveau du mercure dans la cuvette. Cette règle permet de mesurer la hauteur de la colonne de mercure.

Cette hauteur, exprimée en millimètres, donne l'évaluation courante de la pression. On dit : la pression est de 740 millimètres, 770 millimètres, pour indiquer qu'elle équivaut au poids d'une colonne de mercure ayant pour hauteur la longueur indiquée, et pour base l'unité de surface.

La cuvette est assez large, pour que les variations de hauteur du niveau soient négligeables; car le niveau baisse dans la cuvette lorsqu'il monte dans le tube, et réciproquement. Il ne correspond pas rigoureusement au zéro de l'échelle divisée, ce qui est une cause d'erreur.

Parfois, on donne au tube la forme recourbée de la figure 122. La cuvette est remplacée par un tube assez large soudé au tube du baromètre. On a ainsi le baromètre à *siphon*, moins précis que le précédent.

**Baromètre métallique.** — Depuis quelques années on a remplacé, dans les usages ordinaires de la vie, le baromètre à mercure par les baromètres métalliques.

Voici quel est le principe de ces appareils.

Une boîte cylindrique est fermée par une lame métallique soudée à ses parois; cette lame est mince et élastique. On fait le vide dans l'intérieur de la boîte; pressée par l'atmo-

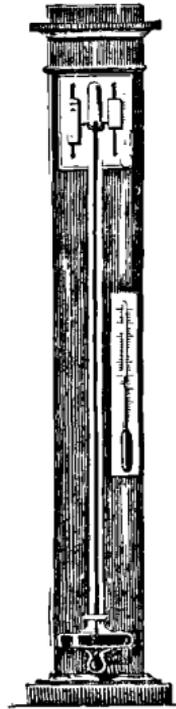


Fig. 123.  
Baromètre à  
cuvette.

sphère la lame tend, comme dans le crève-vessie, à prendre une forme concave. Elle se creuse davantage si la pression augmente; un peu moins, si elle diminue. Ces petits mouvements de la lame se communiquent à des leviers qui les amplifient et à une aiguille qui marque la pression sur un cadran divisé.

**Usages du baromètre.** — On observe le baromètre pour en tirer quelques indications sur le beau ou le mauvais temps à venir. Assez souvent, sur nos côtes occidentales, le baromètre baisse lorsque les vents d'ouest et de sud-ouest s'établissent; ils viennent de la mer et nous amènent les nuages et la pluie. Les vents d'est, qui sont secs, le font monter. On a ainsi une probabilité et non la certitude d'un changement de temps.

Le baromètre est plus utile aux marins; une baisse rapide du baromètre indique l'approche d'une bourrasque ou d'une tempête.

Cet instrument est utile aux voyageurs pour déterminer l'*altitude* d'un lieu, c'est-à-dire sa distance verticale au niveau des mers. Le baromètre baisse à mesure qu'on s'éloigne de ce niveau.

Pour de petites distances verticales, le mercure baisse d'un millimètre lorsqu'on s'élève de dix mètres. La pression d'une colonne d'air de dix mètres équivaut à celle d'une colonne de mercure d'un millimètre. Si, en transportant un baromètre du sol au sommet d'une tour, la colonne de mercure diminue de *trois* millimètres, la hauteur de la tour est *trente* mètres.

Le calcul est moins simple, si on veut, à l'aide du baromètre, mesurer la hauteur d'une montagne.

**Loi de Mariotte.** — La loi de compressibilité des gaz fut énoncée en 1664 par Mariotte<sup>1</sup> en France et par Boyle en Angleterre.

*Les volumes d'un même poids de gaz sont inversement proportionnels aux pressions qu'il supporte.*

On suppose invariable la température du gaz.

1. Mariotte, né en Bourgogne vers 1620, mort en 1684.

La vérification de cette loi se fait, de la manière suivante, pour des pressions supérieures à une atmosphère.

Un tube de verre EBC (fig. 124) recourbé en U est fixé sur une planchette verticale. La grande branche BE est ouverte; la petite AC est fermée. Nous supposons que son diamètre est partout le même; et une graduation en centimètres, voisine de cette tige, la divise en parties d'égal volume. Une pareille graduation est appliquée le long de la branche EB qui peut n'être pas cylindrique.

On isole le gaz qui est dans le tube AC de l'air extérieur en versant un peu de mercure dans la partie courbe; le mercure est de niveau dans les deux branches sur l'horizontale AB. L'air intérieur est soumis à la pression de l'atmosphère et il en a la force élastique. On peut la mesurer en observant un baromètre voisin; supposons-la égale à  $0^m,760$ .

On verse du mercure dans la branche ouverte; la colonne de mercure ajoute sa pression à celle de l'atmosphère; l'air intérieur diminue de volume. Il arrive un moment où il n'est plus que la moitié du volume primitif AC. Les niveaux du mercure sont en D dans la petite branche; en H, dans la grande. Leur distance verticale D'H est alors  $0^m,760$ ; la ligne DD' est horizontale, et la pression, à l'intérieur du tube, est la même sur des surfaces égales prises en D et en D'. Or, en D' cette pression est de *deux atmosphères*, puisque la pression de l'atmosphère qui s'exerce sur le niveau H du mercure et celle de la colonne D'H sont égales et s'ajoutent.

Du début à la fin de l'expérience, la pression est devenue

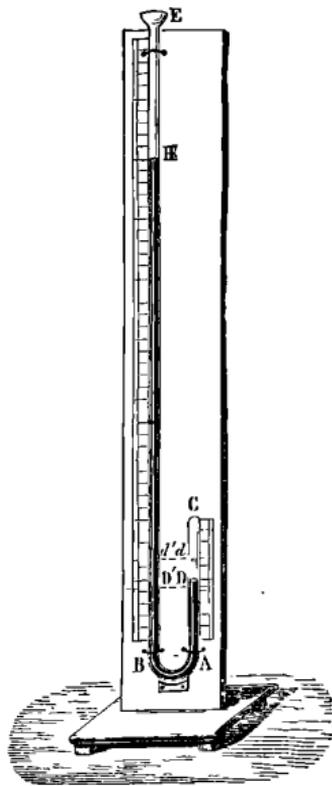


Fig. 124. — Loi de Mariotte.

double; le volume a diminué de moitié, ce qui justifie la loi.

Si on s'arrête lorsque le volume de l'air comprimé est les *trois quarts* du volume primitif, la colonne de mercure surajouté sera  $0^m,253$ , ou le tiers de  $0^m,760$ , et la pression finale sera les  $4/3$  de la pression initiale.

Lorsqu'on cesse d'ajouter du mercure, il s'établit un équilibre dans lequel la tension du gaz comprimé est égale à la pression que ce gaz supporte.

*Les volumes d'un même poids de gaz en repos sont inversement proportionnels aux tensions de ce gaz.*

C'est une autre forme de l'énoncé de la loi de Mariotte. Quand un corps a un poids invariable, et qu'il change de volume, sa densité change également, et, pour deux volumes différents,

la densité est inverse de celui des volumes.

On en conclut que les densités d'un gaz sont proportionnelles aux pressions ou aux tensions de ce gaz.

Si on prend un même volume d'un gaz soumis à des pressions différentes, le rapport des poids de ce gaz est égal au

*rapport des densités, et, par suite, au rapport des pressions correspondantes.*

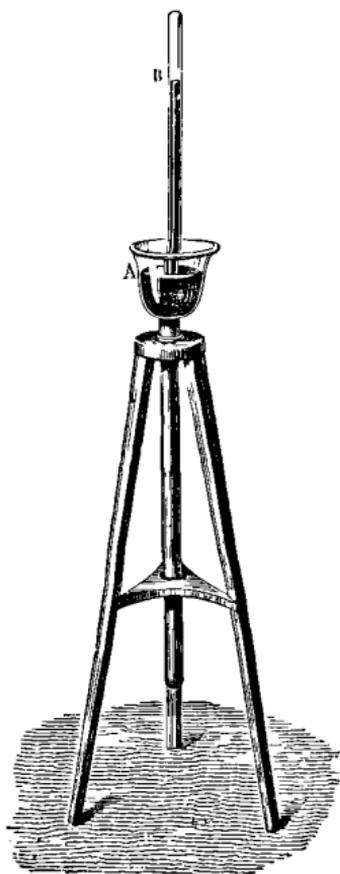


Fig. 125.

Vérification de la loi de Mariotte pour les pressions inférieures à une atmosphère.



Fig. 126.



Fig. 127.

**Pressions inférieures à une atmosphère.** — La même loi se retrouve, si une masse d'air augmente de volume par suite d'une diminution de pression. On a un tube de baromètre A (*fig. 125*) divisé en parties d'égal volume. Un second tube de fer c, évasé par le haut, forme une cuvette profonde. On a versé du mercure dans le tube A, en laissant une des divisions du tube pleine d'air. Le tube est retourné dans la cuvette et enfoncé jusqu'à ce que le niveau du mercure soit le même dans la cuvette et dans le tube (*fig. 126*).

L'espace AC, occupé alors par l'air sous la pression atmosphérique, représente le volume d'une des divisions du tube A. Soulevons celui-ci, le volume augmente, sa force élastique diminue, et la pression extérieure fait monter le mercure dans le tube A. Bientôt (*fig. 127*), l'air occupe deux divisions. Son volume CB' est double du volume primitif. Mesurons la hauteur A'B' du mercure soulevé, nous la trouvons égale à 0<sup>m</sup>,38. La pression que l'atmosphère exerce alors sur l'air intérieur est égale à 0<sup>m</sup>,76 — 0<sup>m</sup>,38 ou 0<sup>m</sup>,38, valeur de la moitié d'une atmosphère. A une pression réduite de moitié correspond un volume double de l'air, comme l'exige la loi de Mariotte.

**Poids spécifiques des gaz.** — Lorsqu'on veut définir le poids spécifique d'un gaz, c'est-à-dire le poids d'un litre de gaz pris comme unité de volume et exprimé en prenant pour unité de poids le kilogramme, il faut convenir qu'on prendra le gaz à la température de la glace fondante et lorsqu'il a une force élastique d'une atmosphère; car ce poids varie beaucoup avec la température et avec la pression.

Dans ces conditions, un litre d'air sec pèse 1<sup>gr</sup>,2926, à peu près 1<sup>gr</sup>,3.

Le poids spécifique est donc 0,00129. On dit qu'il est rapporté à l'eau. C'est par ce nombre qu'il faut multiplier le volume du gaz exprimé en centimètres cubes pour avoir son poids en grammes.

Afin d'éviter l'emploi, dans les calculs, de très petites fractions, on est convenu de prendre le poids spécifique de l'air

pour unité et d'appeler poids spécifique d'un gaz le rapport du poids d'un certain volume de ce gaz pris à  $0^{\circ}$  avec la tension  $0^{\text{m}},76$  au poids d'un même volume d'air ayant même température et même tension.

Dès lors, si on cherche le poids de 20 litres d'acide carbonique dont le poids spécifique est 1,529, il faut chercher le poids de 20 litres d'air  $1,293 \times 20 = 25^{\text{sr}},86$  et le multiplier par 1,529, ce qui donne  $38^{\text{sr}},64$ .

Nous donnons ici les poids spécifiques de certains gaz.

| Noms.              | Poids spécifique. | Poids d'un litre.   |
|--------------------|-------------------|---------------------|
| Air . . . . .      | 1                 | $1^{\text{sr}},293$ |
| Azote . . . . .    | 0,971             | $1^{\text{sr}},256$ |
| Oxygène. . . . .   | 1,105             | $1^{\text{sr}},430$ |
| Hydrogène. . . . . | 0,069             | $0^{\text{sr}},089$ |
| Chlore. . . . .    | 2,421             | $3^{\text{sr}},130$ |

La loi de Mariotte permet de résoudre des questions qui reviennent à chaque instant dans l'étude des gaz.

1° On a mesuré, dans une cloche graduée reposant sur le mercure,  $65$  centimètres cubes d'hydrogène. La tension du gaz est  $0^{\text{m}},754$ . Quel volume  $x$  prendrait-il si la tension était  $0^{\text{m}},760$ ?

Le rapport des volumes  $\frac{x}{65}$  égale le rapport inverse des tensions  $\frac{754}{760}$ . Par suite :  $x = 65 \times \frac{754}{760} = 64^{\text{cmc}},68$ .

2° Un ballon renferme  $15$  grammes d'air dont la tension est  $0^{\text{m}},760$ . On le remplit d'air comprimé; sa tension est  $1^{\text{m}},48$ . Quel est le poids du gaz contenu dans le ballon?

Le rapport des poids  $\frac{x}{15}$  est le même que celui des tensions  $\frac{148}{76}$ .  $x = 15 \times \frac{148}{76} = 20^{\text{sr}},2$ .

Nous ajouterons un dernier problème dans lequel on doit utiliser un certain nombre de connaissances déjà acquises.

Trouver le poids de 20 litres d'acide carbonique dont le

pois spécifique est 1,529, la température 25°, la force élastique ou la pression 0<sup>m</sup>,78. Le coefficient de dilatation est 0,0036; le poids normal d'un litre d'air 1<sup>sr</sup>,29.

Cherchons le volume du gaz, en supposant que sa température est 0° et sa force élastique 0<sup>m</sup>,76.

Ce volume, qui est 20 litres à 25°, n'est plus, à 0°, que  $\frac{25}{1 + 20 \times 0,0036}$  ou 23<sup>l</sup>,22.

Sa force élastique est 0<sup>m</sup>,78; si on cherche le volume sous la pression 0<sup>m</sup>,76 en appliquant la loi de Mariotte, on trouve  $23,22 \times \frac{0,78}{0,76}$  ou 23<sup>l</sup>,79.

Le poids de ce volume d'air est  $23,79 \times 1,29$  ou 30<sup>sr</sup>,69.

Le poids d'un égal volume d'acide carbonique sera  $30,69 \times 1,529$  ou 46<sup>sr</sup>,92.

Les calculs précédents sont résumés dans la formule suivante :

Représentons le volume du gaz exprimé en litres par V, sa température par t, sa force élastique évaluée en millimètres par H, son poids spécifique par d.

$$P = \frac{V}{(1 + t \times 0,0036)} \times \frac{H}{760} \times 1,29 \times d.$$

Si on donne le poids P et si on cherche le volume V, on trouve, par des procédés arithmétiques :

$$V = \frac{P(1 + t \times 0,0036) \times H}{d \times 1,29 \times 0,76} = \frac{P(1 + t \times 0,0036) \times H}{0,98 \times d}.$$

### **Echauffement d'un gaz de volume invariable.**

— Une masse de gaz renfermée dans un ballon ouvert se dilate librement, si sa température s'élève; il sort en partie du ballon et conserve une force élastique égale à celle de l'atmosphère; il se dilate à *pression constante*.

Qu'arrivera-t-il si on empêche cette masse d'air de se dilater, en fermant hermétiquement le ballon avant de l'échauffer ?

L'expérience nous apprend que toute élévation de température détermine alors un accroissement de force élastique. La loi de Mariotte nous permet de le calculer.

*Dix litres d'air remplissent à 0° un vase de volume invariable ; la force élastique du gaz est 0<sup>m</sup>,76. On porte le vase et l'air à la température de 100° ; que devient la force élastique du gaz ? On néglige complètement la dilatation du vase, beaucoup plus faible que celle de l'air.*

Si l'air se dilatait librement en conservant sa tension de 0<sup>m</sup>,76, son volume à 100° serait :

$$10 \times (1 + 100 \times 0,00366) = 13,66.$$

Laissons invariable la température 100° et comprimons le gaz pour le ramener à son volume primitif, 10 litres.

Nous aurons, d'après la loi de Mariotte,

$$\frac{x}{0,760} = \frac{13,66}{10}$$

$$\text{ou } x = 0^m,760 \times 1,366 = 1^m,038.$$

En généralisant on voit que la tension d'un gaz échauffé à  $t^\circ$ , sous volume constant, égale la tension primitive multiplié par l'expression  $(1 + t \times 0,00366)$  qu'on appelle le *binôme de dilatation*.

**Manomètre.** — Un *manomètre* est destiné à mesurer la tension des gaz.

**Manomètre à air libre.** — Un tube de verre *acb* (fig. 128) recourbé en U communique, à l'aide du robinet *r*, avec le réservoir fermé qui contient le gaz. Ce tube est ouvert à l'air libre en *f*, il contient du mercure.

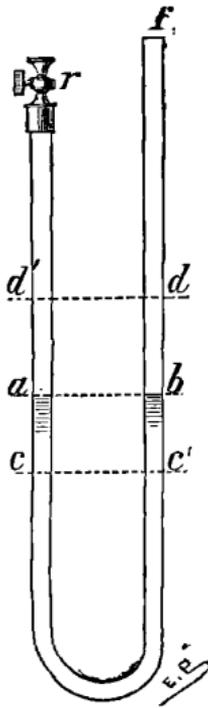


Fig. 128.  
Manomètre à air libre.

Si les niveaux du mercure sont sur une horizontale *ab*, la tension du gaz est la même dans le réservoir et dans l'atmosphère ; elle est donnée par la lecture du baromètre ; nous la supposons de 0<sup>m</sup>,760.

Si le niveau du mercure est  $d'$  dans la branche fermée,  $c'$  dans la branche ouverte, l'air du réservoir a une tension moindre; il faudrait lui ajouter la pression de la colonne de mercure  $d'c'$  pour avoir la pression atmosphérique. Supposons la distance verticale  $d'c'$  des deux niveaux égale à  $0^m,200$ , la tension du gaz est  $0,760 - 0,200$  ou  $0^m,560$ .

Le niveau extérieur est-il  $d$  et le niveau intérieur  $c$ ? leur distance verticale étant encore  $0,200$ , la tension du gaz intérieur est  $0,760 + 0,200$  ou  $0^m,960$ .

Veut-on évaluer les tensions en atmosphères? on trouve une atmosphère dans le premier cas;  $\frac{0,56}{0,76}$  ou  $0^{atm},73$  dans le second;  $\frac{0,96}{0,76}$  ou  $1^{atm},27$  dans le troisième.

On peut évaluer la tension en kilogrammes par centimètre carré : on a  $1^{Kgr},033$  pour une atmosphère; pour l'air raréfié,  $1,033 \times 0,73$  ou  $0^{Kgr},754$ , et, pour l'air comprimé,  $1,033 \times 1,27$  ou  $1^{Kgr},037$ .

Pour évaluer des pressions très peu différentes d'une atmosphère, on substitue l'eau au mercure dans le manomètre à air libre. Si la différence des niveaux est en plus ou en moins de  $0^m,30$ , la pression à évaluer est d'une atmosphère qui vaut, en eau,  $10^m,33$ , plus ou moins  $0^m,30$ ; les nombres  $10^m,66$  et  $10^m,03$  donnent la hauteur des colonnes d'eau équivalentes à ces pressions. — Leurs valeurs en atmosphères sont  $1 \pm \frac{30}{1033}$  atmosphère.

Les tubes de sûreté dont on se sert en chimie sont de petits manomètres à eau.

**Manomètre à air comprimé.** — Pour évaluer de fortes tensions, on emploie l'appareil suivant, qui est une application de la loi de Mariotte.

Un tube de verre épais, fermé à la partie supérieure (*fig. 129*), plein d'air, est plongé dans une masse de mercure renfermée dans une cuvette de fer parfaitement close.

Elle communique par un tube à robinet avec le réservoir du gaz. Les niveaux du mercure sont sur la même horizon-

tale *a* lorsque la cuvette est ouverte à l'air libre, et le volume intérieur du tube est pris pour *unité*. On en a marqué la moitié, le tiers, le quart, etc., sur la planchette qui soutient le tube et la cuvette,

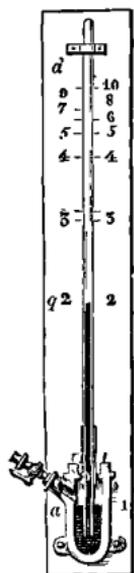


Fig. 129. — Manomètre à air comprimé.

Si la pression du gaz fait monter le mercure dans le tube jusqu'au chiffre 5, cela indique que le volume de l'air du tube a été réduit au *cinquième*, et, par suite, qu'il est soumis à une pression de *cing* atmosphères. Telle est la tension du gaz.

**Manomètre métallique.** — Les manomètres à air comprimé ont été remplacés par des manomètres métalliques qui sont moins fragiles.

Un tube de laiton ABC (*fig. 130*) à section aplatie est roulé en spirale. L'une de ses extrémités C est fermée, l'autre A communique par un tube à robinet avec le gaz dont on cherche la tension. L'extrémité C est reliée par une tige CF à une aiguille EF mobile autour du point D et dont la pointe parcourt un arc divisé en atmosphères.

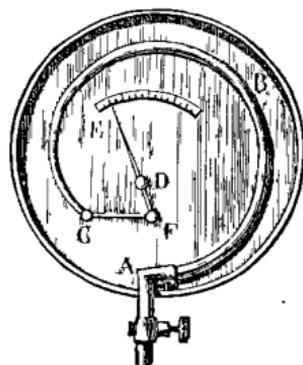


Fig. 130. — Manomètre métallique de Bourdon.

Les deux surfaces du tube sont inégales, la surface extérieure est la plus grande; elle subit la pression la plus forte tant à l'intérieur qu'à l'extérieur.

La pression du gaz comprimé qui remplit le tube quand on ouvre le robinet tend à le redresser; et l'extrémité C se déplace un peu de droite à gauche, ce qui fait tourner l'aiguille vers la droite. Un mouvement inverse se produit si la pression intérieure diminue; il est dû à l'élasticité du métal.

On a gradué l'arc en atmosphères. Ce manomètre est d'un usage courant; on le trouve sur toutes les chaudières de machines à vapeur.

Le baromètre métallique de Bourdon est un tube manométrique dans lequel on a fait le vide et qui se courbe plus ou moins lorsque la pression atmosphérique hausse ou baisse. On le gradue par comparaison avec un baromètre à mercure.

## CHAPITRE IV

### Pompes.

Les pompes de nos maisons puisent l'eau dans un puits et la font arriver au niveau du sol. Les physiciens se servent d'appareils analogues pour retirer l'air d'un vase clos, ce qui s'appelle *faire le vide*, ou pour comprimer un gaz dans un réservoir.

On trouve dans toutes les pompes les mêmes organes.

**Pompe à air.** — Nous choisissons un modèle des plus simples et dont le jeu est facile à comprendre.

Le *corps de pompe* est un cylindre métallique A (fig. 131) dans lequel se meut un *piston* B. Celui-ci est formé de disques de cuir gras empilés les uns sur les autres. Le piston frotte sur les parois du corps de pompe et le ferme exactement. On le manœuvre en agissant sur sa tige c, à l'aide d'un levier ou bien en saisissant directement la poignée qui la termine.

Deux tuyaux a, b s'ouvrent au fond du corps de pompe.

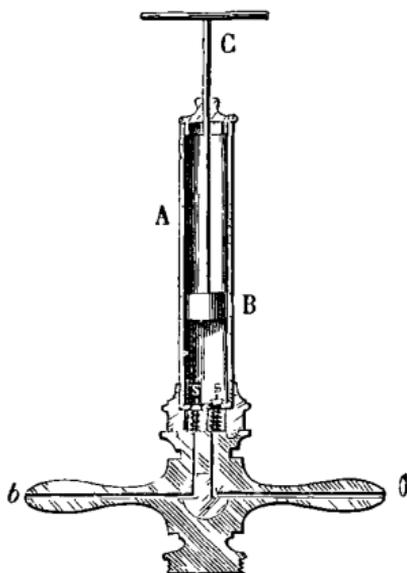


Fig. 131. — Pompe à main.

Ils sont bouchés par deux *soupapes*. La soupape d'entrée S (*fig. 132*) se meut de bas en haut; l'autre S', de haut en bas : c'est la soupape de sortie. L'une et l'autre ont la forme d'un cône tronqué garni de cuir; une tige métallique guide

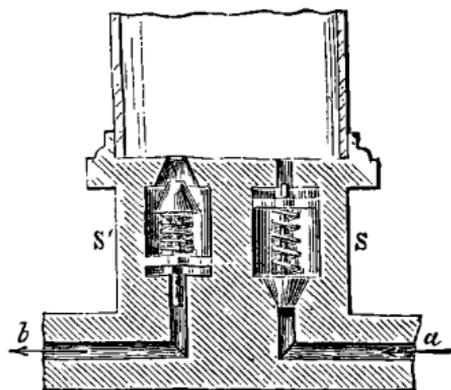


Fig. 132 — Soupapes.

leur mouvement. Un fil de cuivre roulé en spirale entoure cette tige et fait l'office d'un ressort qui maintient la soupape fermée.

Si on veut faire le vide sous une cloche reposant sur une platine, on fait communiquer, par un tube de caoutchouc épais, le tuyau de la platine avec le tube d'entrée *a*.

Le piston touchait primitivement le fond; on le soulève. Le vide se fait au-dessous de lui et la soupape d'entrée S ne supporte pas d'autre pression que celle du ressort qui la maintient fermée. L'air de la cloche la presse de bas en haut et la soulève; il entre dans le corps de pompe en vertu de son élasticité, et, son volume venant ainsi à s'accroître, sa force élastique diminue.

La seconde soupape S', pressée également de bas en haut par l'air atmosphérique, reste fermée.

Le piston s'arrête en haut de sa course. La soupape d'entrée S se referme. On fait descendre le piston; il comprime l'air qui est au-dessous de lui, lui fait acquérir une tension supérieure à la pression atmosphérique; la soupape de sortie S' cède à cet excès de pression et l'air du corps de pompe est rejeté dans l'atmosphère.

Les mêmes effets se reproduisent à chaque coup de piston, et l'on retire ainsi la plus grande partie de l'air de la cloche, ce qui a pour effet de diminuer constamment sa force élastique.

Les pompes à air furent inventées en 1650, par Otto de Guéricke, bourgmestre de Magdebourg. Il s'en servit pour

faire les expériences que nous avons déjà citées et qui sont propres à démontrer la réalité de la pression atmosphérique.

Il imagina l'expérience suivante :

Une sphère métallique, creuse AB (*fig.* 133), est composée de deux parties ou *hémisphères* qui s'appliquent l'une sur l'autre. Leurs bords C sont dressés et on introduit entre eux un anneau de cuir gras qui rend la fermeture hermétique.

Le vase ainsi fermé porte un tube à robinet A qui se visse sur la platine de la pompe à air. On fait le vide dans la sphère ; les deux moitiés sont alors maintenues l'une contre l'autre par la pression de l'air extérieur, et on ne peut plus les séparer. Si on laisse rentrer l'air, la tension de cet air à l'intérieur de la sphère égale la pression atmosphérique et en annule l'effet ; on peut alors séparer les deux hémisphères.

Dans l'expérience d'Otto de Guéricke les hémisphères avaient d'assez grandes dimensions pour que l'effort de vingt-quatre chevaux ne pût les séparer, lorsqu'on y avait fait le vide.

On ne peut détacher de la platine une cloche dans laquelle on a raréfié l'air, tant est grande la pression de l'air extérieur sur cette cloche. Il faut laisser rentrer l'air dans la cloche pour pouvoir l'enlever. On opère, dans les grandes villes, la vidange des fosses d'aisances en se servant de grands tonneaux de fer dans lesquels on fait le vide à l'aide d'une pompe à air ; elle est mise en action par une machine à vapeur. Un large tuyau part du tonneau et plonge dans la fosse. La pression atmosphérique fait monter dans le tonneau les liquides et les boues fétides qui la remplissent.

La raréfaction de l'air s'arrête forcément lorsque sa force élastique n'est plus capable de soulever la soupape d'entrée.

**Machine pneumatique.** — Dans les *machines pneumatiques* modernes on supprime le ressort qui presse cette soupape (*fig.* 134). On donne une grande longueur à sa tige.



Fig. 133. — Hémisphères de Magdebourg.

Elle monte jusqu'au couvercle de la pompe et traverse à frottement les cuirs du piston. Assez souvent le piston est percé d'un canal que ferme la soupape de sortie *c* ; elle se meut alors, comme la première, de bas en haut ; un petit ressort la maintient en place.

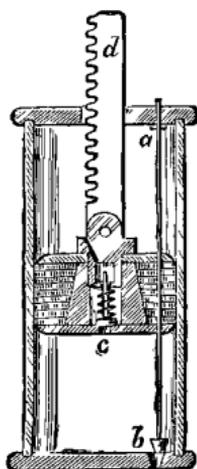


Fig. 134.  
Piston et soupapes.

Lorsque le piston monte, il entraîne la soupape *b* ; mais celle-ci est promptement arrêtée dans son mouvement ascendant, parce que sa tige butte en *a* contre le couvercle. Le piston s'élève seul en glissant sur la tige. Lorsqu'il descend, la tige le suit et la soupape se ferme immédiatement. L'air qui est dans le corps de pompe sort par la soupape *c*, lorsque la compression lui a donné une force élastique supérieure à la pression atmosphérique.

Dans les machines pneumatiques, on trouve deux corps de pompe identiques ; les tiges des pistons *d*, taillées en crémaillères, engrènent dans une roue dentée que l'on fait mouvoir tantôt de gauche à droite, tantôt de droite à gauche, en s'aidant d'un levier DD fixé à son axe. L'une des crémaillères s'élève tandis que l'autre s'abaisse ; l'épuisement de l'air est continu.

On voit en P (*fig. 135*) la platine de verre dépoli sur laquelle on applique les bords des cloches dont on veut raréfier l'air : un tuyau s'ouvre au centre et aboutit par deux canaux latéraux au fond de chaque corps de pompe.

Un robinet R traverse ce tuyau d'aspiration et permet d'établir ou d'interrompre la communication entre les pistons et les récipients. Ce robinet est percé, dans la direction de son axe, d'un canal qui s'ouvre à l'air libre. On ferme ce canal à l'aide d'une tige de laiton. Si on enlève ce bouchon, l'air rentre dans les récipients.

Une petite cloche V communique avec le tuyau d'aspiration ; elle renferme un petit tube courbé en U : l'une des branches est fermée et pleine de mercure, l'autre est ouverte.

Lorsque la cloche est pleine d'air, la pression de ce gaz

maintient le mercure soulevé dans la branche fermée. Si on fait le vide dans la cloche, par le jeu des pompes, la pression diminue et la colonne de mercure qui la mesure devient plus petite que la longueur du tube fermé. Le mercure descend de ce tube et monte dans la branche ouverte. La force élastique de l'air intérieur est alors mesurée par la distance des deux niveaux du mercure, distance que l'on peut lire sur

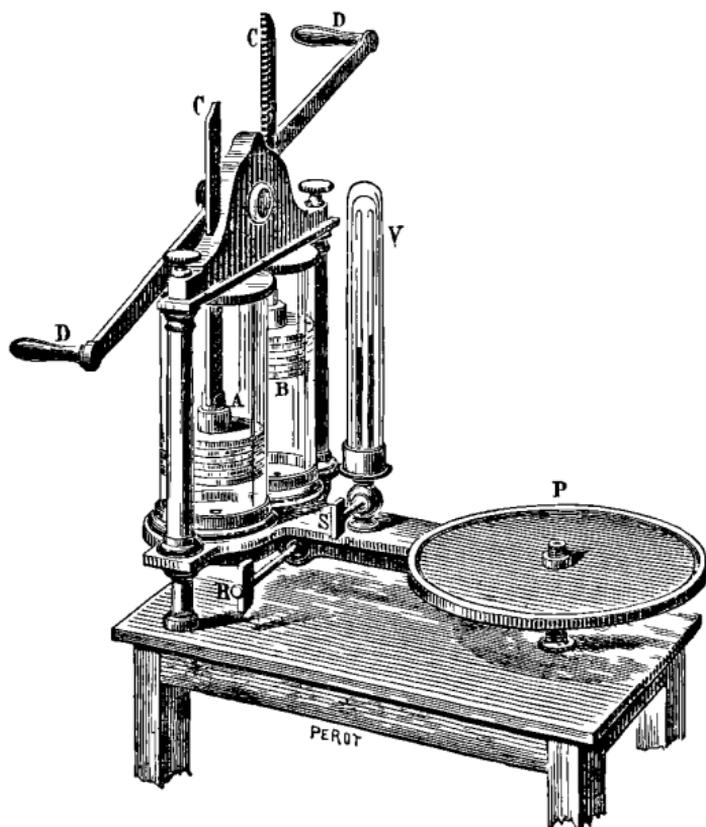


Fig. 135. — Machine pneumatique.

la règle divisée qui supporte le tube. L'imperfection des pompes, les rentrées de l'air qui se font malgré toutes les précautions ne permettent pas de pousser aussi loin qu'on le voudrait la raréfaction de l'air. Les meilleures machines font le vide à un millimètre près, c'est-à-dire laissent dans un récipient une masse d'air dont la force élastique est équiva-

lente à la pression d'une colonne de mercure haute d'un millimètre.

Le vide de la chambre d'un baromètre est beaucoup plus complet; ce n'est pas encore le vide parfait, car cette chambre est pleine de vapeurs de mercure.

**Pompe de compression.** — La pompe que nous avons décrite (*fig. 133*) se transforme en appareil de compression si on laisse ouvert à l'air le tuyau *a*, qui aboutit à la soupape d'entrée, et si le tuyau *b* de sortie aboutit par un tube à un récipient fermé.

Le jeu de la pompe est le même. L'air y entre quand on soulève le piston, et celui-ci, en baissant, le refoule dans le récipient. Le poids du gaz emprisonné dans celui-ci augmente à chaque coup de piston et sa tension est proportionnelle à ce poids. On peut la porter à 10 ou 20 atmosphères.

On emploie ces pompes dans la fabrication des eaux de Seltz, pour refouler dans un réservoir plein d'eau l'acide carbonique qui doit s'y dissoudre.

On fait un usage intéressant de l'air comprimé dans les travaux hydrauliques. Tantôt on fait descendre au fond de l'eau une caisse de tôle ouverte par le bas, dans laquelle on injecte de l'air comprimé qui refoule l'eau et l'empêche d'entrer dans la caisse. Des ouvriers peuvent alors y descendre et exécuter certains travaux. Des pompes placées dans un bateau envoient sans cesse de l'air frais qui entretient la respiration.

Tantôt un ouvrier s'enveloppe dans un vêtement en caoutchouc, appelé scaphandre. Il est là comme dans un sac et il reçoit encore d'une pompe l'air nécessaire à sa respiration. Il peut alors, sans trop de dangers, être descendu au fond de l'eau. Ses bras sont assez libres pour travailler et on a pratiqué à la hauteur des yeux des trous fermés par des glaces qui lui permettent de voir les objets extérieurs.

**Pompes à liquides.** — La pompe *aspirante* se trouve dans nos maisons. Le piston est souvent en bois, garni, sur son pourtour, de cuir ou de chanvre tressé. Un canal le traverse, fermé par une soupape à charnière *S* (*fig. 136*) qui

s'ouvre de bas en haut. La soupape du fond de la pompe est souvent un *clapet c* (fig. 137) qui s'ouvre de bas en haut. Sa forme est celle d'un tronc de cône et elle ferme une ouverture de même forme.

Lorsqu'on veut tirer l'eau d'un puits, on établit la pompe au-dessus du sol. Un *tuyau d'aspiration as* (fig. 138) aboutit dans le corps de pompe, au-dessous de la soupape S et plonge dans l'eau du puits. Au-dessus du piston se trouve un tuyau latéral E par lequel l'eau se déverse.

Au début, lorsque la pompe vient d'être installée, le piston est au bas de sa course; le tuyau d'aspiration est plein d'air; l'eau qui s'y trouve est de niveau avec celle du puits.

Le piston monte et fait le vide au-dessous de lui; l'air du tuyau d'aspiration passe en partie dans le corps de pompe après avoir soulevé la soupape S; et cette dilatation diminue sa force élastique. Sa pression sur l'eau devient en *a* inférieure à celle que l'atmosphère exerce au dehors sur le liquide; l'excès de pression extérieure fait monter l'eau dans le tuyau, jusqu'à ce que la pression du gaz intérieur, augmentée de celle qu'exerce en *a* la colonne soulevée, égale la pression atmosphérique, mesurée par une colonne

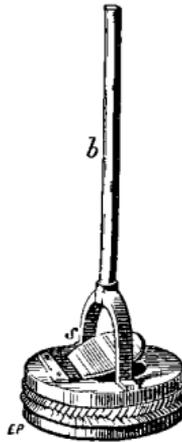


Fig. 136.

Piston, soupapes.

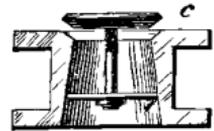


Fig. 137.

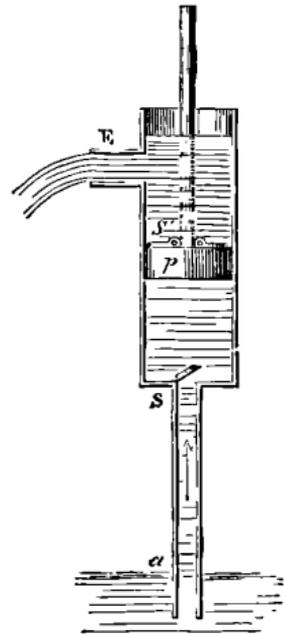


Fig. 138.

Pompe aspirante.

d'eau de 10<sup>m</sup>,33.

Le piston s'arrête ; la soupape S se referme, et, lorsque le piston redescend, il comprime l'air qui remplit la pompe et le fait sortir par la soupape S'.

De nouveaux coups de piston déterminent une ascension nouvelle de l'eau dans le tuyau d'aspiration et dans le corps de pompe qu'elle remplit ; la pompe est *amorcée*.

A partir de ce moment, chaque fois que le piston se soulève, l'eau monte et semble le suivre ; ce n'est pas qu'il l'attire, mais elle est poussée de bas en haut par la pression atmosphérique qui s'exerce toujours sur le niveau de l'eau dans le puits. Si le piston s'abaisse, l'eau renfermée dans le corps de pompe, et qui n'est pas compressible, soulève la soupape du piston et passe au-dessus de lui ; cette soupape se referme et un mouvement ascendant du piston fait parvenir le liquide jusqu'au tuyau de déversement par lequel il s'écoule au dehors.

On ne peut pas établir cette pompe dans tous les puits. La pression atmosphérique ne peut élever l'eau dans un tube vide d'air à plus de 10<sup>m</sup>,33. Si le puits est plus profond, la pompe ne fonctionne plus ; le liquide ne parvient pas jusqu'au piston. Il ne faut pas compter sur plus de 8 mètres dans l'évaluation de la hauteur limite, par suite des imperfections que présente la construction de la pompe.

Souvent même, lorsqu'elle n'a pas servi depuis longtemps, le piston se dessèche et ne frotte plus suffisamment contre les parois ; l'eau n'est plus aspirée. On rétablit le jeu de la pompe en versant un seau d'eau au-dessus du piston. L'eau reste en partie au-dessus de lui et bouche les issues par lesquelles l'air passait au-dessous.

**Pompe aspirante et foulante.** — Pour faire parvenir l'eau à de grandes hauteurs, on modifie la position des soupapes. Le piston *p* (*fig.* 139) est massif, très résistant. La soupape S ferme le tuyau d'aspiration ; la soupape de sortie S' est placée à l'entrée d'un tuyau latéral E qui s'ouvre près du fond et qui peut avoir une grande longueur verticale.

Tout se passe comme nous l'avons dit, lorsque le piston se soulève. La pression atmosphérique fait arriver l'eau dans

la pompe qui est à quelques mètres du niveau *a*. On comprime le liquide, en abaissant le piston, et on le fait pénétrer dans le tube latéral *E* en forçant ainsi l'ouverture de la soupape *S'*. Cette partie de la manœuvre est la plus pénible. La résistance qu'il faut vaincre est très grande; elle est proportionnelle à la surface du piston et à la hauteur du niveau de l'eau du tube *E* au-dessus du piston. C'est pourquoi on donne à ces pompes de petits diamètres.

**Pompe à incendie.** — Une pompe à incendie se compose d'une ou deux pompes foulantes qui n'ont plus de tuyaux d'aspiration.

On voit sur la figure deux pompes *A* (fig. 140) placées dans une cuve que l'on maintient pleine d'eau.

Les tiges des pistons se manœuvrent à l'aide d'un grand levier *BB* qui tourne autour de son milieu. Les hommes agissent sur des traverses

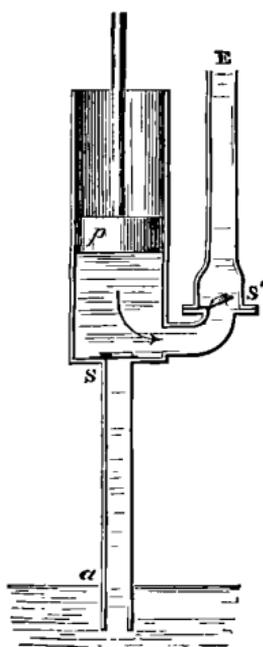


Fig. 139. — Pompe aspirante et foulante.

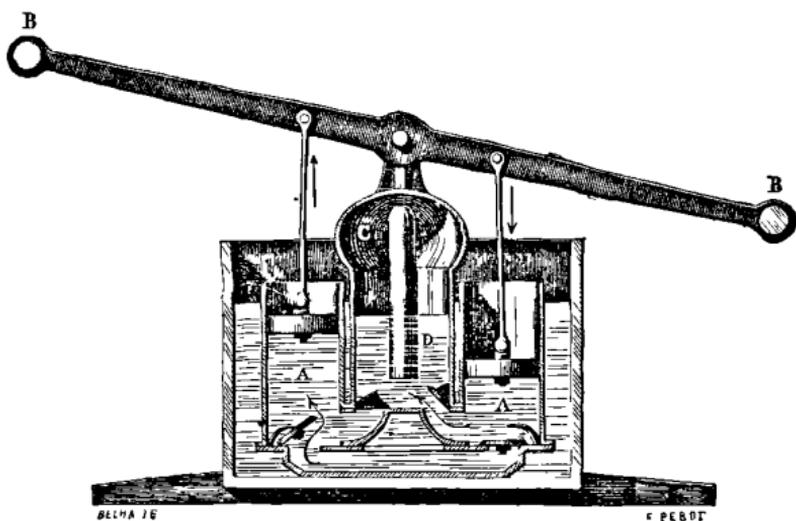


Fig. 140. — Pompe à incendie.

horizontales placées en B. Les pistons sont pleins. Leur mouvement est alternatif. Les soupapes d'entrée sont au fond du corps de pompe. Les soupapes de sortie, placées un peu plus haut, s'ouvrent dans une cloche métallique C pleine d'air. L'eau refoulée dans cette cloche peut en sortir par le tuyau D qui s'ouvre au fond. C'est sur lui que se vissent, au dehors, les tuyaux de cuir destinés à porter l'eau jusqu'aux étages supérieurs d'une maison incendiée.

L'eau entre dans la cloche C plus rapidement qu'elle n'en sort; elle comprime l'air qui s'y trouve et la tension de ce gaz rend continu le jet d'eau qui s'écoule par le tuyau D. En même temps, elle amortit, comme un ressort, le choc brusque des pistons qui, transmis aux tuyaux, les ferait crever.

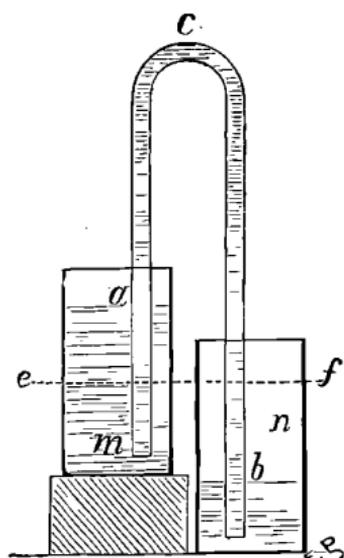


Fig. 141. — Siphon.

**Siphon.** — Le siphon sert à transvaser les liquides ou à établir l'égalité de niveau d'un même liquide dans deux vases différents.

C'est un tuyau *abc* (fig. 141) de caoutchouc, de fer-blanc, de verre, recourbé en U, que l'on plonge par ses deux extrémités dans deux vases *m, n*.

On remplit ce tuyau de liquide et, lorsqu'il est ainsi *amorcé*, on voit le liquide couler du vase *a* dans le vase *b*, jusqu'à ce que les niveaux dans les deux vases aient atteint le même plan horizontal *ef*.

Pour expliquer le jeu du siphon, nous remarquerons que chacun des deux niveaux primitifs *ab* est soumis à la pression atmosphérique. Dans le cas où le siphon est plein d'eau, cette pression équivaut à celle d'une colonne d'eau de 10 mètres environ. L'eau transmet ces pressions dans le tube jusqu'au point culminant C. Admettons, pour fixer les idées, que le point C soit à 2 mètres du point *a* et à 3 mètres du

point *b*, dans le sens vertical. La tranche verticale de liquide qui est au point *C* supporte, de gauche à droite, une pression de 8 mètres d'eau, et, de droite à gauche, une pression de 7 mètres. Le liquide n'est plus alors en équilibre, et il va s'écouler dans la branche *bc*. En même temps, la pression atmosphérique empêche la rupture de la colonne et fait monter l'eau du vase *a* dans la branche *ac*.

L'écoulement durera jusqu'à ce que, le niveau baissant en *a* et montant en *b*, les deux surfaces du liquide soient sur le même plan horizontal *ef*. Alors, les distances de ces surfaces au point *c* sont égales et toute cause de mouvement disparaît.

Le siphon cesserait de fonctionner si la hauteur du point culminant *c*, au-dessus de chacun des deux niveaux, dépassait 10<sup>m</sup>,33.

Comme c'est la pression atmosphérique qui détermine le mouvement de l'eau, le siphon ne fonctionne pas dans le vide.

#### **Extension du principe d'Archimède aux gaz.**

— Le principe d'Archimède est applicable aux gaz comme aux liquides.

*Tout corps plongé dans un gaz y subit une poussée verticale, de bas en haut, égale au poids du gaz qu'il déplace.*

Dans nos pesées habituelles, nous ne déterminons pas le poids réel des corps, mais un poids apparent. Si le corps a un volume d'un décimètre cube, le poids apparent est égal au poids réel diminué de 1<sup>er</sup>,3, poids d'un litre d'air. Le poids d'un décimètre cube d'eau n'est pas 1 000 grammes si on le pèse dans l'air, mais 998<sup>gr</sup>,7. C'est pour cela que, dans la définition du kilogramme, on spécifie que l'on pèsera dans le vide un décimètre cube d'eau prise à 4°.

Un corps plongé dans l'air est donc soumis à deux forces opposées : l'une, son poids qui tend à le faire tomber ; l'autre, la poussée de l'air qui le soulève. Elle est égale au poids d'un volume d'air égal à celui du corps. Le corps tombe parce que, la plupart du temps, son poids l'emporte de beaucoup sur la poussée. Il flotte dans un air tranquille, si ces

deux forces sont égales ; c'est, à peu près, l'état des nuages. Il s'élève dans l'atmosphère, si le poids du corps est plus petit que celui d'un égal volume d'air. C'est le cas de l'air chaud qui s'élève dans nos cheminées et celui d'une bulle de savon gonflée avec de l'hydrogène.

**Montgolfières.**— Etienne et Joseph Montgolfier eurent, vers 1780, l'ingénieuse idée de gonfler une enveloppe sphérique de papier avec de l'air chaud. On brûlait de la paille au-dessous du ballon. Celui-ci, une fois gonflé, s'élevait dans l'air. La première expérience date du 4 juin 1783. Elle fut faite à Annonay et répétée avec enthousiasme à Paris.

Le professeur Charles compléta la découverte des ballons, en substituant à l'air chaud l'hydrogène, qui est beaucoup moins dense. On enfermait le gaz dans une enveloppe de soie. Le premier *aérostat* fut lancé à Paris, le 27 août 1783. Les ballons gonflés d'air chaud avaient reçu le nom de *montgolfières*.

C'est dans une montgolfière que Pilâtre de Rozier et d'Arlandes firent le premier voyage aérien. Ils s'élevèrent à une hauteur de 1 000 mètres et prirent terre à deux lieues de leur point de départ.

Le 1<sup>er</sup> décembre 1783, Charles et Robert s'élevèrent dans un aérostat gonflé d'hydrogène et descendirent à 9 lieues de Paris.

**Aérostats.** — L'enveloppe des aérostats est fabriquée avec une étoffe de soie imprégnée d'un vernis au caoutchouc. Un filet la recouvre et soutient un vaste panier d'osier, la *nacelle*, dans laquelle se met l'aéronaute.

L'enveloppe gonflée a une forme sphérique qui se prolonge en bas par un tube ouvert. On dispose en haut une soupape à ressort que l'aéronaute peut ouvrir à l'aide d'une corde qui traverse le ballon et descend jusqu'à la nacelle.

Le ballon est gonflé d'hydrogène ou, le plus souvent, de gaz d'éclairage. On en calcule les dimensions d'après le poids des corps qu'il doit enlever.

Un mètre cube d'air pèse 1<sup>kg</sup>.300: le même volume d'hydrogène ne pèse que 0<sup>kg</sup>.083. Un aérostat peut donc en-

lever  $1^{\text{kg}},200$  par mètre cube. On ne peut compter que sur  $0^{\text{kg}},650$  si le ballon est gonflé avec le gaz d'éclairage.

Lorsqu'on a calculé le poids de l'enveloppe, des agrès, des personnes qui doivent prendre place dans la nacelle, on ajoute comme *lest* des sacs de sable, de telle sorte que la poussée ne dépasse que de quelques kilogrammes le poids du ballon; celui-ci rendu libre s'élèvera dans l'air avec lenteur.

Comme le poids d'un litre d'air diminue à mesure qu'on s'éloigne du sol, la poussée diminue progressivement et devient nulle lorsqu'elle égale le poids du ballon. Il y a donc une limite de hauteur que l'aérostat ne peut dépasser.

On jette du lest quand on veut monter; si on veut descendre, il faut ouvrir la soupape du ballon; le gaz sort en partie et il est remplacé par l'air, ce qui augmente le poids du ballon.

On suit les indications d'un baromètre pour pouvoir calculer la hauteur à laquelle on est parvenu. Elle ne dépasse pas 8000 mètres. La raréfaction de l'air dans ces hautes régions en rend le séjour très dangereux pour l'homme; le froid y est vif et l'asphyxie y est toujours à craindre.

### RÉSUMÉS ET EXERCICES

*Pesanteur.* — 1<sup>o</sup> Calculer la profondeur d'un puits de mine, sachant qu'une pierre qu'on laisse tomber à l'orifice met 8 secondes pour arriver au fond. L'espace qu'elle parcourt dans la première seconde est de 9 mètres.

2<sup>o</sup> Un corps est placé successivement dans chacun des plateaux d'une balance. Les poids qui lui font équilibre sont  $325^{\text{gr}},75$  et  $326^{\text{gr}},84$ . Qu'en conclure, relativement à la justesse de la balance et quel est le poids exact du corps?

3<sup>o</sup> Quelle longueur faut-il donner à un pendule pour qu'il fasse quatre oscillations par seconde; la longueur du pendule à seconde est  $0^{\text{m}},993$ .

4<sup>o</sup> Un bâton cylindrique est terminé par un bout de fer également cylindrique. Déterminer approximativement, par une expérience simple, la place de son centre de gravité.

*Propriétés des liquides.*

Une surface liquide  $S$  subit une pression de  $P$  kilogrammes, la pression ramenée à l'unité de surface est  $\frac{P}{S}$ .

Le liquide transmet cette pression à une surface  $S'$ , la pression  $P'$

sur celle-ci est telle que  $\frac{P'}{S'} = \frac{P}{S}$ , c'est-à-dire que la pression sur l'unité de surface reste la même.

La pression  $P$  d'un liquide pesant sur une surface horizontale  $S$  située à une distance  $H$  du niveau, le poids spécifique du liquide étant  $d$  a pour expression  $PSHd$ .

La pression sur l'unité de surface est  $PHd$ ; la même en tous les points d'un plan horizontal qui traverse le liquide, que celui-ci soit dans un seul vase ou dans plusieurs vases réunis par des tuyaux.

Le poids spécifique  $d$  d'un corps de poids  $P$ , de volume  $V$  est  $\frac{P}{V}$ .

On en déduit

$$P = Vd; \quad V = \frac{P}{d}.$$

Si le poids est exprimé en grammes, le volume s'exprime en centimètres cubes.

Des corps de mêmes poids, de densités  $d$  et  $d'$  ont des volumes  $V$  et  $V'$  tels que

$$Vd = V'd'.$$

Si les volumes sont les mêmes, on a entre les poids et les poids spécifiques la relation

$$\frac{P}{d} = \frac{P'}{d'}.$$

Un corps de volume  $V$  du poids spécifique  $d$ , plongé dans un liquide de poids spécifique  $d'$ , y subit une poussée dirigée de bas en haut qui a pour expression  $V \times (d - d')$ .

Si deux colonnes liquides de hauteurs  $H$  et  $H'$  exercent la même pression par unité de surface, bien que leurs poids spécifiques soient  $d$  et  $d'$ , on a la relation  $Hd = H'd'$ .

5° Un canal est bordé par un quai dont le parapet est rectiligne. On mesure en deux points, du bord du parapet, distants de 100 mètres, les hauteurs verticales au-dessus du niveau de l'eau. Reconnaître à l'aide de ces mesures si ce bord est ou non horizontal.

6° Un grand baquet à parois inclinées sur l'horizon a pour fond un cercle dont la surface est  $0^m 4,6374$ . Le niveau de l'eau est à  $0^m,85$  du fond. Quelle est en grammes la pression de l'eau sur le fond? Que serait-elle si le baquet était plein d'huile de lin dont le poids spécifique est 0,93?

7° Une plaque métallique horizontale ferme un tuyau communiquant avec les réservoirs d'eau d'une ville. La distance verticale du niveau de ces réservoirs à la plaque est de 30 mètres, la surface de la plaque est de 4 centimètres carrés. Calculer la pression que subit la plaque.

8° Un piston, dont la surface est un décimètre carré, se meut à frottement dans l'intérieur d'un tube cylindrique qui communique avec le réservoir d'eau d'une ville. Le piston soutient un poids de 200 kilogrammes. Il repose sur l'eau qui remplit le cylindre. Quelle doit être la hauteur du niveau des réservoirs au-dessus du piston pour que celui-ci soulève le poids de 200 kilogrammes?

9° Les deux cylindres d'une presse hydraulique ont pour section : l'un  $0^m,125$ , l'autre  $0^m,02$ . Quelle pression, évaluée en kilogrammes, doit-on exercer sur la tige du plus petit piston pour qu'il fasse équilibre à un poids de 1200 kilogrammes, représentant la charge du plus grand piston ?

10° Un morceau de plomb pèse  $0^kgr,75$  quand il est plongé dans l'eau. Son poids spécifique est de 11,35. Que pèse-t-il dans l'air ?

11° Un morceau de granit pèse 200 grammes dans l'air, son poids spécifique est 2,7. Quel serait son poids s'il était plongé dans l'alcool dont le poids spécifique est 0,82 ?

12° Un bloc de glace a la forme d'un cube de 2 mètres de côté ; son poids spécifique est 0,93. Quel est son poids ? Il flotte sur l'eau de mer, dont le poids spécifique est 1,03. Quel est le volume de glace immergé. On charge de pierres la face supérieure du cube, jusqu'à ce qu'elle arrive au niveau de l'eau. Quel est le poids de ces pierres ?

13° Un facon est rempli exactement par  $0^kgr,550$  d'eau. Quel poids d'huile peut-il contenir ? le poids spécifique de l'huile est 0,91.

14° Un petit ballon de verre pèse, vide,  $0^kgr,135$  ; lorsqu'il est plein de mercure, il pèse  $1^kgr,48$ . Quel est en centimètres cubes le volume intérieur du ballon. Poids spécifique du mercure 13,6.

15° On fond ensemble  $1^kgr,500$  d'argent dont le poids spécifique est 10,47, et  $2^kgr,700$  d'or dont le poids spécifique est 19,25. Le volume de l'alliage est la somme des volumes des deux métaux. Quel est le poids spécifique de l'alliage ?

16° Une médaille d'or pèse  $0^kgr,125$  dans l'air et  $0^kgr,117$  lorsqu'elle est plongée dans l'eau. L'or qui s'y trouve est-il pur ou allié à un autre métal ? Poids spécifique de l'or 19,36.

17° Deux boules, l'une d'argent, l'autre de cuivre, du poids de  $0^kgr,200$  se font équilibre lorsque, suspendues par des fils aux plateaux d'une balance, elles sont plongées dans l'air. Qu'arrivera-t-il si on les plonge dans l'eau et quel poids faudra-t-il placer dans l'un des plateaux de la balance (on indiquera lequel) pour rétablir l'équilibre. Poids spécifiques : du cuivre 8,85, de l'argent 10,47.

18° Un morceau de sucre candi pèse 25 grammes. Comme il est soluble dans l'eau, on le pèse quand il est plongé dans l'essence de térébenthine qui ne peut le dissoudre. Son poids apparent est  $13^r,49$ . Le poids spécifique de l'essence est 0,86. Quel est celui du sucre ?

19° Un tube à longues branches courbé en U renferme dans sa partie courbe une colonne de mercure dont les surfaces sont de niveau. On verse sur le mercure : d'un côté, de l'essence de térébenthine dont le poids spécifique est 0,86 ; de l'autre, de l'acide sulfurique dont le poids spécifique est 1,8. La hauteur de la colonne d'essence est  $0^m,75$  ; quelle doit être celle de l'acide sulfurique pour que les deux niveaux du mercure soient dans le même plan horizontal ?

20° Un litre d'air pèse  $1^r,293$ . Quel est son poids spécifique ?

*Propriétés des gaz.* — Les notions relatives à la pression et à sa transmission sont communes aux liquides et aux gaz. Le principe d'Archimède s'applique également aux gaz.

Dans une masse gazeuse en équilibre, la force élastique du gaz est égale à la pression qu'il subit.

La pression atmosphérique est, en moyenne, de 1<sup>kr</sup>,033 par centimètre carré, en nombre rond, un kilogramme, si on l'évalue au niveau de la mer; elle diminue à mesure qu'on s'élève dans l'atmosphère et devient nulle aux limites de la couche d'air qui entoure la terre.

On l'évalue souvent par la hauteur  $H$  de la colonne de mercure d'un baromètre. Sur une surface  $S$ , cette pression

$$P = S \times H \times 13,59.$$

Elle est donnée en grammes si l'unité de longueur adoptée est le centimètre.

Les volumes  $V$  et  $V'$  d'un même poids de gaz, soumis à des pressions  $H$  et  $H'$ , sont reliés par la formule  $VH = V'H'$ .

$H$  et  $H'$  représentent également les forces élastiques du gaz en équilibre.

Les poids spécifiques  $D$  et  $D'$  de la masse gazeuse sont proportionnels aux pressions

$$\frac{D}{H} = \frac{D'}{H'}.$$

Les poids  $P$  et  $P'$  d'un même volume de gaz pris sous des pressions différentes sont également proportionnels à ces pressions

$$\frac{P}{H} = \frac{P'}{H'}.$$

Le poids spécifique  $d$  d'un gaz est souvent rapporté à celui de l'air pris pour unité. Comme un litre d'air à 0°, dont la force élastique est 0<sup>m</sup>,760, pèse 1<sup>gr</sup>,293, le poids  $P$  d'un gaz dont le volume est  $V$  litres à 0° est  $P = V \times d \times 1<sup>gr</sup>,293$ .

Le coefficient de dilatation des gaz est 0,00366.

Dès lors, le poids  $P$  d'un volume  $V$  de gaz, mesuré à la température de  $t$  degrés centigrades, est

$$P' = \frac{V \times d \times 1,293}{1 + t \times 0,00366}.$$

Lorsqu'un corps dont le volume est  $V$  litres, ayant une densité rapportée à l'eau représentée par  $D$ , est plongé dans un gaz dont la densité rapportée à l'air est  $d$ , son poids apparent est en kilogrammes

$$VD - V \times d \times 0,001293.$$

Nous mettons 0,001293 pour exprimer le poids d'un litre d'air en prenant le kilogramme pour unité de poids.

21° Quelle est, en kilogrammes, la pression exercée par l'atmosphère sur une table dont la surface est 2 mètres carrés; la hauteur barométrique est 0<sup>m</sup>,778.

22° Quelle serait la hauteur d'un baromètre construit avec l'huile d'olive dont le poids spécifique est 0,87. Celui du mercure est 13,6

et la colonne de ce liquide qui mesure la pression atmosphérique est  $0^m,75$ .

23° Un crève-vessie est fermé par une membrane dont la surface est de  $0^m,012$ . La pression extérieure est mesurée par une colonne de mercure de  $0^m,765$ ; l'air qui remplit le vase a une force élastique de  $0^m,15$ . Quelle est, en kilogrammes, la pression qui tend à briser la membrane?

24° A combien d'atmosphères peut-on comprimer un gaz dans un réservoir dont le métal peut supporter sans se rompre une pression de  $0^{Kgr},500$  par millimètre carré.

25° On observe un baromètre au sommet d'une tour et à sa base; les hauteurs du mercure sont  $0^m,752$  et  $0^m,758$ . Trouver la hauteur de la tour, sachant qu'un litre d'air pèse  $1^{sr},29$  et un litre de mercure  $13^{Kgr},596$ .

26° Un ballon à robinet est plein d'air, le poids de ce gaz est  $10^{Kgr},25$  sous la pression  $0^m,760$ . On fait le vide dans le ballon et on le transporte au sommet d'une montagne. On le remplit de l'air raréfié, puis, après l'avoir fermé de nouveau, on le pèse; il ne renferme plus que  $7^{sr},84$  d'air. Trouver, d'après cela, quelle était la pression atmosphérique au sommet de la montagne.

27° Un vase, dont la capacité est 200 litres, est plein d'air atmosphérique et communique par un tuyau inférieur avec les réservoirs d'eau d'une ville. L'eau, en pénétrant dans celui-ci, comprime l'air qui s'y trouve. Quel sera le volume de cet air lorsque l'équilibre sera établi? Le niveau de l'eau se trouve dans le réservoir à 35 mètres au-dessus du vase. Si le vase est muni d'un manomètre à air libre, quelle sera la différence des niveaux du mercure dans ce manomètre? — Si le manomètre est à air comprimé et gradué en atmosphères, quelle sera l'indication de ce manomètre?

28° On s'élève en aérostat à une hauteur telle que la hauteur du baromètre n'est plus que  $0^m,540$ . On remplit un ballon de 10 litres de l'air dans lequel on se trouve. On demande quel est le poids de ce volume d'air et quel est son poids spécifique par rapport à l'eau? On connaît le poids normal d'un litre d'air.

29° Un réservoir de pompe à incendie, plein d'air, communique au dehors par un tuyau vertical très long et ouvert à sa partie supérieure. On comprime l'air à l'aide des pompes qui refoulent l'eau dans le réservoir et on lui donne une force élastique de 4,25 atmosphères. A quelle hauteur au-dessus du niveau intérieur l'eau s'élèvera-t-elle dans le tuyau?

30° Un réservoir dans lequel on comprime de l'air est percé d'une ouverture ayant une surface de  $0^m,0003$ . Elle est fermée par une soupape chargée d'un poids de 10 kilogrammes. Quelle doit être, en atmosphères, la force élastique du gaz intérieur pour que la soupape se soulève?

31° La densité de l'hydrogène est 0,069 en prenant celle de l'air pour unité.

1° Quel est son poids spécifique rapporté à l'eau?

2° Quel est le poids de 3 mètres cubes d'hydrogène pris à  $0^{\circ}$ , sous la pression  $0^m,760$ ?

3° Quel serait ce poids à la température de  $30^{\circ}$  et sous la pression  $0^m,740$ ?

4° Quel serait le poids dont il faudrait charger un aérostat de 100 mètres cubes, gonflé avec de l'hydrogène, pour l'empêcher de s'élever dans l'air? les deux gaz sont pris dans les conditions normales : température 0°, force élastique 0<sup>m</sup>,760. On connaît le poids d'un litre d'air et le poids spécifique de l'hydrogène.

32° On a deux ballons réunis par un tube à robinet. L'un a une capacité de 10 litres et est vide d'air; l'autre a une capacité de 8 litres et l'air qui le remplit a une force élastique de 0<sup>m</sup>,760. On ouvre le robinet et on fait communiquer les deux ballons. Quelle sera la force élastique du gaz lorsqu'il se sera répandu dans le ballon vide.

33° Dans une expérience d'Otto de Guéricke, une pompe était fermée par un piston mobile. Une corde, attachée à la tige du piston, passait sur une poulie et était tirée par des hommes. Lorsqu'on faisait le vide dans cette pompe, le piston descendait malgré l'effort que faisaient les hommes pour le retenir. Calculer, en kilogrammes, ce que devrait être cet effort, en supposant au piston une surface de 0<sup>m</sup>4,03 et en admettant que la pression atmosphérique est 0<sup>m</sup>,760 et la force élastique de l'air qui remplit la pompe 0<sup>m</sup>,284. — Poids spécifique du mercure 13,6.

34° Un réservoir de 200 litres est plein d'air atmosphérique. Une pompe de compression y refoule sans cesse de nouvelles quantités de ce gaz. Sa capacité est de 1<sup>l</sup>,25. Combien faut-il de coups de piston pour que la tension du gaz comprimé soit de 3 kilogrammes par centimètre carré?

35° Pourquoi faut-il enlever la bonde d'une barrique pour que le vin s'écoule facilement par le robinet?

36° On plonge dans un verre plein d'eau une mèche de coton bien mouillée par ce liquide; une grande portion de la mèche pend librement au dehors du vase. Au bout d'un certain temps, le vase se trouve complètement vidé. Chercher les phénomènes de physique qui permettent d'expliquer cette expérience?

37° Quel est le poids, dans le vide, d'une boule d'ivoire qui pèse dans l'air 0<sup>Kgr</sup>,320. Le poids spécifique de l'ivoire est 1,9 et le poids d'un litre d'air 1,29.

38° Deux boules, l'une de platine, l'autre d'ébène, ont dans le vide le même poids absolu 0<sup>Kgr</sup>,200. Elles sont suspendues sous une cloche aux plateaux d'une balance. On remplit cette cloche d'acide carbonique; l'équilibre est détruit. On demande de quel côté il faudra ajouter un poids pour rétablir l'équilibre et quel sera ce poids?

Poids spécifique du platine 21; du bois 1,33; de l'acide carbonique rapporté à l'air 1,52. Poids d'un litre d'air 1<sup>Kgr</sup>,29.

39° Trouver le poids que peut soulever un aérostat dont le volume est de 500 mètres cubes et qui est rempli de gaz d'éclairage. La densité de ce gaz rapportée à celle de l'air est 0,75. Le poids d'un litre d'air est 1<sup>Kgr</sup>,29.

40° Une montgolfière, dont le volume est de 250 mètres cubes, est gonflée avec de l'air chaud dont la température est 180°. Elle flotte dans une masse d'air à 0°. Quel poids peut-elle soulever; un litre d'air pèse à 0° 0<sup>Kgr</sup>,03, et le coefficient de dilatation de ce gaz est 0,0037.

---

# LIVRE II

## DE LA CHALEUR

---

### CHAPITRE PREMIER

#### Vaporisation.

Beaucoup de liquides sont dits *volatils* parce qu'ils disparaissent peu à peu, s'ils sont exposés à l'air.

Ils émettent des *vapeurs* qui se forment à leur surface et se dissipent dans l'atmosphère : on dit qu'ils s'évaporent. Tels sont : l'eau, l'alcool, la benzine et aussi certains corps solides, tels que le camphre et l'iode.

Les liquides, convenablement chauffés, arrivent, pour la plupart, à l'*ébullition*. Ils se transforment en vapeurs qui se forment dans l'intérieur de la masse liquide et viennent crever à sa surface.

La production de vapeur porte le nom général de vaporisation. Un liquide *se vaporise* soit qu'il s'évapore, soit qu'il bouille.

Les liquides qui ne s'évaporent pas aux températures ordinaires sont dits être *fixes*.

**Force élastique des vapeurs.** — Les vapeurs sont de véritables gaz. Elles ont, comme un gaz, une tension ou force élastique ; elles peuvent, comme lui, augmenter ou diminuer de volume suivant la pression qu'elles supportent.

On dispose dans une cuvette pleine de mercure plusieurs tubes de Torricelli *a, b, c, d* (*fig. 142*). On introduit à l'aide d'une pipette, dans l'un *a* un peu d'éther, dans le second *b* de

l'alcool, le troisième *c* reçoit de l'eau, et le dernier *d* reste un baromètre parfait.

Les trois liquides montent à la surface du mercure parce que leur poids est plus faible que celui du mercure qu'ils déplacent.

Ils se vaporisent rapidement aussitôt qu'ils sont parvenus dans la chambre barométrique. On s'en aperçoit à la dépression subite de la colonne de mercure. Son niveau s'abaisse et se maintient au-dessous du niveau du baromètre. La distance verticale des deux niveaux mesure la force élastique de la vapeur. Elle reste la même si la température ne change

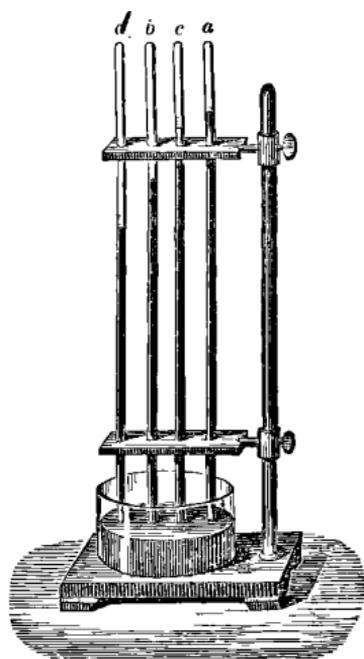


Fig. 142. — Inégalité de tension des vapeurs.

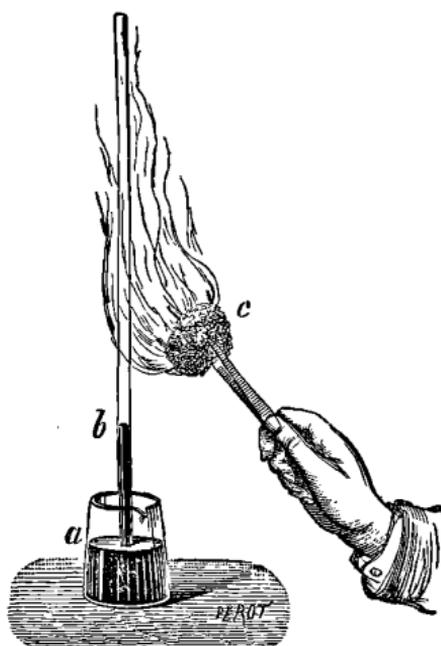


Fig. 143. — Action de la chaleur sur une vapeur.

pas; elle est plus grande pour l'éther, moindre pour l'alcool et plus faible encore pour l'eau.

Des bulles d'air introduites dans un baromètre y produiraient exactement les mêmes dépressions, en vertu de leur force élastique. Nous devons en conclure que les vapeurs ressemblent complètement à l'air sous ce rapport. Leur nature

gazeuse se trouve ainsi démontrée. L'éther bout à  $36^{\circ}$ , l'alcool à  $79^{\circ}$ , l'eau à  $100^{\circ}$ . Ils se trouvent ainsi rangés par ordre de volatilité. Notre expérience nous apprend qu'à la même température les liquides les plus volatils donnent des vapeurs qui ont la plus grande force élastique.

Cette tension augmente si on chauffe le liquide qui produit la vapeur. Promenez une flamme  $e$  (fig. 143) le long du tube à éther  $h$ , vous verrez le mercure s'abaisser de plus en plus à mesure que l'éther et sa vapeur s'échauffent; la force élastique de la vapeur augmente.

Si on plaçait le tube dans un vase plein d'eau à  $36^{\circ}$ , température d'ébullition de l'éther, le niveau intérieur du mercure se trouverait à la hauteur du niveau  $a$  dans la cuvette; la force élastique de l'éther serait d'une atmosphère. Le fait est général.

*Un liquide, chauffé à l'air libre jusqu'à l'ébullition, émet des vapeurs dont la tension est d'une atmosphère.*

**Vapeurs saturantes.** — Un long tube barométrique A (fig. 144) est renversé dans une cuvette profonde Bc pleine de mercure; la hauteur de la colonne soulevée est  $0^m,76$ ; la chambre barométrique est vide. On y introduit une certaine quantité d'éther qui déprime le mercure et en réduit la hauteur à  $0^m,40$ ; la force élastique de la vapeur est  $0^m76 - 0^m,40$  ou  $0^m,36$ . Son volume est  $a'' b''$ . Il reste dans la chambre barométrique un excès de liquide non vaporisé.

Soulevons le tube, ce qui agrandit l'espace  $a' b'$  occupé par la vapeur; la hauteur du mercure ne varie pas et la force élastique reste la même, que le volume devienne double ou triple du volume primitif. La loi de Mariotte est complètement en défaut.

L'effet serait le même si on enfonçait le tube dans la cuvette de manière à diminuer le volume occupé par la vapeur.

Dans le premier cas, lorsqu'on offre à la vapeur un plus grand volume, une portion nouvelle de l'éther liquide se vaporise en quantité telle que le poids de la vapeur soit proportionnel au volume qu'elle occupe. Dans ces conditions la

force élastique ne change pas. La chambre barométrique renferme autant de vapeur qu'elle peut en contenir. On qu'elle est *saturée* de vapeur ; celle-ci est dite *saturante*.

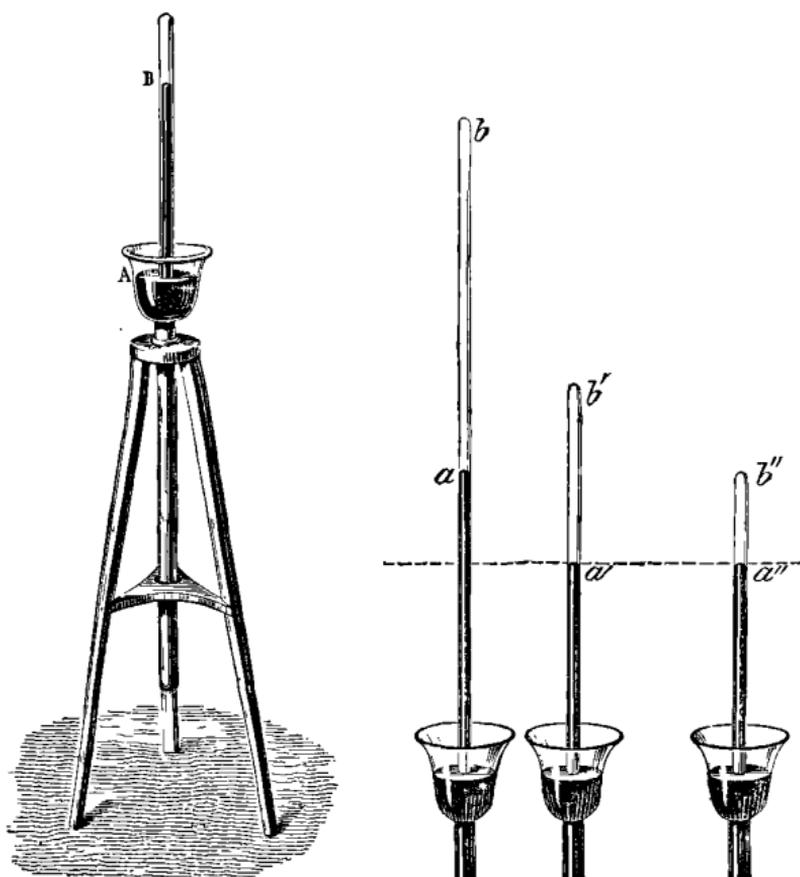


Fig. 144. — Tension maximum des vapeurs.

on diminue son volume, elle se condense en partie et maintient par là la tension invariable.

**Vapeurs non saturantes.** — Si, dans l'expérience précédente, la chambre barométrique devient assez grande pour que tout l'éther liquide soit vaporisé, on a de la *vapeur sèche*.

Soulevons alors le tube et doublons, en  $ab$ , la capacité de la chambre barométrique  $a'b'$ , le niveau du mercure s'élève en même temps et atteint une hauteur de  $0^m,58$ . La tension de

la vapeur est  $0^m,18$ , elle est devenue la moitié de ce qu'elle était.

La vapeur sèche suit alors la loi de Mariotte. Sa force élastique est inversement proportionnelle au volume qu'elle occupe.

Nous devons dire que cette loi se vérifie mal avec les vapeurs, lorsque celles-ci sont dans le voisinage de leur point de liquéfaction. C'est alors une loi approchée ; elle devient d'autant plus exacte qu'on s'éloigne davantage de ce point. Une vapeur ne se distingue plus alors des gaz que nous connaissons.

Pour ceux-ci, la loi de Mariotte n'est pas non plus rigoureusement exacte.

Ainsi 10 000 litres d'air atmosphérique soumis à une pression de 24 atmosphères ont un volume de 414 litres. Il devrait être 416 d'après la loi de Mariotte. L'air se comprime plus qu'il ne devrait le faire ; c'est le contraire pour l'hydrogène.

Ces gaz sont très difficiles à liquéfier et, pour eux, la loi de Mariotte est sensiblement exacte.

Il n'en serait plus de même pour un gaz facilement liquéfiable, comme l'acide carbonique, et la loi ne serait plus qu'approchée.

Ainsi 10 000 litres d'acide carbonique, passant de la pression atmosphérique à la pression de 12 atmosphères, prennent un volume de 754 litres, tandis que la loi de Mariotte leur assignerait le volume de 833 litres.

La chaleur dilate les vapeurs non saturantes comme elle dilate les gaz.

Pour doubler la force élastique d'une vapeur non saturante, il faut élever sa température de  $273^\circ$ .

L'accroissement de tension est beaucoup plus rapide si la vapeur est saturante, en contact avec le liquide générateur. Celui-ci fournit de nouvelles vapeurs à mesure que la température s'élève et c'est ainsi que la force élastique de la vapeur d'eau, qui est d'une atmosphère à  $100^\circ$ , monte à deux atmosphères à  $120^\circ$ .

## FORCES ÉLASTIQUES DE LA VAPEUR D'EAU

|      |                      |      |                   |
|------|----------------------|------|-------------------|
| 0°   | 4 <sup>mm</sup> ,6   | 120° | 1,96 atmosphères. |
| 20°  | 17 <sup>mm</sup> ,3  | 140° | 3,6 —             |
| 40°  | 54 <sup>mm</sup> ,9  | 160° | 6,1 —             |
| 60°  | 148 <sup>mm</sup> ,8 | 180° | 9,9 —             |
| 80°  | 354 <sup>mm</sup> ,6 | 190° | 12,4 —            |
| 100° | 760 <sup>mm</sup> ,0 | 220° | 22,9 —            |

**Condensation.** — Il résulte de ce qui précède que l'on peut déterminer la condensation de la vapeur de deux manières :

1° En réduisant son volume ; si elle n'est pas saturante, elle le devient par cette compression et alors toute compression nouvelle détermine la liquéfaction d'une partie de la vapeur ;

2° En la refroidissant ; une vapeur non saturante que l'on refroidit finit par atteindre la saturation. A partir de là, elle se condense en partie, si le refroidissement est plus intense.

**Liquéfaction des gaz.** — Les gaz sont des vapeurs fort éloignées de leur point de liquéfaction. On peut liquéfier certains d'entre eux sous la pression atmosphérique, en les refroidissant suffisamment : c'est le cas de l'acide *sulfureux* qui traverse un tube refroidi à l'aide d'un mélange de glace et de sel.

Le plus souvent il faut comprimer le gaz refroidi pour le liquéfier. Ce procédé est infaillible et il a permis d'obtenir à l'état liquide tous les gaz connus et, par conséquent, l'air atmosphérique qui est un mélange d'oxygène et d'azote.

**Mélange des gaz et des vapeurs.**

— Un flacon A (*fig. 145*) plein d'air sec est fermé par un bouchon de caoutchouc que traverse un tube ouvert *ab*. Son extrémité inférieure plonge dans du mercure *a*. Ce liquide est

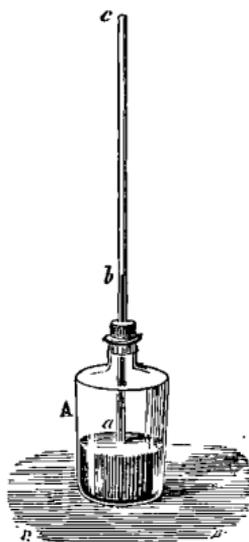


Fig. 145. — Mélange des gaz et des vapeurs.

de niveau dans le flacon et dans le tube. La tension de l'air intérieur est d'une atmosphère.

On verse un peu d'éther dans le tube et, soit en l'inclinant, soit en soufflant légèrement par l'orifice supérieur *c*, on fait passer cet éther dans le flacon, sans y introduire d'air.

L'éther se vaporise lentement ; on le reconnaît à ce que le mercure monte avec lenteur dans le tube *ac*. Il s'arrête au bout d'un certain temps ; il ne se produit plus de vapeur ; l'intérieur du flacon est saturé.

Si on a marqué le niveau primitif du mercure dans le flacon, on reconnaît qu'il s'est un peu abaissé par suite de l'ascension du mercure ; la tension de l'air intérieur a diminué par là même, puisque ce gaz occupe un plus grand volume ; on ramène le niveau à sa première position, en versant un peu de mercure dans le tube *c*. La différence de niveau *ab* du mercure dans le tube et dans le flacon mesure alors la force élastique de la vapeur. On la trouve égale à la dépression que l'éther produirait si on l'introduisait dans la chambre d'un baromètre, la température étant la même dans les deux expériences.

*La tension d'un gaz chargé de vapeurs est égale à la somme de la tension du gaz sec et de la tension de la vapeur, l'une et l'autre étant évaluées comme si chacun des deux gaz existait seul dans le vase qui les contient.*

Concluons qu'un liquide qui se vaporise dans un vase clos émet, pour le saturer, la même quantité de vapeurs, que le vase soit vide ou plein de gaz ; seulement la formation des vapeurs, très rapide dans le vide, est beaucoup plus lente dans un gaz.

## CHAPITRE II

## Formation des vapeurs.

**Évaporation.** — Un liquide s'évapore lorsque les vapeurs se forment à sa surface pour se disséminer dans l'air.

Le poids d'eau qui s'évapore en un temps donné est proportionnel à la surface libre du liquide. C'est pour cela qu'on étend le linge mouillé que l'on veut dessécher.

L'évaporation est surtout active en été. Les chemins, les étoffes se dessèchent rapidement au soleil ; la volatilité de l'eau chaude est plus grande, et il faut un poids de vapeur plus considérable pour saturer un volume déterminé d'air chaud.

Ce même air est à peu près saturé en temps de dégel ou de brouillard, ce qui arrête toute évaporation.

Le vent, surtout un vent sec, active l'évaporation de l'eau ; c'est bien connu ; il emporte les vapeurs à mesure qu'elles se forment et amène constamment de l'air sec à la surface du liquide.

**Ébullition.** — Un liquide bout lorsqu'il se forme dans sa masse, principalement sur les parois des vases, des bulles de vapeur qui viennent crever à la surface.

Faisons chauffer de l'eau dans un ballon de verre ; l'air dissous dans l'eau s'en dégage vers 70° et ses bulles couvrent les parois du vase avant de monter à la surface. Plus tard, des bulles de vapeur se forment au fond du vase ; elles traversent, en s'élevant vers la surface, des couches d'eau plus froides qui les condensent ; la bulle disparaît et les molécules d'eau qui se trouvaient séparées par la vapeur se rapprochent et se choquent. Il en résulte un petit bruit plus ou moins musical ; on dit que *l'eau chante*. Plus tard encore, l'ébulli-

tion s'établit d'une façon permanente, et les bulles de vapeur viennent crever à la surface ; elles ont alors la tension d'une atmosphère.

*Sous la même pression, la température d'ébullition d'un liquide est toujours la même.*

*Elle reste constante pendant toute la durée de l'ébullition.*

Ces deux lois rappellent celles de la fusion.

**Influence de la pression.** — Une bulle de vapeur ne peut se former au fond de l'eau que si sa force élastique est au moins égale à la pression qui s'exerce sur la surface du liquide.

La température d'ébullition doit varier avec la pression. Elle est de  $100^{\circ}$  pour l'eau soumise à la pression de l'atmosphère,  $0^{\text{m}},760$ .

Dans un air raréfié, la température d'ébullition est inférieure à  $100^{\circ}$ .

On place de l'eau tiède sous une cloche reposant sur la platine d'une pompe à air. On fait jouer la pompe ; l'air se raréfie et l'eau se met à bouillir à  $40^{\circ}$  ou  $50^{\circ}$ .

On fait bouillir de l'eau dans un ballon A (fig. 146). La vapeur chasse l'air et remplit entièrement le vase. On le ferme alors avec un bouchon et on le renverse. L'ébullition ne tarde pas à s'arrêter ; mais

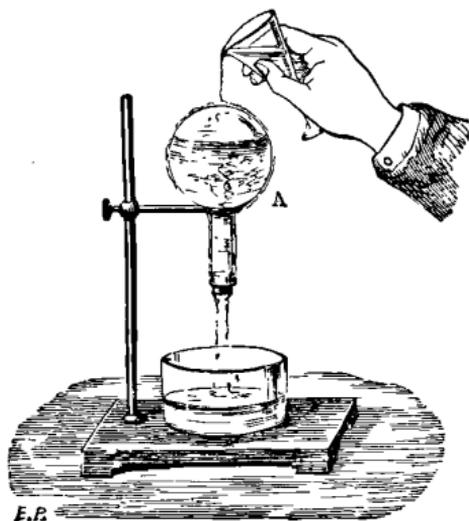


Fig. 146. — Ebullition de l'eau dans le vide.

elle recommence si on verse de l'eau froide sur le ballon.

Qu'arrive-t-il ? Le ballon n'est pas complètement plein d'eau, et au-dessus du liquide se trouve de la vapeur dont la pression empêche l'ébullition.

L'eau froide que l'on verse condense cette vapeur et fait le vide dans le ballon ; de nouvelles bulles de vapeur se forment

aussitôt. Si on cesse de refroidir le ballon, les nouvelles vapeurs l'échauffent et parviennent à saturer l'espace qu'elles occupent ; l'ébullition s'arrête de nouveau.

**Marmite de Papin**<sup>1</sup>. — Cet appareil, imaginé par Papin, il y a deux cents ans, n'a plus qu'un intérêt historique ; mais l'expérience est curieuse et assez simple pour pouvoir être comprise sur une simple description.

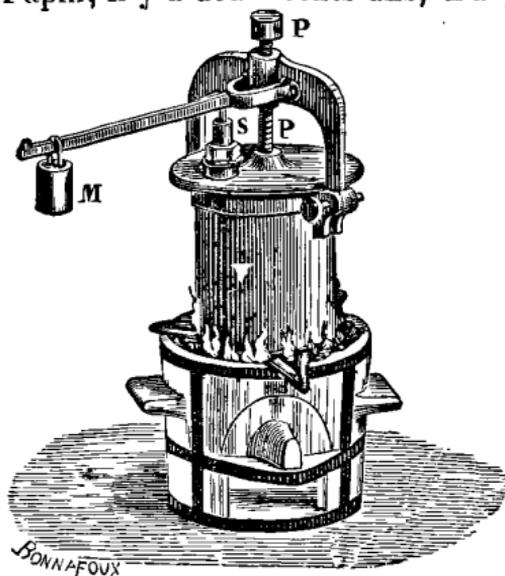


Fig. 147. — Marmite de Papin.

Une marmite de bronze V (fig: 147), à parois épaisses, est fermée par un couvercle que l'on assujettit à l'aide d'une vis P. On y a mis de l'eau et on chauffe la marmite sur un fourneau. Bien que la température s'élève au-dessus de 100°, l'eau n'entre pas en ébullition.

Elle en est empêchée par la tension des vapeurs qui s'accumulent au-dessus de sa surface.

L'expérience peut devenir dangereuse par l'accroissement rapide de la tension de la vapeur ; elle pourrait faire éclater la marmite, malgré sa grande résistance.

On a disposé sur le couvercle une *soupape de sûreté*, comme le faisait Papin. Le couvercle est percé d'un trou que ferme une soupape S, mobile de bas en haut. Un levier horizontal prend son point d'appui sur le support de la vis et est chargé d'un poids M suspendu à son extrémité libre ; il presse sur la soupape et la maintient fermée. C'est comme si on plaçait directement sur la soupape un poids de 2 kilogrammes, par exemple. Si la surface de la soupape est d'un centimètre

1. Denis Papin, né à Blois en 1647, mort en 1724.

carré, on peut dire qu'elle supporte, de haut en bas, une pression de *trois* atmosphères, car la pression de l'air extérieur est elle-même d'un kilogramme sur un centimètre carré. La marmite est fermée tant que la tension de la vapeur intérieure n'atteint pas 3 atmosphères, ce qui suppose une température de l'eau inférieure à 140°. Mais si la température s'élève au-dessus, la pression de la vapeur sur la soupape surpasse la pression extérieure, la soupape se soulève et livre passage à la vapeur ; les chances d'explosion sont écartées.

Si on enlève brusquement le levier, l'eau surchauffée se met à bouillir avec une violence extrême et un puissant jet de vapeur s'échappe de la marmite.

Nous retrouverons les mêmes phénomènes dans les chaudières de machines à vapeur.

La température d'ébullition change avec la nature du liquide quand on opère sous la pression atmosphérique. Nous donnons quelques-unes de ces températures.

| Noms.               | Températures. | Noms.               | Températures. |
|---------------------|---------------|---------------------|---------------|
| Éther sulfurique... | 35°,5         | Acide sulfurique... | 326°          |
| Alcool.....         | 78°,5         | Mercure.....        | 360°          |
| Benzine.....        | 80°           | Soufre.....         | 460°          |
| Eau.....            | 100°          | Zinc.....           | 1060°         |

Les dissolutions salines ont une température d'ébullition supérieure à 100°.

**Constance de la température d'ébullition. —**

L'eau, parvenue à 100°, conserve cette température pendant toute la durée de l'ébullition. Toute la chaleur qu'elle reçoit du foyer sert, non à élever sa température, mais à transformer l'eau en gaz. Il y a une chaleur de *vaporisation* analogue à la chaleur de fusion de la glace.

Un kilogramme d'eau, prise à 0°, exige 100 calories pour s'échauffer à 100°. Mais si on veut la transformer en vapeur ayant également la température de 100°, il faut brûler assez de charbon pour lui fournir 537 calories.

Si on condense ce kilogramme de vapeur à 100°, il fournira

537 calories en se transformant en un kilogramme d'eau à 100°, et si cette eau se refroidit à 0°, elle abandonnera en outre 100 calories.

Cette grande chaleur de vaporisation de l'eau explique pourquoi on emploie si souvent la vapeur d'eau comme moyen de chauffage. Cela se conçoit, si on réfléchit qu'un kilogramme de vapeur d'eau à 100° peut, en se condensant, sans que sa température s'abaisse, porter de 0° à 100° 5<sup>kg</sup>, 37 d'eau froide prise à 0°.

*On veut échauffer à 90° une masse d'eau de 200 kilogrammes prise à 10° en y amenant un courant de vapeur qui s'y condense. — Quel sera le poids de la vapeur employée?*

L'eau doit s'échauffer de 80°, ce qui exige  $200 \times 80$  ou 16 000 calories. Un kilogramme de vapeur à 100° abandonne 537 calories pour se transformer en un kilogramme d'eau à 100° et celle-ci perd encore 10 calories pour se refroidir jusqu'à 90°. La perte par kilogramme est donc 547 calories et le poids cherché est le quotient de 16 000 par 547, ce qui fait en nombre rond 30 kilogrammes. Ce calcul n'est qu'approché, car nous négligeons les parties de chaleur que subira la masse d'eau pendant son échauffement.

**Froid produit par l'évaporation.** — Lorsqu'un liquide s'évapore, sans l'intervention d'une source directe de chaleur, la vapeur prend au liquide même ou aux corps qui l'environnent la chaleur nécessaire à sa formation. De là un refroidissement. La main est refroidie si on la recouvre d'un linge humide. Sa chaleur passe peu à peu dans la vapeur qui se dissémine dans l'air. Le vent active cette évaporation et augmente le refroidissement. De là le danger de rester dans un courant d'air quand on est en sueur.

On fait refroidir les boissons en les plongeant dans un seau d'eau, ou mieux, en recouvrant les bouteilles d'un linge humide et exposé à un courant d'air.

En faisant évaporer rapidement de l'eau dans le vide, on produit un refroidissement assez intense pour congeler une partie de cette eau.

**Distillation.** — Distiller un liquide, c'est le faire bouillir

dans un vase fermé. Les vapeurs s'échappent par un tuyau assez long que l'on maintient froid en l'entourant d'eau froide sans cesse renouvelée. Ce tuyau, roulé en spirale, porte le nom de *serpentin*. Les vapeurs se condensent dans le serpentin en un liquide que l'on recueille dans un vase approprié.

On distille l'eau pour la séparer des matières salines qu'elle tient en dissolution et l'obtenir pure.

On distille le vin, le cidre, qui sont des mélanges d'alcool et d'eau pour séparer ces deux liquides.

L'alcool, étant plus volatil que l'eau, s'échappe tout d'abord dans les vapeurs qui se forment les premières.

Le liquide qui se condense est un mélange plus riche en alcool que le vin lui-même, c'est une eau-de-vie.

**Essai d'un vin.** — Pour trouver la richesse alcoolique d'un vin, on se sert d'un petit *alambic* (fig. 148). On remplit de vin une éprouvette jusqu'au trait *a* gravé sur le verre. Le volume du vin est 50 centimètres cubes. On le verse dans le petit ballon B et on le

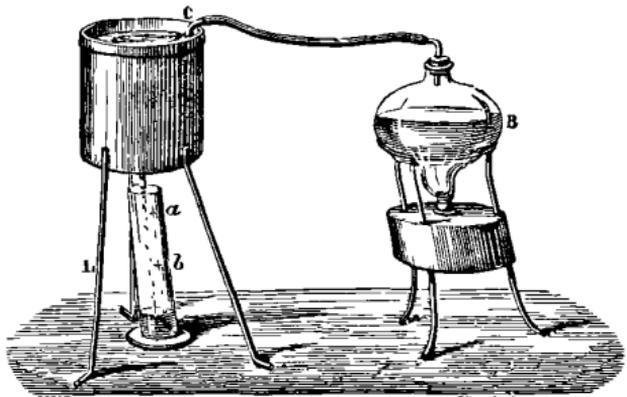


Fig. 148. — Distillation du vin.

porte à l'ébullition. Les vapeurs traversent le serpentin placé dans la cuve *c* pleine d'eau froide, elles s'y condensent et le liquide ainsi formé tombe dans l'éprouvette *c*. On arrête l'opération lorsque le niveau de ce liquide arrive au trait *b* qui correspond à un volume de 25 centimètres cubes. Ce liquide renferme tout l'alcool du vin. On lui ajoute assez d'eau pour ramener le niveau en *a*. Le volume du mélange d'eau et d'alcool est le même que le volume primitif du vin, si on y plonge un alcoomètre, et, si celui-ci s'enfonce dans

le liquide jusqu'à la dixième division, on en conclut que le vin renferme dix litres d'alcool par hectolitre.

---

## CHAPITRE III

### Notions élémentaires sur les machines à vapeur.

Nous n'avons pas à insister sur le rôle important que les machines à vapeur jouent dans l'industrie moderne.

Les organes essentiels d'une telle machine sont : 1° le *générateur* ou la chaudière à vapeur, qui est close comme la marmite de Papin et dans laquelle on fait bouillir de l'eau à une température supérieure à 100°. On produit de la vapeur dont la tension varie de une à huit atmosphères ;

2° La vapeur agit sur un piston qui se meut dans un cylindre ou *corps de pompe*. Elle lui donne un mouvement de va-et-vient qu'on utilise ensuite pour faire tourner des roues, pour soulever des poids, etc. ; c'est l'*organe moteur* de la machine ;

3° La vapeur, après avoir accompli son travail, disparaît dans un espace vide, refroidi, où elle se liquéfie ; c'est le *condenseur* ; ou bien, elle est rejetée dans l'atmosphère ;

4° Un organe spécial, appelé *tiroir*, distribue, au moment convenable, la vapeur au-dessus et au-dessous du piston, et la machine, une fois mise en mouvement, marche d'elle-même.

Puisque nous ne voulons donner qu'une idée des machines à vapeur, sans entrer dans tous les détails qu'une telle étude exige, nous choisirons le type de machine que l'on rencontre le plus souvent : la machine locomotive des chemins de fer, ou la locomobile qui sert dans les exploitations agricoles.

**Chaudières.** — La chaudière d'une machine à vapeur doit être complètement close ; l'eau doit y bouillir sous une pression qui varie de 2 à 8 atmosphères. Elle doit donc

résister à des pressions de 2 à 8 kilogrammes par centimètre carré.

On la fabrique avec des plaques de tôle de fer épaisses, assemblées à l'aide de clous rivés à chaud.

La machine consomme par heure un grand volume et par suite un grand poids de vapeur. Celle-ci ne se forme que sur les parois de la chaudière chauffées directement par le rayonnement du combustible incandescent et par le contact des gaz chauds qui s'échappent du foyer pour se rendre à la cheminée. C'est ce qu'on appelle la *surface de chauffe*. Chaque mètre carré de surface de chauffe produit 15 à 20 kilogrammes de vapeur par heure.

La chaudière d'une locomotive, dont nous donnons un croquis, a été imaginée, vers 1828, par Seguin, ingénieur fran-

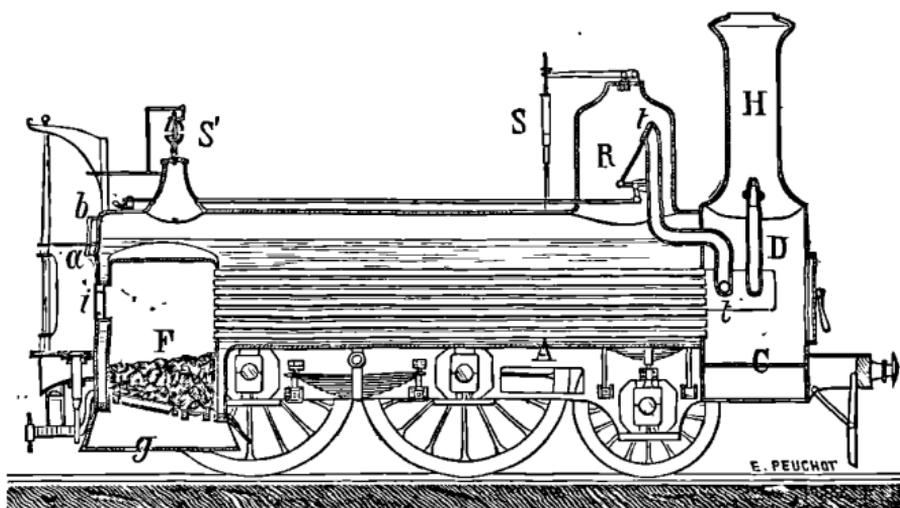


Fig. 149. — Coupe de la chaudière d'une locomotive.

çais. C'est un cylindre A (*fig. 149*) plein d'eau, placé entre le foyer F et la boîte à fumée C. Au-dessus de celle-ci se trouve la cheminée H. Ce cylindre est fermé à l'avant et à l'arrière par deux plaques verticales percées de trous dans lesquels s'engagent des tuyaux de bronze ouverts aux deux bouts et qui font communiquer le foyer F avec la boîte à fumée C.

Le foyer est fermé par une grille *g* sur laquelle on jette le

combustible. L'air nécessaire à la combustion pénètre par cette grille et les gaz qui forment la flamme et la fumée s'engagent dans les tubes qui traversent la chaudière et s'échappent par la cheminée H. Les tubes et une partie du foyer sont complètement entourés par l'eau de la chaudière. Leur surface constitue la surface de chauffe qui, sous un petit volume, est très considérable si le nombre des tubes est porté à 100. La combustion est vive et la chaudière peut fournir l'énorme quantité de vapeur que consomme la locomotive lorsqu'elle est en marche.

Il y a quelques organes essentiels que nous devons signaler. Un manomètre métallique communique avec la chaudière et indique la tension de la vapeur. Des soupapes de sûreté S, S', maintenues fermées par des ressorts, s'ouvrent lorsque la tension dépasse la limite adoptée pour le bon fonctionnement de la machine. Un tube de verre *ab* est mastiqué dans deux tuyaux métalliques qui s'ouvrent l'un en haut dans la partie de la chaudière occupée par la vapeur, l'autre dans la partie qui est recouverte par l'eau. Il est en partie plein d'eau, le niveau est à la hauteur de la surface libre de l'eau dans la chaudière. Le liquide doit toujours recouvrir les parties métalliques qui forment la surface de chauffe, sans cela, ces parties pourraient être portées au rouge, elles perdraient leur ténacité et une explosion serait à craindre.

La vapeur s'accumule dans le réservoir R. Il sort de la chaudière par le tuyau *t*. Un appareil particulier puise l'eau froide dans un réservoir attenant à la locomotive et l'introduit dans la chaudière à chaque coup de piston, de manière à maintenir constante la quantité d'eau que renferme la chaudière.

**Cylindre à vapeur.** — Le cylindre à vapeur est séparé en deux compartiments par un piston métallique mobile qui frotte sur les parois. La tige du piston traverse le couvercle du cylindre et s'engage dans une *boîte à étoupes*.

C'est un tuyau métallique creux *a* (*fig. 150*) que l'on remplit d'étoupes grasses. Elles entourent la tige du piston *t* et

on les comprime fortement à l'aide de la vis *b*. La tige glisse dans cette boîte sans que l'intérieur du cylindre soit mis en communication avec l'air extérieur.

Ici, comme dans toutes les parties de la machine, on recouvre d'huile les surfaces des pièces mobiles, pour diminuer les frottements.

**Tiroir.** — On voit sur la figure (*fig. 151*) une boîte en fonte *G* accolée au corps de pompe, c'est la boîte du tiroir. Quatre tuyaux y aboutissent. L'un *F* amène la vapeur de la chaudière ; l'autre *K* s'ouvre soit au condenseur, soit dans l'atmosphère ; les deux derniers *a*, *b* aboutissent l'un en haut, l'autre en bas du corps de pompe.

La boîte est partagée en deux compartiments distincts par le *tiroir*. C'est une seconde boîte sans fond *mn* qui s'appuie sur le côté *BG* de la première, et qui peut glisser de haut en

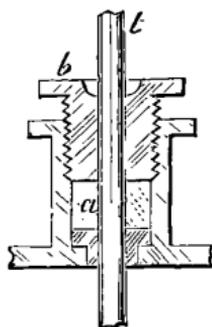


Fig. 150.  
Boîte à étoupes.

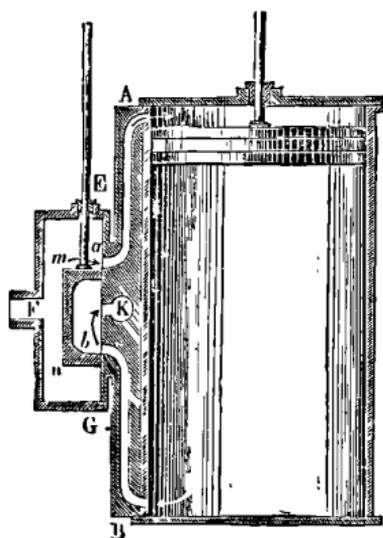


Fig. 151.

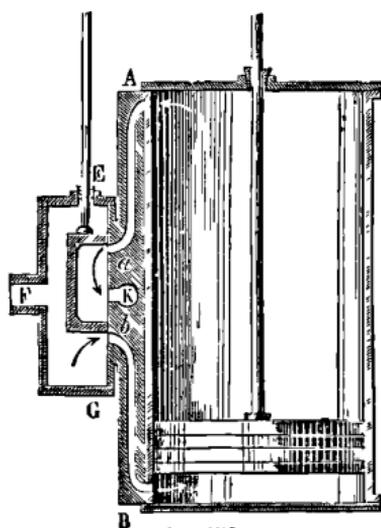


Fig. 152.

Jeu du tiroir.

bas, ou réciproquement ; ce mouvement lui est communiqué par la machine, à l'aide d'une tige qui traverse une boîte à étoupes *E*.

Soit une machine sans condenseur, comme celle d'une locomobile. La chaudière fournit de la vapeur à *quatre* atmosphères et, à la sortie du cylindre, cette vapeur s'échappe dans l'air.

Le piston est au plus haut, et le tiroir à la position de la figure 151. La partie supérieure du corps de pompe communique directement par le tuyau *a* avec la boîte du tiroir et par suite avec la chaudière. La partie inférieure communique par le tuyau *b* avec l'intérieur du tiroir et par suite avec l'atmosphère. La pression est d'une atmosphère au-dessous du piston, et de quatre atmosphères au-dessus. C'est donc sur la surface supérieure du piston une pression effective de 3 kilogrammes par centimètre carré. Si cette surface est d'un décimètre carré ou 100 centimètres carrés, le piston descend comme s'il était chargé d'un poids de 300 kilogrammes. Arrivé au bas de sa course, il s'arrête; mais le tiroir s'est déplacé et se trouve dans la position de la figure 152. Les communications sont interverties; le bas du corps de pompe reçoit par le tuyau *b* la vapeur de la chaudière; le haut communique avec l'air par les tuyaux *a* et *k*. La vapeur s'échappe, et la pression tombe à *une* atmosphère au-dessus du piston, tandis qu'elle monte à *quatre* au-dessous. Le piston monte, comme s'il était poussé de bas en haut par une force de 300 kilogrammes.

Quand il arrive au bout de sa course, le tiroir a repris sa première position et les mêmes mouvements se reproduisent.

**Condenseur.** — Lorsqu'on dispose de grandes masses d'eau froide, comme sur les bateaux à vapeur ou dans certaines usines, on emploie des machines à *condenseur*.

La vapeur qui agit sur le piston et qui sort du tiroir est dirigée dans une caisse vide d'air et constamment refroidie par de l'eau froide, qu'on appelle le *condenseur*. Cette vapeur s'y liquéfie, en échauffant l'eau du condenseur, ce qui nécessite un renouvellement constant de cette eau. L'explication du jeu de la machine n'est modifiée que sur un point: Le piston est soumis à deux pressions: l'une, qui est celle de la vapeur sortant de la chaudière; l'autre, qui est celle de la va-

peur qui reste dans le condenseur et que l'on peut négliger.

La force qui fait mouvoir le piston est ici la pression totale de la vapeur, et non cette pression diminuée d'une atmosphère, comme dans le cas précédent.

On peut employer alors la vapeur à *basse pression*, ce qui diminue l'usure de la machine et les chances d'explosion. La force élastique de la vapeur est alors de 1,5 à 2 atmosphères. Les machines à *haute pression* emploient de la vapeur à 4, 6, 8 atmosphères.

Nous compléterons ces notions élémentaires en décrivant rapidement le mécanisme qui permet de transformer, dans une machine, le mouvement de va-et-vient du piston en un mouvement continu de rotation.

Nous donnons, pour plus de clarté, un dessin qui convient à une machine fixe, mais dont tous les organes se retrouvent dans une locomobile.

**Machine à action directe.** — La machine est solidement établie sur un bâtis en fonte.

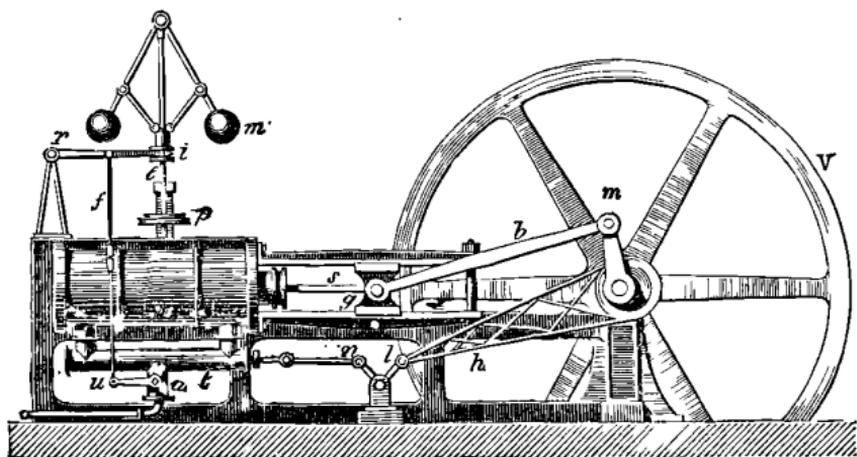


Fig. 153. — Machine à action directe.

La vapeur vient de la chaudière par le tuyau *a* (fig. 153), pénètre dans le tiroir *t*, et passe de là dans le cylindre horizontal *c*.

La tige *s* du piston s'engage dans une glissière. Elle se termine par une pièce métallique *g* dont les faces horizo-

tales glissent sur deux pièces de fonte planes et horizontales. De cette manière, la tige du piston ne peut se courber sous l'effort qu'elle fait pour mettre la machine en mouvement.

Une longue barre de fer, résistante, *b*, appelée la *bielle*, s'articule d'une part au point *g* sur la tige du piston, d'autre part en *m* sur la *manivelle*. Celle-ci est fixée à l'extrémité d'une tige de fer cylindrique horizontale, qui tourne sur des coussinets et qu'on appelle l'*arbre de couche*. Une grande roue en fonte *V*, le *volant*, est ajustée sur cet arbre.

Dans la position de la figure, le piston allant de gauche à droite, sa tige pousse la bielle, qui fait tourner la manivelle et le volant. Lorsque le piston est au bout de sa course, la tige du piston, la bielle et la manivelle sont en ligne droite. On est à un *point mort*, et la machine s'arrêterait forcément, si elle ne dépassait pas ce point.

C'est alors que le volant intervient ; une fois lancé, il ne s'arrête pas et il entraîne dans son mouvement manivelle, bielle et piston ; le point mort est dépassé ; la vapeur peut ensuite agir efficacement sur le piston, elle redonne au volant de nouvelles impulsions et entretient dans toutes les parties de la machine un mouvement sensiblement uniforme.

On voit aussi sur la figure un système de tiges légères *h* qui reçoit de la machine un mouvement de va-et-vient et le communique à la tige du tiroir par l'intermédiaire d'un levier coudé *nl*. Ces tiges sont fixées à un anneau qui entoure un disque porté par l'arbre de couche ; et celui-ci le traverse en un point différent du centre ; c'est ce qu'on appelle un *excentrique*. Son mouvement de rotation suffit pour donner aux tiges *h* un mouvement de va-et-vient alternatif.

Nous avons figuré un *régulateur de vitesse* que l'on retrouve dans les machines locomobiles.

La machine fait tourner sur elle-même une tige verticale *e* ; deux boules pesantes *m* sont reliées à cette tige par des barres métalliques articulées en *J*. Par suite de la rotation, les boules s'écartent de la tige *e* ; l'écart augmente avec la vitesse de rotation de la machine. Les mêmes baguettes

sont reliées par d'autres tiges à un anneau *i* qui glisse sur la barre verticale, s'élevant si la vitesse augmente; s'abaissant, si elle diminue. Cet anneau agit par l'intermédiaire des leviers *ir*, *na*, sur le robinet d'introduction de la vapeur dans le tiroir. Il le ferme, si le mouvement de la machine s'accélère; il l'ouvre, s'il se ralentit. C'est par le jeu de cet organe que la machine a un mouvement sensiblement uniforme. La présence d'un lourd volant favorise, en outre, l'établissement d'un tel mouvement.

Nous donnons une vue d'ensemble d'une locomotive à grande vitesse, et une description succincte des principaux organes.

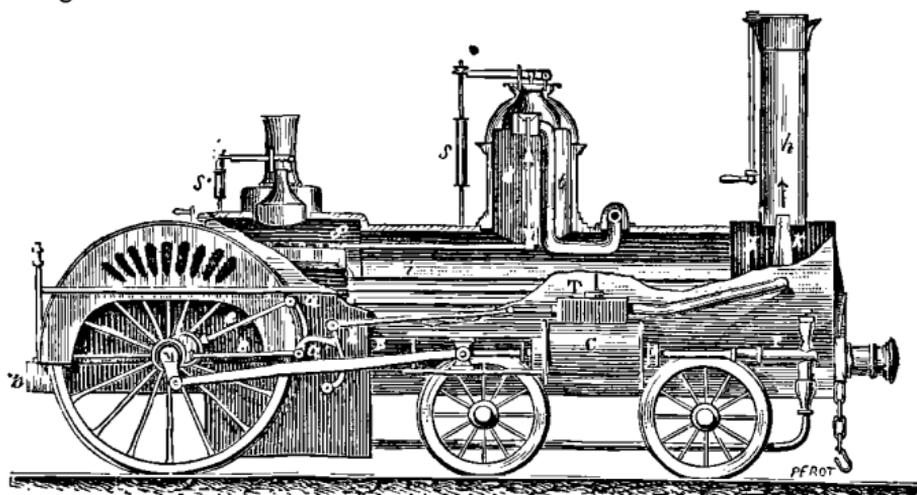


Fig. 154. — Locomotive.

La chaudière (*fig. 154*) repose sur un châssis solide porté par trois paires de roues. Les deux paires situées à l'avant servent à soutenir les châssis; les grandes roues qui sont à l'arrière sont mises en mouvement par l'action de la vapeur; ce sont les *roues motrices* qui, en tournant, font avancer la locomotive sur les rails.

Il y a une machine à action directe de chaque côté de la chaudière. On en voit une sur la figure: le corps de pompe *c* et son tiroir *T*. La tige du piston actionne, à l'aide de la bielle *B*, la manivelle *M* fixée sur l'essieu des roues motrices.

Cet axe porte deux excentriques qui donnent un mouvement de va-et-vient à la tige du tiroir. Le mécanicien fait agir à volonté l'un ou l'autre excentrique sur cette tige et change, par cette manœuvre, la distribution de la vapeur dans les cylindres et, par suite, le sens de la rotation des roues motrices, ce qui lui permet de faire avancer ou reculer la locomotive à sa volonté. Dans le type que nous avons dessiné, la tige du piston fait mouvoir le piston d'une pompe à eau  $p$ , qui puise l'eau dans un réservoir et la refoule dans la chaudière. Dans les locomotives actuelles, l'alimentation de l'eau se fait autrement.

On a supposé enlevée une partie des parois de la chaudière pour faire voir les tubes intérieurs. On voit en  $d$  le dôme qui sert de réservoir de vapeur. Elle se rend dans un tiroir par un tuyau  $t$  fermé par une plaque mobile que le mécanicien fait manœuvrer, à l'aide d'une tige  $f$ , ce qui lui permet de régler la quantité de vapeur qu'il envoie dans les cylindres, et par suite la vitesse de la locomotive. La vapeur qui a agi sur les pistons sort du tiroir par le tuyau  $K$  qui débouche dans la cheminée. De là les bouffées de vapeur qui sortent de celle-ci, lorsque la locomotive est en marche.

---

## CHAPITRE IV

### Vapeur d'eau dans l'atmosphère.

La mer recouvre les trois quarts de la surface terrestre et les continents sont sillonnés par des cours d'eau. L'atmosphère reçoit donc sans cesse de la vapeur d'eau qui provient de l'évaporation superficielle de la grande masse liquide. Cette vapeur est invisible et elle ne trouble la transparence de l'air que lorsqu'elle se condense.

Il est rare que l'air soit saturé d'humidité ; d'un autre côté, il n'est jamais parfaitement sec.

L'humidité de l'air ne dépend pas exclusivement du poids absolu de vapeur d'eau qu'il renferme. Rappelons-nous que, pour saturer un espace d'un mètre cube, il faut le même poids de vapeur, que cet espace soit vide, ou qu'il soit plein d'air.

Ce poids varie avec la température, comme le montre le tableau suivant :

| Température. | Poids de vapeur d'eau. | Température. | Poids de vapeur d'eau. |
|--------------|------------------------|--------------|------------------------|
| 0°           | 4 <sup>gr</sup> ,88.   | 20°          | 17 <sup>gr</sup> ,02.  |
| 5°           | 7 <sup>gr</sup> ,03.   | 25°          | 26 <sup>gr</sup> ,70.  |
| 10°          | 10 <sup>gr</sup> ,50.  | 30°          | 30 <sup>gr</sup> ,10.  |
| 15°          | 12 <sup>gr</sup> ,70.  | 35°          | 39 <sup>gr</sup> ,10.  |

D'après ces nombres, un mètre cube d'air, contenant 10<sup>gr</sup>,5 de vapeur d'eau, peut, suivant les circonstances, être très sec ou très humide.

La température de cet air est, par exemple, de 30°, il faudrait 30 grammes de vapeur d'eau pour saturer le mètre cube ; il n'en contient que 10 grammes, le tiers environ. Nous conviendrons de dire que son *degré d'humidité* est  $\frac{1}{3}$ . C'est le *quotient du poids d'eau qu'il renferme par celui qui serait nécessaire pour le saturer*.

Supposons que cet air se refroidisse, et que sa température s'abaisse à 10° ; le poids de vapeur qu'il renferme l'amène à la saturation ; son degré d'humidité est égal à l'unité.

Poussons plus loin le refroidissement : la température est 5°, 7 grammes d'eau suffisent pour le saturer ; il en renferme 10<sup>gr</sup>,5, il faut nécessairement que 3<sup>gr</sup>,5 de vapeur reprennent la forme liquide. Elle se déposera sous forme de rosée ou bien il se formera un brouillard composé de très petites gouttelettes d'eau tenues en suspension dans l'air et qui en troublent la transparence.

On s'explique ainsi pourquoi une carafe pleine d'eau fraîche se recouvre d'une buée qui lui enlève toute transparence lorsqu'on l'apporte dans une salle chaude. L'air humide qui touche les parois de la carafe se refroidit et est bientôt

sursaturé ; une partie de sa vapeur se liquéfie en gouttelettes très fines qui se déposent sur le verre.

Les substances animales ou végétales changent de forme et de dimension, lorsque l'humidité de l'air varie. On colle sur une planchette des feuilles de papier humide ; elles se tendent parfaitement en se desséchant. Le bois se gonfle si on le mouille. Les meubles fabriqués avec du bois humide durent peu ; les planches se contractent par la dessiccation, elles se contournent ou se disjoignent.

Une planche se courbe si on frotte l'une de ses faces avec une éponge mouillée, tandis qu'on chauffe l'autre face. Les tonneliers n'emploient pas d'autre procédé pour courber les douves d'un tonneau.

Une corde se tord et se raccourcit si on la mouille.

On peut faire éclater une bouteille en y mettant des haricots secs, achevant de la remplir avec de l'eau et la bouchant solidement ; et cela, par suite de l'augmentation de volume qu'éprouvent les haricots en présence de l'eau.

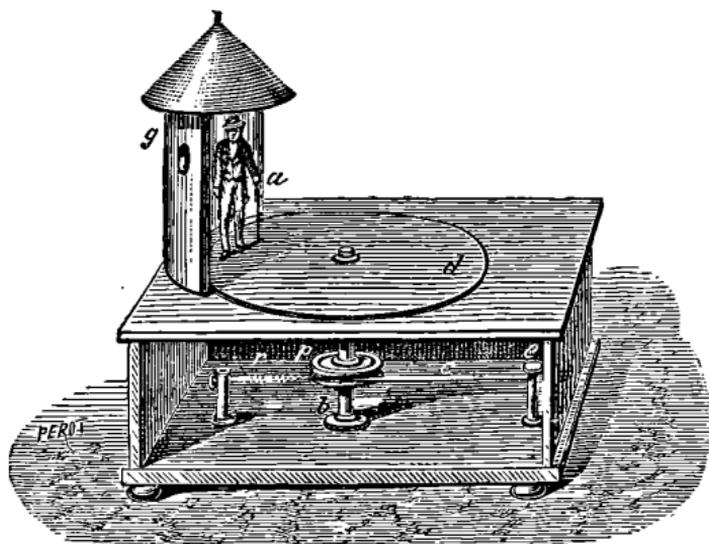


Fig. 155. — Hygroscope.

**Hygroscope.** — Une figurine *a* (fig. 155) est portée par un disque *d* mobile autour d'un axe vertical *b* sur lequel se

trouve également une poulie *p*. Une corde de violon très fine *c* s'enroule sur la poulie et s'attache au point *e* ; un petit ressort *r* tire la poulie en sens inverse et tend la corde. La figurine est, par un temps sec, en dehors d'une petite guérite *g*. Si l'air devient humide, la corde se raccourcit, ce qui fait tourner la poulie et la figurine rentre dans la guérite.

Les chances de pluie augmentent avec l'humidité de l'air ; On consulte ces instruments pour savoir si la pluie est probable ; mais leurs indications sont incertaines, et il est prudent de ne pas s'y fier.

**Brouillard.** — Ce que nous venons de dire permet d'expliquer certains phénomènes atmosphériques que tout le monde a pu observer.

A la fin de l'été ou en automne, on voit, le soir, les herbes d'une prairie se recouvrir de rosée ; il se forme parfois un brouillard épais de quelques décimètres et qu'on appelle le *serein*.

C'est que, pendant le jour, l'air, échauffé par le soleil, a reçu un poids de vapeur d'eau assez grand, mais qui n'est pas suffisant pour le saturer. Au coucher du soleil, la température baisse beaucoup ; il ne peut plus garder cette grande masse de vapeur et elle se condense en partie, dans le voisinage du sol, la terre et les herbes qui la recouvrent se refroidissant plus rapidement que l'air.

Le refroidissement du sol et de l'air dure toute la nuit. Il est le plus grand possible un peu avant le lever du soleil ; il s'étend alors à une assez grande distance du sol. L'effet dont nous venons de parler se produit, pourvu que l'air soit très humide ; il laisse une partie de sa vapeur se condenser sur place, en fines gouttelettes qui flottent dans l'atmosphère. Sa transparence est détruite et il se forme des *brumes* ou un vrai *brouillard*.

Il disparaît souvent dans la matinée, lorsque la lumière solaire parvient à le percer et que sa chaleur fait évaporer les gouttelettes liquides qui le forment.

Après une gelée prolongée, les vents chauds et humides qui viennent de la mer se mêlent à l'air froid qui recouvrait une

région. La température s'abaisse et un brouillard épais en est la conséquence. La vapeur se condense à la surface de tous les objets froids qu'elle rencontre, on nage dans l'humidité.

Des brouillards locaux se forment en automne sur un étang, sur une rivière. Ils ont pour analogue le petit nuage qui apparaît au-dessus de nos mets chauds, ou celui qui sort de la cheminée d'une locomotive.

L'eau de la rivière est plus chaude que l'air qui la recouvre : elle produit plus de vapeur qu'il n'en faut pour le saturer ; une portion de cette vapeur se condense et forme un brouillard qui envahit la vallée au fond de laquelle se trouve le cours d'eau.

**Nuages.** — Les nuages se forment sur la mer et, pour la plus grande partie de la France, ils nous sont amenés par les vents du sud-ouest. Ce sont, par contraste avec les vents d'est, des courants d'air humide.

Une évaporation active se fait à la surface des mers, surtout entre les tropiques, là où la température est élevée.

La vapeur, moins dense que l'air, s'élève avec l'air chaud et son volume augmente à mesure qu'elle s'éloigne du sol. Cela suffit pour qu'elle se condense en partie, sur place, sous forme de brouillards. Ces brouillards ont une immense étendue. Ils troublent la transparence de l'air et nous cachent le soleil ; ce sont des *nuages*. Ils persistent longtemps, car les gouttelettes d'eau, très fines, qui les composent, tombent avec une lenteur extrême et le moindre courant d'air ascendant les relève.

**Pluie.** — Lorsqu'un nuage se refroidit, les gouttelettes qui le composent se rapprochent, se réunissent et grossissent, la *pluie* tombe.

On se sert d'un *pluviomètre* pour mesurer la quantité de pluie qui tombe en un même lieu.

Un entonnoir métallique *a* (*fig. 156*) exposé librement à l'air reçoit la pluie et la verse dans un cylindre *b*, dont la section est *dix fois* moins grande que l'ouverture

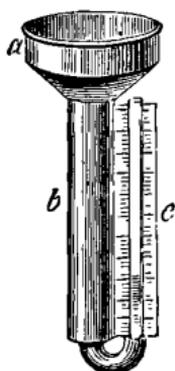


Fig. 156.  
Pluviomètre.

terminale de l'entonnoir. Un tube en verre *c*, recourbé, ouvert en haut, est scellé dans le fond du cylindre et est appliqué contre une règle divisée en millimètres. On peut, après chaque averse, observer le nombre de millimètres dont s'est élevé le niveau de l'eau recueillie dans le cylindre. Ce nombre, divisé par *dix*, donne l'épaisseur de la couche d'eau que la pluie formerait sur un sol horizontal imperméable, s'il n'y avait pas d'évaporation, ou encore le nombre de litres d'eau reçus par une surface d'un mètre carré.

La quantité annuelle de pluie varie d'un lieu à l'autre ; à Paris, elle est de 0<sup>m</sup>,568. Sur les côtes de Bretagne, elle peut atteindre 0<sup>m</sup>,900. A Calcutta et à la Havane, elle dépasse 2 mètres.

Une portion de l'eau pluviale coule à la surface, une autre s'infiltré dans le sol. Elle alimente les puits et surtout les cours d'eau.

Une partie s'évapore, ou bien elle est reprise par les racines des végétaux.

Les pluies sont surtout abondantes dans les pays de montagnes. Elles tombent dans les vallées sous forme d'eau. Mais la pluie se transforme en neige, lorsque les nuages sont très élevés et celle-ci s'accumule alors sur les crêtes des chaînes de montagnes. Elle y forme les glaciers qui, en fondant, produisent des torrents, et plus tard, des fleuves. Les plus grands fleuves et leurs affluents descendent des flancs des montagnes.

**Verglas.** — La pluie qui tombe à la fin d'une gelée sur un sol fortement refroidi s'y congèle et recouvre le sol d'une couche uniforme de glace ; c'est le *verglas*. Nous glissons sur un sol glacé, comme nous pouvons le faire sur un parquet, parce que le pied qui repose à terre n'y trouve plus un frottement assez grand pour prendre un point d'appui et rester en place ; lorsque le corps reçoit une impulsion qui le porte en avant, le pied glisse lui-même en arrière et détermine une chute.

Pour la même raison, les roues d'une locomotive n'ont plus d'adhérence sur des rails recouverts de verglas, et tournent sur place sans avancer.

**Grésil.** — Bien souvent, dans les giboulées de février ou de mars, les gouttelettes de pluie se congèlent avant d'atteindre le sol ; elles tombent sous forme de glaçons sphériques, opaques ou transparents ; c'est le *grésil*.

**Neige.** — La condensation des nuages dans un air froid amène la formation de la neige qui tombe en flocons. Parfois, la neige est nettement cristallisée et présente la forme d'étoiles à six branches très régulières.

**Grêle.** — La grêle est encore de l'eau congelée, plus abondante en été et accompagnant les orages. Sa formation n'est pas encore bien expliquée ; elle se rattache aux phénomènes d'électricité atmosphérique. Les grêlons atteignent parfois d'énormes dimensions.

La chute de la grêle est toujours de courte durée, mais elle produit de grands désastres dans la campagne, en hachant les plantes et détruisant les récoltes en quelques minutes.

**Rosée.** — La rosée couvre l'herbe et les feuilles dans les matinées de printemps et d'automne. Elle s'y présente sous forme de gouttelettes d'eau.

Elle survient dans les nuits sereines ; il n'y a eu ni nuages, ni brouillards, ni pluie ; on a cru longtemps qu'elle tombait du ciel. On sait maintenant qu'elle se forme sur place, comme les gouttelettes d'eau qui couvrent une carafe pleine d'eau froide et placée dans un air humide. Comment les feuilles se sont-elles assez refroidies pour condenser la vapeur d'eau qui existe dans l'air ?

Cela peut s'expliquer, si on se rappelle que les corps qui recouvrent la terre sont chauds, c'est-à-dire renferment de la chaleur qu'ils perdent, sans cesse, par rayonnement. Un corps lumineux, une flamme, rayonne à l'entour de la lumière ; il en est de même d'un corps chaud.

Pendant le jour, la terre et les corps qui la recouvrent reçoivent, du soleil, une ample provision de chaleur qui compense, et au delà, la perte qu'ils font par rayonnement. Si le soleil ne brille pas, il y a un échange de chaleur entre la terre et les nuages qui couvrent le ciel, et, si la terre ne s'échauffe pas, elle ne se refroidit pas beaucoup.

Il n'en est plus de même la nuit, lorsqu'il n'y a pas de nuages et que les étoiles brillent de tout leur éclat. La terre et les plantes perdent leur chaleur par rayonnement; les étoiles, bien que ce soient des soleils comparables au nôtre, sont trop loin pour échauffer la terre. Il y a donc un refroidissement que l'on sent après le coucher du soleil et qui augmente pendant toute la nuit. De là un abaissement continu de la température, qui persiste jusqu'au lever du soleil.

Le refroidissement passe, par contact, des corps terrestres à l'air environnant et détermine une condensation partielle de la vapeur d'eau disséminée dans l'air. Telle est l'origine de la rosée.

Remarquez que les feuilles présentant une large surface au rayonnement, ayant peu de poids, sont dans les meilleures conditions pour se refroidir. Un corps métallique, une boule polie perdrait, en comparaison, peu de chaleur et ne se recouvrirait pas de rosée.

L'on peut empêcher ce dépôt de rosée en tendant au-dessus de l'herbe un abri léger, une toile soutenue par quatre piquets. Cette toile va se refroidir par rayonnement, mais ce n'en est pas moins un corps chaud qui reçoit la chaleur rayonnée par l'herbe, qui lui en renvoie et modère son refroidissement. La rosée se déposera sur la toile, mais non sur l'herbe.

L'influence des nuages est la même. Ils forment abri et, modérant le refroidissement de la terre, ils empêchent la production de la rosée. Pour la même raison, on n'en trouve pas sur l'herbe qu'abrite un arbre ou un mur.

Le vent favorise l'évaporation de l'eau et peut faire disparaître la rosée. Enfin, on n'en voit pas dans un air très sec comme celui de l'hiver.

**Gelée blanche.** — Au printemps, en automne, par des nuits sereines, dans un ciel calme, le refroidissement nocturne peut être assez grand pour que la température des plantes ou du sol s'abaisse au-dessous de zéro. Alors la rosée se congèle sur les toits et sur les herbes; on a une *gelée blanche*. Elle

produit des effets désastreux, en détruisant les jeunes bourgeons ou les fruits.

Elle est plus à craindre que les gelées continues de janvier. A cette époque, la végétation est arrêtée, tandis qu'à la fin de mars ou d'avril elle est en pleine activité ; les bourgeons, les jeunes tiges sont gorgés de sucs, ils se congèlent et détruisent les tissus délicats qui les renferment.

La gelée blanche est à craindre lorsque le ciel est débarrassé de nuages et que les étoiles ou la lune brillent de tout leur éclat. Aussi a-t-on, de bonne heure, attribué aux rayons de la lune les malheurs causés par les gelées blanches ; on appelait *lune rousse* la lunaison de la fin d'avril ou du commencement de mai.

On avait réussi à préserver de la gelée les arbres en espaliers en les recouvrant d'un paillason qui, pensait-on, arrêtait les rayons malfaisants de la lune. Le remède était bon, mais le paillason agit ici comme abri. Il se refroidit par rayonnement, mais il envoie en même temps de sa chaleur à la plante et compense en partie la perte qu'elle fait elle-même.

Les Romains préservaient leurs champs de la gelée blanche, en brûlant des broussailles et produisant ainsi un nuage de fumée qui formait abri.

Le procédé est bon et peut être employé lorsque l'on voit, le matin, un peu avant le lever du soleil le thermomètre atteindre zéro.

### RÉSUMÉ ET EXERCICES

**Une vapeur éloignée de son point de saturation a les propriétés des gaz.** — Elle suit la loi de Mariotte, et la loi de dilatation des gaz. On l'amène à la saturation en la comprimant progressivement à température constante la tension augmente alors jusqu'à un certain maximum qu'elle ne peut dépasser), — ou en abaissant sa température sans changer son volume.

La vapeur saturante a pour chaque température une tension constante indépendante du volume qu'elle occupe. Elle se liquéfie partiellement si on diminue son volume ou si on la refroidit.

La densité d'une vapeur est le rapport de son poids à celui d'une

masse d'air qui aurait le volume, la température et la tension de la vapeur.

Le poids de vapeur qui remplit un vase est le même, que ce vase soit vide ou plein d'air. Il en est de même de la force élastique. La force élastique du mélange d'un gaz et d'une vapeur égale la somme des forces élastiques du gaz sec et de la vapeur.

Un liquide entre en ébullition lorsque la tension de sa vapeur est égale à celle du gaz ou de la vapeur qui est au-dessus de lui. Si le liquide est dans un vase clos, cette tension croît rapidement à mesure que la température s'élève et elle est employée utilement comme force dans les machines à vapeur.

1° Un volume de 18 litres d'air saturé d'humidité est à la température de 30°; la force élastique du mélange est 0<sup>m</sup>,760, celle de la vapeur 0<sup>m</sup>,031. On réduit à 7 litres le volume du mélange. Quelle sera sa nouvelle force élastique?

R. Il faut chercher ce que devient après la compression la force élastique de l'air sec et lui ajouter celle de la vapeur qui reste invariable.

2° Que pèsent 100 litres de vapeur d'eau formée à 100° sous la pression de 0,760. La densité de la vapeur est 0,62.

R. Chercher le poids de 100 litres d'air pris à 100° avec la tension de 0,760 et multiplier le poids par 0,62.

3° Combien faut-il de grammes de vapeur d'eau pour saturer un espace d'un mètre cube dont la température est 20°? La tension de la vapeur est 0<sup>m</sup>,017 et la densité rapportée à l'air 0,62.

4° On refroidit progressivement une masse d'air de 3 mètres cubes renfermant 0<sup>kg</sup>,36 de vapeur. Cette vapeur est-elle saturante et quel est le degré d'humidité de l'air? Si on refroidit cet air, à quelle température sera-t-il saturé? Si on pousse le refroidissement jusqu'à 10°, quel sera le poids de la vapeur qui se condensera?

Consulter pour résoudre cette question le tableau de la page 205.

5° La soupape d'une chaudière à vapeur a pour base un cercle de 0<sup>m</sup>,025 de rayon. La vapeur doit atteindre dans l'intérieur de la chaudière une pression de 7 atmosphères. De quel poids faut-il charger la soupape pour pouvoir atteindre cette pression?

6° Un marteau pilon pèse 6 000 kilogrammes, il est attaché au piston d'une machine à vapeur sans condenseur, la section droite du corps de pompe est un cercle de 0<sup>m</sup>,21 de rayon. Quelle doit être la tension de la vapeur pour que le piston soulève le marteau?

7° On fait arriver 5 kilogrammes de vapeur d'eau à 100° dans 40 kilogrammes d'eau à 10°. La vapeur se condense en abandonnant 537 calories et se mélange à l'eau qu'elle chauffe. Quelle sera la température finale du mélange?

R. Pour échauffer 40 kilogrammes d'eau de 0 à 10°, il a fallu  $40 \times 10$  ou 400 calories. — Pour transformer 5 kilogrammes d'eau à 0° en 5 kilogrammes de vapeur à 100°, il a fallu échauffer ce poids d'eau à 100°, ce qui exige 500 calories; il faut transformer l'eau à 100° en vapeur à 100°, ce qui exige  $537 \times 5 = 2685$  calories; en tout 3185 calories. Ajoutons-y les 400 calories relatives à l'eau froide, nous aurons 3585 calories à partager entre 45 kilogrammes d'eau, ce qui donne 75 calories par kilogramme ou la chaleur nécessaire pour

échauffer chaque kilogramme à  $75^{\circ}$ . Telle est la température du mélange.

8° Combien faudrait-il de kilogrammes de vapeur d'eau prise à  $100^{\circ}$  pour faire fondre 1 mètre cube de glace à  $0^{\circ}$ . Le poids spécifique de la glace est 0,93. La chaleur de fusion 80 calories. — Chaleur de vaporisation 537 calories, température finale de l'eau en fusion  $0^{\circ}$ .

9° Une grande cuve en bois renferme 4 hectolitres d'eau à  $4^{\circ}$ . On veut porter la température de l'eau à  $80^{\circ}$  en y faisant arriver un courant de vapeur d'eau à  $100^{\circ}$  qui s'y condense. Quel poids de vapeur sera nécessaire, en supposant qu'il n'y ait pas de déperdition de chaleur? La chaleur de condensation de la vapeur est 537 calories.

10° On introduit dans une chaudière de l'eau à  $0^{\circ}$ , elle y est chauffée par la combustion de la houille qu'on brûle dans le foyer et s'échappe à l'état de vapeur à  $100^{\circ}$ . Quel est le poids de houille nécessaire pour transformer en vapeur une tonne métrique d'eau froide. Un kilogramme de houille produit en brûlant 7000 calories, mais pour des causes diverses un tiers de cette chaleur se perd en dehors de la chaudière.



---

# LIVRE III

## ÉLECTRICITÉ

---

### CHAPITRE PREMIER

#### Phénomènes généraux.

##### **Production d'électricité par frottement. —**

Certains corps ont la propriété d'attirer les corps légers lorsqu'ils ont été frottés avec une étoffe de laine; tels sont le verre, l'ébonite (caoutchouc durci), la cire à cacheter. On les approche de petits fragments de papier ou de barbe de plume: ceux-ci se soulèvent et se portent vers le corps frotté.

Une balle faite avec de la moelle de sureau (*fig. 157*) est suspendue par un fil de cocon à une tige de verre recourbée; on en approche le corps frotté, qui attire aussitôt la balle. Cette propriété avait été reconnue dans l'*ambre*, qui est une résine fossile, par Thalès, philosophe grec qui vivait il y a deux mille cinq cents ans. Le nom grec de l'*ambre* a fait donner le nom d'*électricité* à la cause inconnue de cette attraction; les corps frottés sont dits *électrisés*.

Aux corps que nous avons cités comme pouvant s'électriser, nous pouvons ajouter la soie, la gomme laque, la résine, le soufre et bien d'autres; les métaux et les corps humides ne semblent pas s'électriser par frottement.

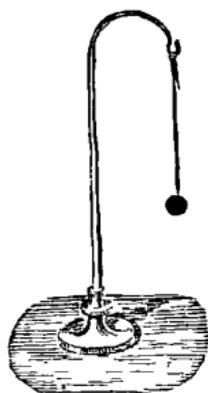


Fig. 157.  
Pendule électrique.

**Corps bons et mauvais conducteurs.** — Une tige de laiton suspendue dans l'air par des fils de soie peut en chacun de ses points attirer des corps légers si on la met, par une de ses extrémités, en contact avec un bâton de verre que l'on frotte. La propriété électrique se transmet dans le métal d'une extrémité à l'autre, quelle que soit sa longueur.

L'expérience ne réussit plus, si on remplace la tige de laiton par un tube de verre bien sec.

Nous ne connaissons pas du tout la nature de l'électricité. Si on s'imagine que c'est quelque chose qui puisse passer d'un corps à l'autre, se propager dans un corps, comme le fait la chaleur dans un métal, nous donnerons, par analogie, le nom de corps *bons conducteurs* de l'électricité à ceux qui transmettent l'électricité, comme une tige de laiton.

Si le corps oppose à l'électricité une résistance qui l'arrête, nous dirons qu'il est *mauvais conducteur*. En général, les métaux transmettent facilement la chaleur et l'électricité, et on trouve des substances comme le verre, l'air sec, qui sont à la fois mauvais conducteurs de l'une et de l'autre.

On peut ranger tous les corps en une série continue qui commence à l'argent et finit à l'air, sans que l'on puisse dire où s'arrête la liste des corps conducteurs, et où commence celle des corps qui ne le sont pas.

Les expériences faites par Gray, en 1722, nous ont appris qu'un métal, tel qu'une tige de laiton, peut bien être électrisé par son contact avec un corps frotté s'il est suspendu par des fils de soie; mais non, si on le soutient avec des fils de fer.

Un corps métallique électrisé, comme le conducteur d'une machine électrique, conserve son électricité si on le touche avec le verre, l'ébonite, la soie, corps mauvais conducteurs. Il perd tout signe d'électricité si on le touche avec un métal que l'on tient à la main, ou si on le met en communication avec la terre par une chaîne métallique.

Lorsqu'on approche le doigt du conducteur électrisé, d'une machine, on en tire une étincelle, ce qui la désélectrise. L'expérience réussit encore, si on tient une clef à la main, l'éтин-

celle ne jaillit plus, le conducteur n'est plus désélectrisé si l'on remplace la clef par un bâton de verre.

**Corps isolants.** — Un métal électrisé ne conserve son électricité que si on le sépare du sol par un corps mauvais conducteur appelé pour cela un corps *isolant*.

Veut-on électriser le corps humain? on fait monter une personne sur un tabouret dont les pieds sont en verre. Elle touche le conducteur d'une machine électrique; de toutes les parties de son corps on peut tirer des étincelles, en en approchant la main. Les cheveux se hérissent, surtout si une personne place sa main au-dessus de la tête de celle qui est électrisée. C'est que l'attraction électrique est réciproque et qu'un corps électrisé mobile se porte de lui-même vers un autre corps qui ne l'est pas.

On démontre qu'une tige métallique peut s'électriser par le frottement si elle est isolée du sol par un manche en verre ou d'ébonite. L'électricité développée par le frottement ne peut plus se perdre dans le sol, comme elle faisait lorsqu'on tenait directement la tige avec la main.

On peut donc dire que deux corps différents, quels qu'ils soient, s'électrisent par leur frottement mutuel.

**Distinction de deux états électriques.** — On prend deux bâtons de cire à cacheter, et on les électrise en les frottant l'un et l'autre avec une étoffe de laine. L'un *ab* (*fig. 158*) est suspendu à un support *l* à l'aide d'une chape de papier et d'un fil de soie, on approche l'autre *e* tenu à la main, en mettant en présence les parties frottées; elles s'éloignent l'une de l'autre, ce qui indique qu'elles se repoussent. Si on substitue au bâton de cire *e* un bâton de verre frotté avec la laine, l'aiguille mobile est aussitôt attirée.

On peut donner une autre forme à l'expérience.

Un bâton de verre électrisé *c* (*fig. 159*) est approché d'un pendule électrique *b*, il attire la boule jusqu'au contact, il l'électrise alors et la repousse.

Un second pendule *a* est électrisé de la même manière avec un bâton de cire à cacheter ou d'ébonite frotté avec de

la laine. On en approche le bâton de verre *c*, la boule *a* est

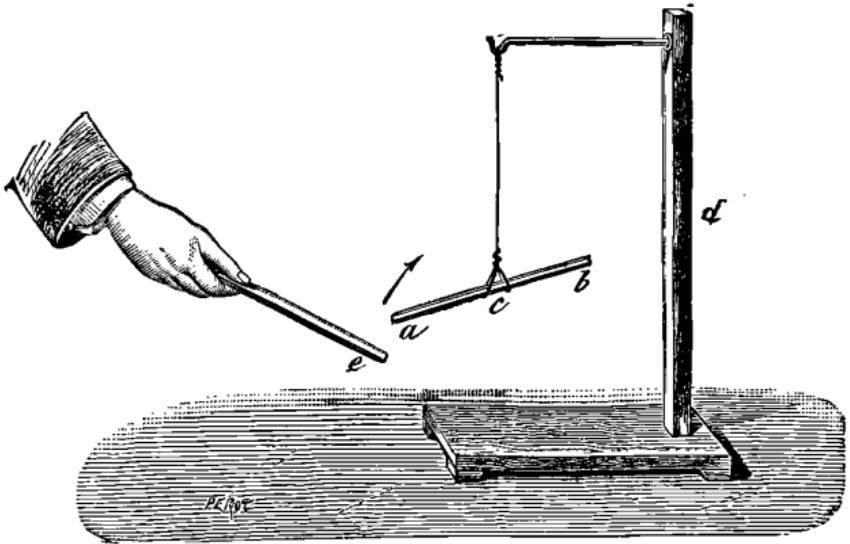


Fig. 158. — Distinction des deux espèces d'électricité.

attirée. Le verre attire les corps électrisés avec la cire et repousse ceux qu'il a électrisés par son contact. Le bâton de cire repousse la balle *a*, et attire la balle *b* électrisée par le verre.

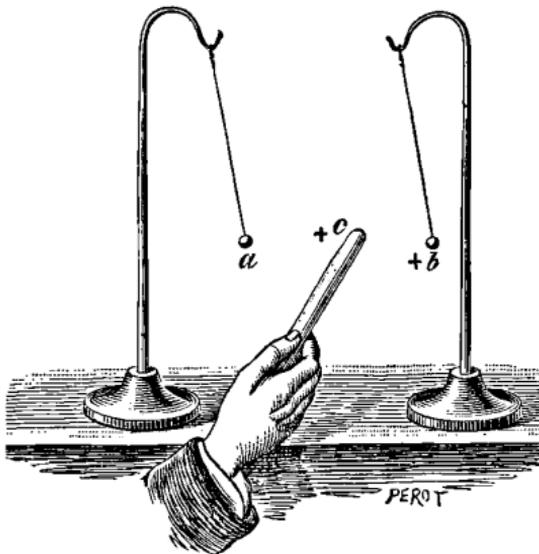


Fig. 159.  
Action d'un corps électrisé sur un pendule.

Les deux boules *a* et *b* s'attirent; elles se repoussent si elles ont été l'une et l'autre électrisées avec le même corps, verre ou ébonite.

Les corps électrisés sont dans deux états différents : celui du verre d'une part; celui de l'ébonite de l'autre; les deux corps étant frottés avec la laine.

On dit, pour abrégé, qu'il y a deux électricités.

On les désigne, en France, par les dénominations d'*électricité positive* qui convient au verre; d'*électricité négative* qui convient à l'ébonite ou à la cire à cacheter, la résine, frottées avec une peau de chat.

*Deux électricités de même nom se repoussent, et deux électricités de nom contraire s'attirent.*

Lorsque deux boules sont électrisées; l'une *a*, positivement; l'autre *b*, négativement, et qu'elles arrivent au contact, elles perdent en tout ou en partie leurs propriétés électriques.

On fait disparaître l'électricité positive d'un corps, en le chargeant en outre d'électricité négative et réciproquement.

On dit que les électricités de nom contraire se neutralisent, on ajoute que les deux charges positive et négative sont égales si la neutralisation est complète.

On désigne, sur un dessin, la place des électricités contraires par les signes  $+$ ,  $-$ , auxquels il ne faut attribuer aucune signification arithmétique.

**Développement des deux électricités.** — L'une des électricités ne se développe jamais sans que l'autre apparaisse en quantité égale.

On frotte un bâton de cire à cacheter *b* avec un petit bonnet de soie *a* (*fig. 160*), terminé par un fil de soie *c*. On approche d'un pendule électrique, ce bâton, ainsi coiffé il ne se produit aucun mouvement.

Le bonnet *a* est alors enlevé à l'aide du fil *e* et on reconnaît qu'il est électrisé, ainsi que la cire, car l'un et l'autre attirent le pendule.

Si celui-ci a été, au préalable, électrisé positivement, la soie

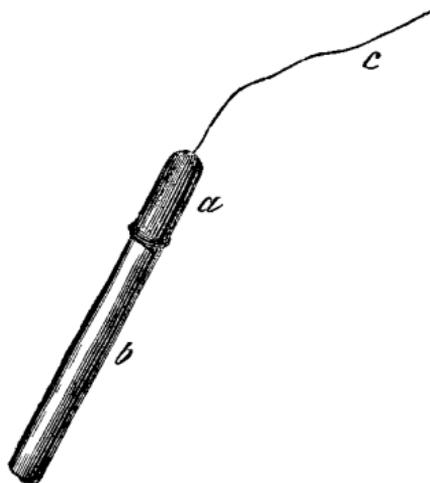


Fig. 160. — Expérience de Faraday.



maintient pas à la surface de celle-ci : elle pénètre peu à peu dans son intérieur.

**Déperdition de l'électricité.** — Un corps conducteur isolé que l'on électrise ne conserve pas son électricité ; au bout d'un certain temps, il est revenu, comme l'on dit, à son état naturel ; il est désélectrisé.

L'air qui le touche s'électrise à ses dépens et lui enlève une partie de sa charge. La perte est encore plus grande le long des corps isolants qui le soutiennent. Si c'est du verre, ce support se recouvre, dans un air humide, d'une couche d'eau imperceptible, qui livre passage à l'électricité du corps et l'amène jusqu'au sol, où elle se perd.

On atténue ce défaut du verre en le recouvrant de vernis à la gomme laque et surtout en frottant légèrement les supports avec un linge chaud pour les dessécher.

**Pouvoir des pointes.** — Les corps conducteurs conservent plus longtemps l'électricité quand on écarte de leur forme les arêtes, les pointes et que leurs contours sont arrondis comme dans le cylindre et la sphère.

L'électricité se perd rapidement par les pointes.

Une tige effilée en pointe isolée, et mise en communication avec une machine électrique, laisse échapper l'électricité qu'elle en reçoit. Elle électrise l'air placé devant elle, le repousse, et produit une sorte de souffle ou de vent, que l'on rend sensible de la manière suivante :

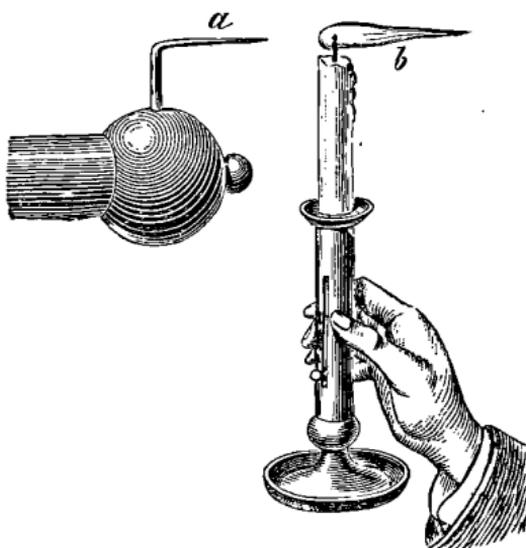


Fig. 162. — Effet des pointes.

La pointe *a* (fig. 162), recourbée horizontalement, repose sur le cylindre électrisé d'une machine.

A quelque distance, se trouve la flamme d'une bougie *b*. On la voit se courber, comme elle le ferait sous l'action d'un courant d'air venu de la pointe, et même elle peut s'éteindre.

**Tourniquet électrique.** — Comme les actions électriques sont réciproques, l'air électrisé par une pointe la repousse à son tour.

On forme un petit tourniquet (*fig. 163*) à l'aide de quatre à six fils de laiton, taillés en pointe et recourbés à leurs extrémités, tous dans le même sens. Ils sont soudés à une chape que l'on pose sur une tige effilée verticale, communiquant avec le conducteur d'une machine électrique. Lorsque la machine est en action, on voit le petit appareil tourner en sens inverse de l'écoulement de l'électricité.

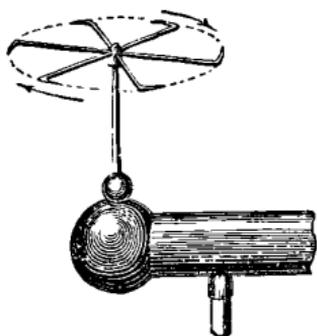


Fig. 163.  
Tourniquet électrique.

De jolies aigrettes lumineuses se forment à chacune des pointes et sont visibles, si l'on se trouve dans une salle complètement obscure ; elles rendent manifeste l'écoulement électrique.

## CHAPITRE II

### Electrisation par influence.

Tout corps qui se trouve dans le voisinage d'un corps électrisé, présente des signes d'électricité, bien que celle-ci ne puisse passer de l'un à l'autre sous forme d'étincelles. On dit que ce corps est électrisé par *l'influence* du second.

Soit un corps isolé *A* (*fig. 164*) qui reçoit l'électricité d'une machine électrique. Il porte un couple de pendules à fil de lin, qui divergent lorsque le corps est électrisé. Nous

supposons l'électricité positive ; un bâton de verre frotté avec la laine repousse les pendules.

Dans le voisinage, se trouve un cylindre conducteur BC soutenu par des fils de soie ou supporté par un pied de verre. On a placé, de distance en distance, des couples de pendules à fil de lin. En présence du corps électrisé A, on voit diverger les balles de sureau des pendules placés aux extrémités B,C du cylindre : rien de semblable ne se produit au milieu D. C'est donc aux deux bouts, seulement, que l'on trouve, sur le cylindre, des signes d'électricité.

Ces signes disparaissent si on éloigne la sphère ; les pendules divergent de nouveau à son approche.

Présentons aux pendules un bâton de verre électrisé positivement ; il attire visiblement les pendules B et repousse ceux qui sont en C.

Le cylindre présente donc l'électricité de même nature que celle du corps influençant A, à son extrémité la plus éloignée, et l'électricité de nom contraire, à l'extrémité la plus rapprochée de ce corps. Le milieu du cylindre n'est pas électrisé. Approchons de plus en plus le cylindre de la sphère. La divergence des pendules B,C augmente. Il arrive un moment où l'on voit jaillir un trait de feu, une *étincelle* entre les deux corps ; après quoi, les pendules de A divergent moins, la sphère a perdu une partie de son électricité positive ; les pendules de B ne divergent plus ; le cylindre a perdu son électricité négative : les pendules de C divergent toujours, le cylindre est là électrisé positivement et il emporte sa charge si on l'éloigne de la sphère.

Ne dirait-on pas que la portion d'électricité positive qui a

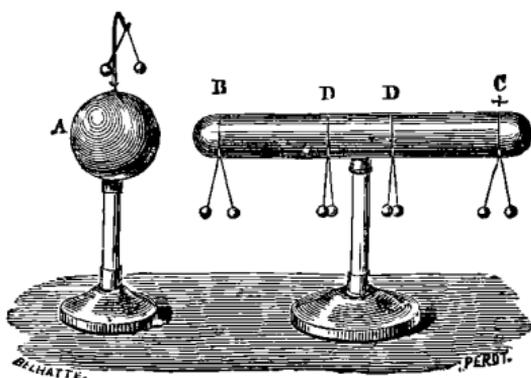


Fig. 164. — Electrification par influence.

disparu sur la sphère A, a passé sur le cylindre, sous forme d'étincelle et se trouve actuellement en C.

Cette manière de parler abrège le discours, mais ne rend pas compte de ce fait que l'électricité positive se trouvait sur le cylindre, à l'extrémité *c*, avant que l'étincelle eût jailli. A ce moment, la sphère n'avait rien perdu de sa charge.

Que sont donc devenues l'électricité positive de la sphère A, l'électricité négative du cylindre B, qui ont disparu ?

On dit qu'elles se sont neutralisées mutuellement. Il en est résulté une étincelle qui a traversé l'air.

On dit que de cette réunion des deux électricités de nom contraire, résulte une électricité *neutre* qui existe dans tous les corps. Il suffirait de l'approche d'un corps électrisé positivement pour attirer l'électricité négative, repousser la positive et décomposer momentanément l'électricité neutre.

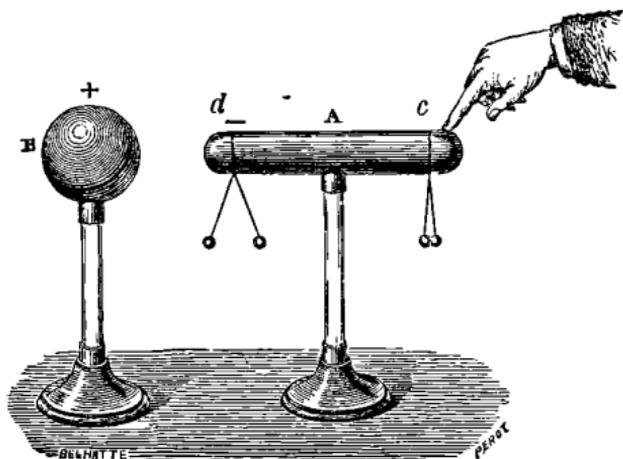


Fig. 165. — Electrisation par influence. Cylindre non isolé.

Ce n'est pas une explication véritable.

Nous ne faisons que traduire dans ce langage les faits d'influence que nous venons d'observer.

Reprenons les choses comme elles étaient au début ; la sphère B (*fig. 165*), électrisée positivement, le cylindre *cd* présentant à ses deux extrémités des états électriques opposés.

Mettons le cylindre en communication avec le sol en le

touchant du doigt. L'électricité positive, qui est en *c*, disparaît aussitôt et les pendules qui s'y trouvent cessent de diverger ; les pendules négatifs de *a* divergent encore. Le cylindre reste chargé d'électricité négative et la conserve, si on l'éloigne de la sphère.

C'est là un moyen souvent employé, d'obtenir un corps électrisé négativement à l'aide d'un corps positif.

Voici l'explication de cette expérience. Le corps influencé, lorsqu'on le touche du doigt, n'est plus simplement le cylindre ; mais aussi la personne qui le touche et la terre. L'électricité positive, que l'influence de la sphère développe, s'en éloigne le plus possible et se retrouverait sur la terre, si les grandes dimensions de celle-ci ne la rendaient pas insensible.

**Électroscopes.** — On donne le nom d'*électroscopes* aux appareils qui permettent de reconnaître si un corps est électrisé et quelle est la nature de son électricité. A ce point de vue, le pendule électrique est le plus simple des électroscopes.

L'*électroscope à feuilles d'or* est un appareil plus sensible.



Fig. 166.  
Electroscopes à feuilles d'or.



Fig. 167.

Deux feuilles d'or battu, ou, à leur défaut, deux brins d'herbe sèche, très légers, sont suspendus à une tige métallique, de telle sorte qu'ils puissent s'écarter librement. La tige traverse la tubulure d'une petite cloche de verre (*fig. 166*)

et elle se termine au dehors par une boule. On la fixe dans la tubulure à l'aide d'un bouchon d'ébonite ou de paraffine, corps très mauvais conducteurs de l'électricité.

La partie supérieure de la cloche est vernie à la gomme laque, le verre est desséché avec soin.

On approche du bouton B un bâton de verre électrisé ; les feuilles d'or divergent. Elles sont électrisées positivement ; on le reconnaîtrait, en approchant en même temps un second bâton de verre électrisé du milieu de la cloche, les feuilles d'or seraient repoussées.

Si on retire le verre A, les feuilles retombent et tout signe d'électrisation disparaît.

On remet en place le bâton A et on touche en même temps le bouton avec le doigt. Les feuilles d'or retombent et perdent leur électricité.

Retirons le doigt et puis le corps électrisé A, on voit les feuilles diverger de nouveau, parce qu'elles reçoivent du bouton l'électricité négative qui s'y trouvait, elles sont donc cette fois électrisées en sens contraire du corps influençant, c'est-à-dire négativement.

Veut-on reconnaître avec cet appareil ainsi chargé la nature de l'électricité d'un corps. On l'approche du bouton de l'électroscope (*fig. 167*) et l'on voit les feuilles d'or s'écarter davantage l'une de l'autre, ou, au contraire, se rapprocher.

Dans le premier cas, le corps est électrisé négativement. Son approche développe, par influence, de l'électricité positive dans le bouton et de l'électricité négative dans les feuilles ; ce qui augmente leur charge primitive et détermine une plus grande divergence. Si le corps est électrisé positivement, il développe de l'électricité négative dans le bouton, et l'électricité positive repoussée dans les feuilles les désélectrise, elles redeviennent verticales. Si on approche davantage le corps, il se développe une nouvelle quantité d'électricité positive dans les feuilles et on les voit diverger de nouveau. Il faut faire les choses lentement, si on veut observer le double mouvement des feuilles.

Ce petit appareil, facile à construire, peut très bien servir à

reconnaître les phénomènes de l'électrisation par influence, si on n'a à sa disposition ni machine ni cylindre isolé.

**Électrophore.** — L'électrophore peut remplacer, jusqu'à un certain point, une machine électrique.

Il est facile à construire. On se procure une feuille d'ébonite et on la fixe sur une planchette AB (fig. 168). On a, d'autre part, un disque de bois, que l'on recouvre de feuilles d'étain CD et qui est muni d'un manche de verre isolant.

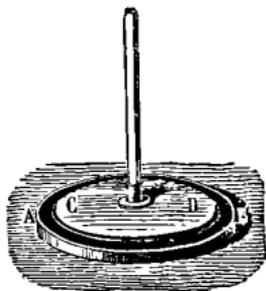


Fig. 168. — Electrophore

On électrise l'ébonite en la frottant avec une étoffe de laine ; son électricité est négative. On pose dessus le disque CD. Il s'électrise par influence : positivement, sur sa face inférieure ; négativement, sur sa face supérieure ; par suite, il se désélectrifierait, si on l'éloignait du plateau AB.

Mais si on le touche du doigt pendant qu'il se trouve sur ce plateau, on enlève l'électricité négative, ce qui détermine la production d'une petite étincelle.

Enlevons alors le plateau à l'aide de son manche isolant ; l'électricité positive, qui couvrait la face inférieure, se répand sur les deux faces, et on peut, en approchant le doigt, tirer une nouvelle étincelle.

Si on voulait vérifier ces deux états successifs du plateau, on pourrait se servir de l'électroscope à feuilles d'or.

On fixe au bout d'un tube de verre un bouton sphérique de cuivre. On touche avec ce bouton le plateau de l'électrophore et on approche le bouton de l'électroscope, déjà chargé d'électricité. On reconnaît que le bouton est négatif, s'il touche le plateau CD avant le contact du doigt ; et positif, s'il touche le plateau après qu'on l'a soulevé.

L'ébonite conserve longtemps son électricité. On peut renouveler plusieurs fois la manœuvre précédente et tirer du plateau CD un grand nombre d'étincelles successives.

**Machine électrique.** — Nous décrivons la machine imaginée par Ramsden, il y a cent ans, parce qu'elle est plus

facile à expliquer que les machines modernes. Cependant, il vaudrait mieux introduire, dans une école, les machines de Voss ou de Wimshurst, moins coûteuses et d'un usage bien plus facile.

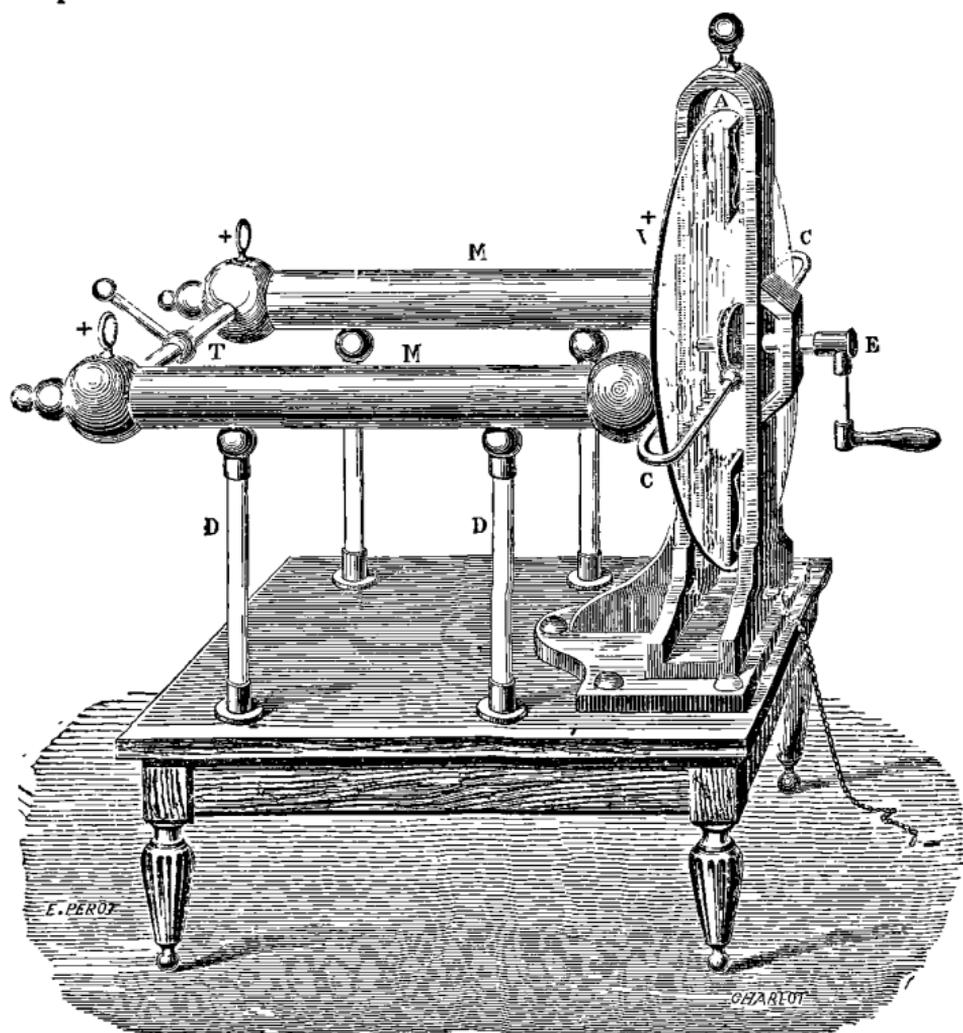


Fig. 169. — Machine électrique.

Un plateau de verre V (*fig. 169*) tourne verticalement autour d'un axe qui traverse deux montants et se termine par une manivelle E.

Deux paires de coussins de cuir, rembourrés de crin, A,

fixés aux montants, s'appuient sur le plateau et le frottent quand il tourne ; il s'électrise alors positivement.

On dispose vis-à-vis du plateau des cylindres métalliques M, isolés par des pieds de verre D et réunis entre eux par une traverse T. Chacun d'eux est terminé par une pièce de cuivre c, recourbée en U, qui entoure le plateau. La surface intérieure de ces *mâchoires* est garnie de pointes effilées. Les cylindres M sont les condenseurs de la machine. L'influence du plateau électrisé positivement détermine la production d'électricité positive sur la partie la plus éloignée du conducteur M, et d'électricité négative sur les mâchoires. Celle-ci s'écoule, par les pointes, sur le plateau de verre ; elle le désélectrise complètement. Il faut qu'il passe de nouveau entre les coussins pour reprendre une nouvelle charge.

Les coussins sont recouverts d'un sulfure d'étain appelé *or mussif* ; ils communiquent avec le sol par une chaîne métallique, afin de perdre promptement l'électricité négative qu'ils acquièrent par le frottement.

La machine ne fonctionne bien que dans un air sec, et lorsqu'on a desséché avec des étoffes chaudes les supports et le plateau de verre.

La charge des conducteurs cesse de s'accroître lorsque la déperdition absorbe toute l'électricité que l'influence du plateau peut produire. Ces déperditions se font en partie dans l'air et en partie par les pieds de verre qui sont des isolants imparfaits.

## CHAPITRE III

### Effets de l'électricité.

**Mouvement des corps légers.** — Une balle de sureau, placée à une certaine distance d'un corps électrisé positivement, s'électrise négativement dans la partie de sa surface la plus voisine du corps, et positivement, dans la

partie la plus éloignée. L'attraction des électricités contraires, qui sont en regard, l'entraîne vers le corps électrisé ; il y a contact, perte de l'électricité négative ; il ne reste plus sur les deux corps que de l'électricité positive. De là une répulsion qui éloigne la boule du corps électrisé et qui ne cesse que si on désélectrise cette boule en la faisant communiquer avec le sol. Elle est alors attirée de nouveau.

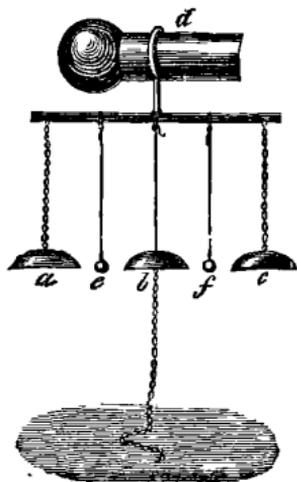


Fig. 170.  
Carillon électrique.

**Carillon électrique.** — Une lame métallique, accrochée au conducteur *d* (fig. 170) d'une machine, supporte trois timbres *a*, *b*, *c*, placés sur une ligne horizontale. Deux boules métalliques, *e*, *f*, sont, ainsi que le timbre du milieu, suspendues à la lame par des fils de soie. Le timbre du milieu communique avec le sol par une chaîne métallique. Ce sont également des chaînes conductrices qui réunissent les timbres *a*, *c* à la lame électrisée.

des chaînes conductrices qui réunissent les timbres *a*, *c* à la

Lorsque la machine est en action, les pendules *e-f* sont attirés par les timbres électrisés *a*, *c*, ils les touchent, sont repoussés et viennent perdre leur électricité sur le timbre du milieu. Ils sont alors attirés de nouveau, et prennent ainsi un mouvement de va-et-vient.

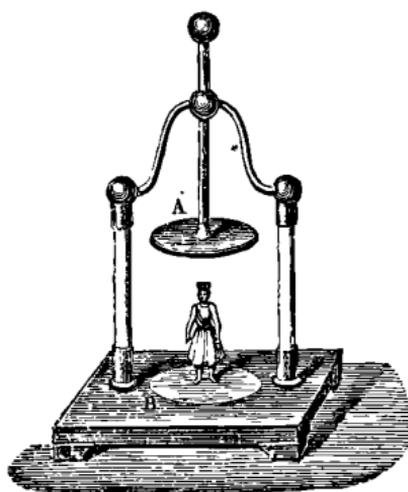


Fig. 171. — Danse des pantins.

Les chocs multipliés des boules sur les timbres produisent un carillon qui persiste, tant que la machine est en action.

**Danse des pantins.** — On donne une autre forme à la même expérience.

On place, l'un au-dessus de l'autre, deux plateaux métalliques A, B (*fig. 171*) ; l'un, B, est en communication avec le sol ; l'autre, A, est isolé et électrisé à l'aide d'une machine.

Entre eux, se trouve une figurine en moelle de sureau. Elle est alternativement attirée et repoussée par le plateau électrisé A, et elle prend, entre les deux plateaux, un mouvement de va-et-vient qui simule une danse.

**Étincelles.** — On ne peut approcher le doigt du conducteur d'une machine en action sans en tirer une étincelle. On entend, en même temps, un bruit particulier et l'on ressent une petite commotion. L'étincelle est un trait lumineux, d'un blanc bleuâtre, qui jaillit entre le conducteur et le doigt.

Il est tantôt rectiligne, le plus souvent en zigzag, comme l'éclair auquel on l'a comparé dès le début.

La longueur d'une étincelle indique que la charge du conducteur a une grande *tension* ; c'est-à-dire possède à un haut degré la faculté de vaincre la résistance que les corps mauvais conducteurs, tels que l'air, opposent au mouvement de l'électricité.

**Tube étincelant.** — Dans l'intérieur d'un tube de verre, on colle de petits morceaux d'étain taillés en losange. On les dispose en spirale autour du tube, en ayant soin de laisser un petit espace entre deux losanges consécutifs.



Fig. 172. — Tube étincelant.

La spirale aboutit à deux garnitures métalliques (*fig. 172*). On en tient une à la main et on approche l'autre du conducteur d'une machine électrique. A chaque décharge, il se produit une étincelle à chaque interruption de la bande d'étain. Ces étincelles, qui semblent simultanées, forment autour du tube une jolie spirale lumineuse, si on la regarde dans l'obscurité.

**Lumière dans l'air raréfié.** — On trouve dans le

commerce des tubes de verre dans lesquels on a fait le vide, un vide imparfait. Deux fils de platine sont soudés dans le verre. Ils pénètrent dans le tube et se terminent en dehors par un anneau (*fig. 173*). On met l'un d'eux en communication avec le sol, l'autre est relié par un fil métallique avec une boule isolée voisine du conducteur de la machine. Chaque étincelle qui jaillit de celui-ci sur la boule, illumine l'intérieur du tube d'une lumière rosée qui a l'aspect de la figure (*fig. 173*).

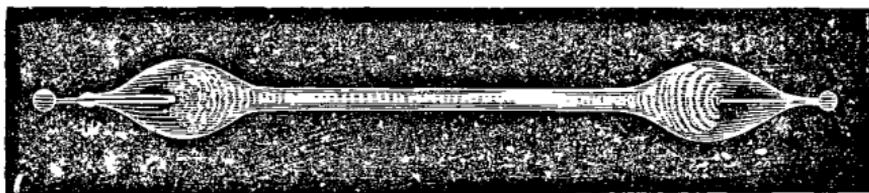


Fig. 173. — Tube de Geissler.

Cette expérience nous apprend que l'électricité traverse facilement, et sur une grande longueur, un espace occupé par de l'air fortement raréfié.

Nous devons ajouter que cette transmission deviendrait impossible dans un tube absolument vide d'air.

**Inflammation de l'éther.** — L'étincelle peut, comme une flamme, produire des effets de chaleur. On verse un peu d'éther dans une cuiller de métal que l'on tient à la main ; on l'approche du conducteur d'une machine pour en tirer des étincelles ; la vapeur d'éther, mêlée à l'air, s'enflamme aussitôt.

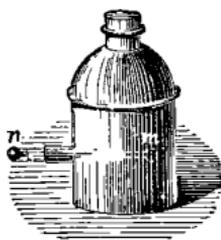


Fig. 174.  
Pistolet de Volta.

**Pistolet de Volta.** — Un petit vase de fer-blanc porte une tubulure latérale dans laquelle est mastiqué un tube de verre. Un fil de laiton terminé au dehors par une boule ou un anneau *n* (*fig. 174*), le traverse et s'arrête en *m*, très près de la paroi métallique du vase.

On fait arriver dans ce vase un peu d'hydrogène qui se mélange avec l'air. Le vase est ensuite fermé par un bou-

chon ; on le tient à la main et on fait jaillir une étincelle entre le conducteur d'une machine et la boule *n*. Une seconde étincelle se produit en *m*, à l'intérieur du vase ; elle enflamme le mélange gazeux et détermine une explosion qui lance le bouchon en l'air.

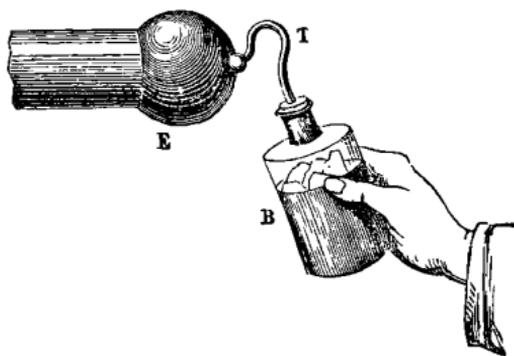
**Tension électrique**<sup>1</sup>. — Une machine électrique peut donner de longues étincelles, lorsqu'elle est en bon état et que l'air est sec ; on dit que l'électricité qui s'y trouve a une grande *tension*, en entendant par là la propriété qu'elle possède de vaincre la résistance de l'air qui s'oppose à son écoulement. La tension est d'autant plus faible que l'étincelle est plus courte.

Si deux corps électrisés sont réunis par un fil conducteur, il y a écoulement d'électricité du corps qui a la plus forte tension au corps qui a la plus faible, en particulier du corps électrisé positivement au corps négatif.

La différence des tensions détermine l'écoulement de l'électricité et constitue ce qu'on appelle la force *électro-motrice* ; de même que, si deux réservoirs pleins d'eau sont unis par un canal, la différence des deux niveaux détermine l'écoulement de l'eau qui va du niveau le plus élevé vers le niveau le plus bas.

**Bouteille de Leyde.** — La bouteille de Leyde est ainsi nommée parce qu'on en fit, la première fois, l'expérience à Leyde, en 1746.

On choisit un flacon d'un verre bien isolant ; on le remplit de feuilles minces de clinquant. Des feuilles d'étain sont collées sur la surface extérieure. Le bouchon qui ferme le goulot est traversé par une tige de laiton *T* (*fig. 175*),



**Fig. 175.** — Bouteille de Leyde.

<sup>1</sup>. Dans la science moderne, on donne le nom de *potentiel* à ce que nous appelons *tension*.

terminée par une boule et plongeant à l'intérieur du flacon, dans les feuilles de clinquant.

Lorsqu'on construit une bouteille de Leyde avec un bocal à large goulot, on colle simplement des feuilles d'étain sur les surfaces intérieure et extérieure du verre ; la feuille intérieure, qui remplace les feuilles de clinquant, est l'*armature intérieure*, tandis que la seconde feuille d'étain est l'*armature extérieure* de la bouteille.

En un mot, deux corps conducteurs, séparés par une lame de verre, forment un appareil en tout semblable, pour ses effets, à la bouteille de Leyde.

Pour charger la bouteille B, on la tient à la main et on touche avec le bouton le conducteur E d'une machine.

Si ce conducteur est muni d'un pendule électrique servant d'électroscope, on remarque, qu'en l'absence de la bouteille, un tour de roue suffit pour donner au pendule son plus grand écart et au conducteur sa plus grande charge.

Il n'en est plus ainsi lorsque la bouteille est en contact avec le conducteur ; il faut multiplier le nombre des tours de roue pour que le pendule se soulève et atteigne l'écart le plus grand. L'électricité produite par la machine pendant tout ce temps se trouve emmagasinée, en quelque sorte, dans la bouteille. De là le nom de *condensateur* qu'on lui a donné.

Vient-on à toucher avec la main le bouton d'une bouteille chargée, on voit jaillir une étincelle grosse, courte, sonore, et on ressent une violente commotion dans les poignets, les bras et la poitrine.

Cette commotion, ressentie la première fois par les physiiciens de Leyde, les effraya beaucoup et fit plus tard le succès de la bouteille de Leyde.

Si plusieurs personnes, se tenant par la main, forment une chaîne, et si la première tient la bouteille chargée, tandis que la dernière touche le bouton, la commotion est ressentie par toutes les personnes de la file.

On décharge la bouteille de Leyde sans ressentir de commotion, en réunissant l'armature extérieure B au bouton, par

un corps bon conducteur, un fil ou une chaîne métallique. On peut se servir d'un arc métallique formé de deux parties mobiles autour du point C (*fig. 176*) ; on le tient à l'aide de manches de verre *m*. L'une des boules est amenée au contact de l'armature extérieure et on approche la seconde du bouton de la bouteille, de manière à provoquer une étincelle.

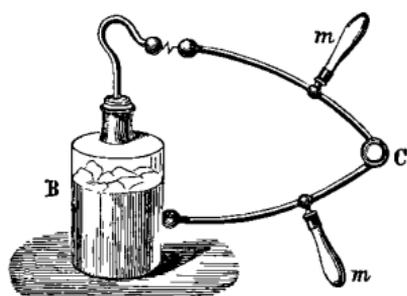


Fig. 176. — Décharge brusque.

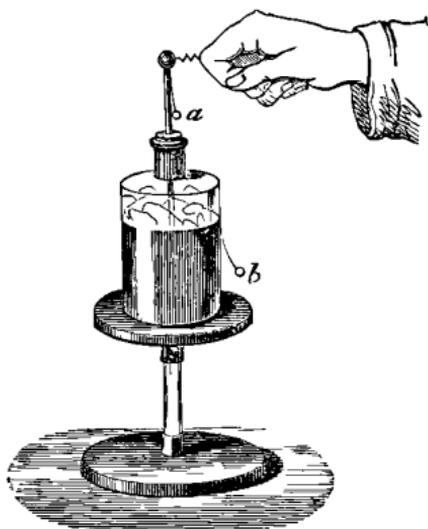


Fig. 177. — Décharge lente.

**Décharges successives.** — Déposons la bouteille chargée sur un plateau isolé (*fig. 177*). Nous avons, au préalable, fixé deux pendules à fil de lin : l'un à la tige *a* de l'armature intérieure, l'autre *b* à l'armature extérieure.

Au début, le pendule *a* s'écarte seul de la tige ; il est repoussé par un bâton de verre électrisé. L'armature intérieure est électrisée positivement.

On touche du doigt le bouton, il se produit une petite étincelle, le pendule *a* retombe ; l'armature est désélectrisée. Mais, et c'est là le point important, le pendule *b* se relève et il est chargé d'électricité négative. Celle-ci se trouvait tout d'abord sur la face interne de la feuille d'étain, elle y était retenue par l'électricité positive que le contact du doigt a enlevée à l'armature intérieure. Sa disparition fait apparaître l'électricité négative sur la face extérieure de l'étain et sur le pendule *b*.

Touchons maintenant cette feuille d'étain pour la désélectriser, le pendule *b* retombe, et le pendule *a* diverge de nou-

veau, toujours positif; l'effet que nous venons de décrire se reproduit et l'électricité négative qu'enlève le second contact rend, en quelque sorte, libre une partie de l'électricité positive accumulée dans l'intérieur de la bouteille, à la surface du verre.

On peut continuer la même manœuvre assez longtemps, toucher alternativement chacune des deux armatures et voir diverger successivement les pendules *a* et *b*. On détruit ainsi progressivement l'œuvre de condensation qui s'est produite pendant la charge de la bouteille.

En résumé : l'armature extérieure se charge d'électricité négative sous l'influence de l'électricité positive que la machine fournit à l'armature intérieure; les deux électricités se neutralisent, à distance, ce qui permet à la machine d'augmenter la charge de l'armature interne.

On dit que la présence de l'armature extérieure a augmenté la *capacité* de l'armature intérieure; il faut, pour amener

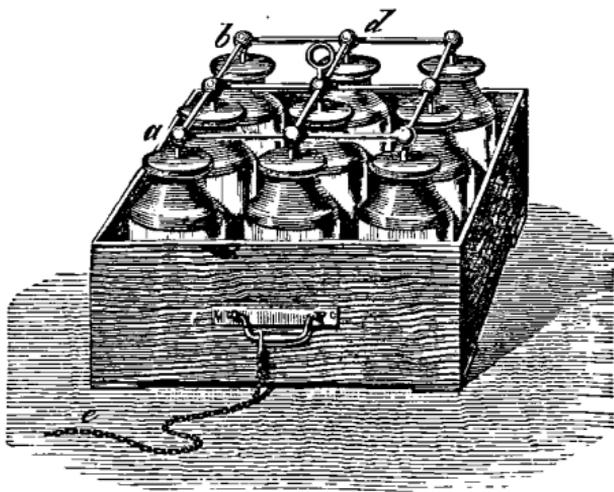


Fig. 178. — Batterie électrique.

celle-ci à avoir la tension de la machine, une charge électrique plus considérable que si l'armature intérieure était seule en contact avec la machine, sans que son influence puisse se faire sentir sur les corps voisins.

**Batteries électriques.** — La bouteille de Leyde met en jeu, dans sa décharge, de grandes quantités d'électricité.

Pour avoir des condensateurs puissants, il faut leur donner une grande surface. Pour cela, on prend de grandes jarres de verre, recouvertes de feuilles d'étain sur une grande partie de leurs surfaces, tant intérieures qu'extérieures. Des tiges à boule communiquent avec les premières.

Toutes les jarres sont placées dans une caisse dont le fond, garni de feuilles d'étain, fait communiquer ensemble toutes les armatures extérieures. Les boules des armatures internes sont reliées par des tiges de laiton *ab* (fig. 178). L'ensemble forme une grande bouteille de Leyde.

On la charge en reliant, à l'aide d'une tige de laiton, les armatures intérieures avec le conducteur d'une machine; les autres communiquent avec le sol.

On a là une *batterie électrique*. La commotion qu'elle peut donner est dangereuse, et on doit la décharger à l'aide de l'excitateur à manches de verre.

**Effets de la décharge des batteries.** — La décharge d'une batterie tue un oiseau.

On peut aussi percer une lame de verre, bien que l'expé-

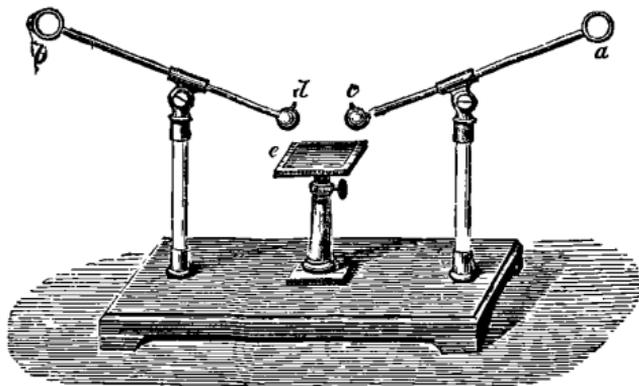


Fig. 179. — Excitateur universel.

rience réussisse mieux avec une simple bouteille de Leyde. La lame de verre est placée entre deux tiges isolées et taillées en pointe et on fait passer la décharge entre les deux pointes.

Si on place entre elles un petit morceau de sapin, il peut être brisé par la décharge.

**Fusion des métaux.** — Un fil de fer ou de platine, très fin et assez court, est tendu entre deux tiges isolées *c, d* (fig. 179). L'une d'elles, *a*, communique avec le sol, l'autre, *b*, est reliée par un excitateur à manches de verre avec l'armature intérieure d'une batterie chargée.

Suivant la force de la décharge, le fil rougit, fond, ou est volatilisé.

On peut faire l'expérience avec des fils de passementerie. Ce sont des fils de soie, recouverts de fils très fins d'or, d'argent ou de cuivre. Le métal est volatilisé et la soie reste intacte. Si le fil a été placé entre deux lames de verre, les vapeurs métalliques se condensent sur ces lames et elles sont ainsi argentées ou dorées, à l'endroit où se trouvait le fil.

**Électricité atmosphérique.** — Toutes ces expériences sont intéressantes par elles-mêmes ; mais elles ont une autre portée ; elles servent à expliquer les effets de la foudre.

Je ne vais pas décrire un orage. On sait que des nuages épais et sombres en annoncent la venue. On sait que de ces nuages jaillissent des éclairs lumineux, tantôt très larges et illuminant tout le ciel pendant un instant très court ; tantôt dessinant sur les nuages une ligne en zigzag très brillante. Le tonnerre gronde à chaque éclair et, dès le début, on a remarqué l'analogie que ces phénomènes naturels présentent avec la décharge de nos appareils électriques ; même lumière, même marche en zigzag, même bruit. On voit en petit, dans nos expériences, ce que l'on retrouve en grand dans la nature.

Lorsque l'éclair aboutit au sol, on dit que la *foudre tombe*. Elle produit des effets désastreux, que nous imitons par la décharge d'une batterie. Les hommes, les animaux sont tués ; les fils de sonnette sont fondus ; les dorures des cadres sont enlevées sans que le bois soit attaqué ; les carreaux de vitre sont percés. Le feu du ciel allume des incendies, de même

qu'avec nos décharges nous pouvons enflammer l'éther ou la poudre.

Ne pourrait-on pas conclure de tous ces rapprochements, qu'un orage est un phénomène électrique ?

Franklin <sup>1</sup> démontra, en 1750, qu'un nuage orageux est bien réellement chargé d'électricité.

Il sortit de Boston, par un temps d'orage, et lança un cerf-volant dont la carcasse métallique était armée d'une tige effilée en pointe aiguë.

La corde de chanvre qui retenait le cerf-volant était attachée à une clef, et il tenait celle-ci à l'aide d'un foulard de soie, corps isolant.

Ses premiers essais furent infructueux ; la corde sèche ne se laissait pas traverser par l'électricité.

Une petite pluie survint qui mouilla la corde et la rendit conductrice. Franklin put alors tirer de la clef des étincelles ; il put charger une bouteille de Leyde avec l'électricité venue des nuages.

Ces expériences n'étaient pas sans danger. On le vit bien dans les expériences que de Romas fit à Nérac, en 1753.

Des étincelles partaient de l'extrémité de la corde métallique de son cerf-volant ; elles avaient une longueur de 4 mètres et produisaient une détonation comparable à celle d'un coup de pistolet.

**Paratonnerre.** — Franklin tira de ses expériences un moyen de préserver de la foudre les édifices élevés.

On place au-dessus de l'édifice une tige de fer longue de 7 à 10 mètres, et on la fait communiquer directement, par une tige ou une corde métallique avec l'eau d'un puits ou d'une rivière.

Une pointe termine la tige (*fig. 180*) ; elle est en cuivre rouge, que l'on a doré pour éviter l'oxy-



Fig. 180.  
Pointe de  
paratonnerre.

1. Franklin né à Boston en 1706, mort en 1790.

dation. Toutes les parties du paratonnerre sont soudées à l'étain.

Le paratonnerre, ou sa chaîne, doit communiquer, par des tiges métalliques, avec les charpentes en fer, s'il y en a dans l'édifice. Si celui-ci présente une grande surface, on doit y planter plusieurs paratonnerres, qui communiqueront tous entre eux par des tiges latérales.

La théorie du paratonnerre est simple. Un nuage orageux électrisé positivement, je suppose, passe au-dessus de l'édifice. Il électrise négativement, par influence, l'édifice et surtout la tige ; il refoule dans le sol l'électricité positive, elle suit le conducteur et se perd dans la nappe d'eau qui entoure son extrémité.

L'électricité négative s'échappe par la pointe dans l'atmosphère, et se porte vers le nuage qu'elle désélectrise en partie.

Il ne faut pas qu'il y ait discontinuité entre la tige et le sol. Si le conducteur était interrompu en un point, on verrait s'y produire une succession terrifiante d'étincelles ; l'électricité positive, éprouvant de la résistance pour se rendre dans le sol par le conducteur, pourrait se porter sur les pièces métalliques qui se trouvent dans l'édifice et, sautant d'une pièce à l'autre, sous forme d'éclairs, elle y produirait tous les effets de la foudre que l'on a pour but d'éviter.

Il ne faut pas oublier que la foudre frappe de préférence les objets qui font saillie au-dessus du sol : les clochers, les arbres. On a cessé de sonner les cloches en temps d'orage ; la vie des sonneurs était trop souvent en danger.

On ne doit, à *aucun prix*, se réfugier sous un arbre pendant un orage. Il n'y a que trop d'exemples de personnes foudroyées pour s'être placées près d'un tronc d'arbre. Si l'arbre est frappé d'un coup de foudre, la mort de la personne est infaillible.

Bien que le tonnerre et l'éclair se produisent en même temps, on entend souvent le tonnerre quelques secondes après avoir vu l'éclair. La lumière nous parvient presque instantanément ; le son ne parcourt que 340 mètres par

seconde. Comptez le nombre des pulsations de votre poulx, entre le moment où vous voyez la lumière et celui où vous entendez le tonnerre, et multipliez ce nombre par 300 : vous aurez en mètres la distance approchée du nuage orageux. Si le coup de tonnerre suit immédiatement l'éclair, la foudre est proche.

## CHAPITRE IV

### Piles électriques.

A la fin du dix-huitième siècle, en dehors de l'électricité atmosphérique, le frottement était la seule source d'électricité connue. Une expérience faite en 1780, par Galvani<sup>1</sup>, professeur à Bologne, fut le point de départ de nouvelles découvertes.

On coupe les cuisses d'une grenouille vivante (*fig. 181*), on la dépouille de sa peau et, l'étendant sur une planchette, on touche, d'une part, les nerfs des reins, d'autre part, l'extrémité des pattes avec un arc *zn*, composé de deux métaux : un fil de cuivre rouge, un fil de zinc ou de fer. On voit tressaillir les membres de la grenouille ; ils changent de position, comme s'ils appartenaient encore à un animal vivant. Galvani attribua, avec raison, à l'électricité la cause de ces convulsions.

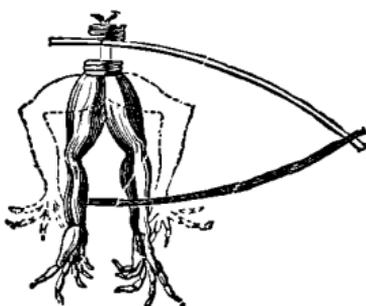


Fig. 181. — Expérience de Galvani.

Volta<sup>2</sup> entreprit de démontrer que la source de cette électricité était dans le contact des deux métaux, cuivre

1. Galvani, né en 1737, mort en 1798.

2. Volta, né en 1745, mort en 1827.

et zinc, et il fut amené en 1800 à la découverte de la pile.

**Pile de Volta.** — Il empilait des disques de cuivre rouge, et de zinc, en les disposant dans le même ordre et en séparant chaque groupe, cuivre et zinc, par une rondelle de drap imprégnée d'eau acidulée (*fig. 182*).

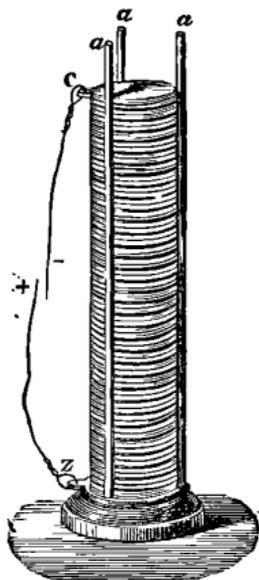


Fig. 182. — Pile de Volta.

Lorsque la pile était formée d'une cinquantaine de couples de disques, zinc et cuivre, on ressentait des commotions en réunissant, avec les mains humides, les deux extrémités *z, c* de la pile.

Cette pile n'a plus qu'un intérêt historique.

Volta ne tarda pas à lui donner la forme suivante, qui est le type de toutes les piles modernes.

**Pile à couronne de tasses.** — On dispose un certain nombre de vases  $V_1, V_2$  (*fig. 183*) en file rectiligne ou circulaire ; ils contiennent de l'eau mélangée avec le dixième de son volume d'acide sulfurique.

On plonge, dans chacun de ces vases, une lame de cuivre et une lame de zinc que l'on a frottée avec du mercure et

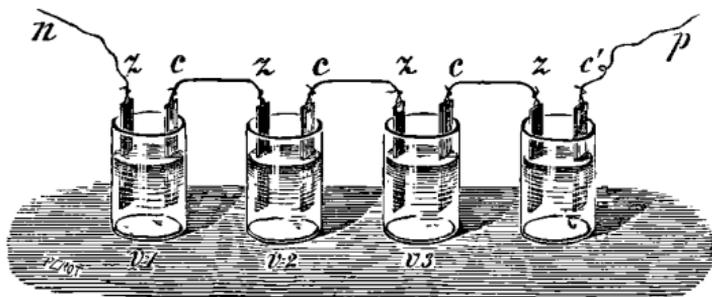


Fig. 183. — Pile à couronnes de tasses.

qu'on appelle du *zinc amalgamé* ; on le retrouve dans toutes les piles.

Le zinc, plongé dans un des vases, est réuni au cuivre du vase suivant par des fils de cuivre soudés aux deux métaux.

On voit, sur la figure, la première lame de zinc  $z$  soudée à un fil de cuivre  $n$ , et, du côté opposé, la dernière lame de cuivre soudée à un pareil fil  $p$ .

Si la file de vases est isolée avec soin et si le fil  $n$  est mis en communication avec le sol, tandis que le fil  $p$  est relié à un électroscope très sensible, celui-ci se charge d'électricité *positive*. La dernière lame de cuivre  $c'$  est le *pôle positif* de la pile. Si on intervertit, en touchant l'électroscope avec le fil  $n$  et mettant le conducteur  $p$  à terre, l'électroscope se charge d'électricité négative. La lame de zinc  $z$  est le *pôle négatif*.

Si on réunit les deux fils conducteurs  $n$ ,  $p$ , tout signe d'électricité disparaît aux pôles ; mais on voit les lames de cuivre se recouvrir de bulles d'hydrogène ; en même temps, le zinc est rongé et se dissout dans l'eau acidulée, à l'état de sulfate de zinc. Une portion de l'eau a donc été décomposée, ce qu'on aurait pu prévoir.

On attache les fils  $p, n$  aux bornes d'une sonnerie électrique, on entend aussitôt un carillon. Il cesse si on soulève hors de l'eau un des couples cuivre-zinc. C'est donc un effet électrique produit par notre appareil.

Que se passe-t-il dans les fils conducteurs  $p, n$  ?

Nous n'en savons absolument rien. On dit qu'il y a un *courant électrique*, c'est-à-dire quelque chose qui se propage à partir des pôles de la pile jusqu'à la sonnerie et qui la met en action ; mais qu'est-ce que ce courant ? La science moderne ne peut répondre à cette question.

Toujours est-il que ce courant est entretenu par l'action chimique qui se produit dans chaque vase de la pile. Il cesse, si on remplace les lames de zinc par des lames de platine, qui n'ont pas d'action sur l'eau acidulée et ne la décomposent pas.

Il cesse également ou s'affaiblit, si on laisse en place le zinc et si on remplace le cuivre par du fer, qui décompose l'eau acidulée comme le fait le zinc.

On arrive donc à conclure que, pour obtenir un courant avec une pile, il faut plonger dans un liquide, ordinairement acide, un métal tel que le zinc, qui puisse décomposer l'eau,

et un autre corps conducteur qui ne la décompose pas. C'est ordinairement du cuivre ou des plaques fabriquées avec un charbon que l'on trouve dans les usines à gaz et qui est bon conducteur de l'électricité.

L'expérience a également appris que les effets du courant étaient plus intenses et surtout plus durables, si on empêchait l'hydrogène de se déposer par *bulles* sur le cuivre ou le charbon. On y parvient en choisissant le liquide qui entoure ces derniers corps, de telle sorte qu'il puisse oxyder l'hydrogène et le transformer en eau.

Nous appellerons *couple d'une pile* ce qui se trouve dans l'un des vases : *zinc, cuivre* en lames et *eau acidulée*. Lorsque les couples sont disposés comme nous l'avons dit, la pile est montée en *série*.

Il n'est pas nécessaire d'isoler la pile ou les conducteurs pour obtenir un courant ; d'ordinaire, l'électricité de la pile a peu de tension et les déperditions sont négligeables. Lorsque les deux conducteurs qui partent des pôles sont réunis, on dit que le circuit de la pile est *fermé*.

Ce que nous venons de dire se rapporte à toutes les piles. Il nous reste à indiquer les formes des couples les plus usuels.

**Pile au bichromate.** — Cette pile, à un seul liquide, me semble la plus convenable pour une école. On la trouve dans le commerce sous différentes formes ; ne voulant pas les décrire toutes, je choisis la suivante.

Une lame épaisse de zinc amalgamé est placée entre deux lames de charbon d'égale surface et à une distance de 4 à 5 millimètres (*fig. 184*).

Ces trois lames sont mastiquées dans un morceau de bois ou d'ébonite qui isole le zinc du charbon. Le zinc communique avec une tige de laiton B, les charbons avec une tige a, et on plonge l'ensemble dans un vase de grès V qui contient une dissolution de bichromate de potasse dans l'eau<sup>1</sup>. Tel est le couple.

1. Le liquide s'obtient en dissolvant, dans 100 grammes d'eau, 12 grammes de bichromate de potasse ; on ajoute 15 grammes d'acide sulfurique

Pour assembler les couples on réunit, par des fils de cuivre, la borne *a* du premier avec la borne B du second, et ainsi de suite. Une borne est un cylindre de laiton percé d'un trou dans lequel on introduit le fil de cuivre ; on le maintient en place par la pression d'une vis.

Les couples ne sont plongés dans le liquide qu'au moment d'une expérience ; on les en retire lorsque la pile ne sert plus. Pour rendre cette manœuvre facile, les plaques zinc et charbon sont suspendues à l'aide de cordes *e* à un cylindre de bois horizontal *i*. On fait tourner celui-ci dans un sens ou dans l'autre, à l'aide de poignées *p, d*, et ainsi on abaisse ou on maintient soulevées les lames, zinc et charbon :

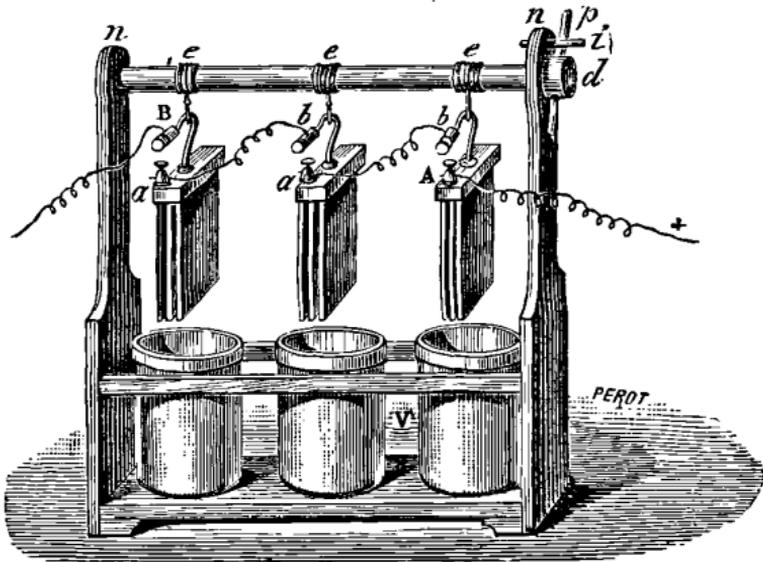


Fig. 184. — Pile au bichromate.

Le zinc B est le pôle négatif, le charbon A le pôle positif de cette pile. Le zinc décompose l'eau et l'hydrogène ne parvient pas jusqu'au charbon, parce qu'il est oxydé par l'acide chromique du sel. Il se forme de l'eau, tandis que l'acide se transforme en sesquioxyde de chrome et, plus tard, en sulfate de sesquioxyde de chrome.

Cette pile s'affaiblit promptement si les zincs sont longtemps en contact avec le liquide.

**Pile Leclanché.** — Cette pile convient pour activer les sonneries électriques et les appareils télégraphiques.

Un prisme de charbon *a* (fig. 185) et un cylindre de zinc

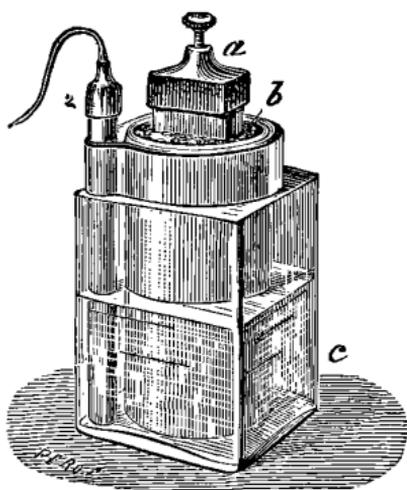


Fig. 185. — Couple Leclanché.

amalgamé *z* plongent dans un vase de verre *c* renfermant une dissolution de chlorhydrate d'ammoniaque. Le charbon est entouré d'un mélange de charbon conducteur et de bioxyde de manganèse contenu parfois dans un vase *b* de porcelaine poreuse pouvant, comme une pipe de terre, s'imbiber de liquide. On peut, au début, verser de l'eau dans ce vase; ce n'est pas indispensable. Le charbon porte une armature métallique et une vis de pression;

le cylindre de zinc est soudé à un fil de cuivre, ce qui permet d'assembler les couples en série.

L'eau est décomposée lorsque le circuit de la pile est fermé; le zinc se transforme en chlorure de zinc qui se dissout dans l'eau. L'hydrogène ne parvient pas au cuivre; il est oxydé par le bioxyde de manganèse et reforme de l'eau.

Cette pile conserve longtemps son activité, pourvu qu'on la maintienne à circuit ouvert et qu'on ne la fasse fonctionner que pendant un temps assez court, comme cela arrive dans les sonneries électriques.

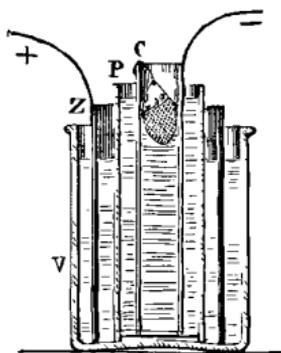


Fig. 186.  
Pile de Daniell.

**Pile de Daniell.** — Cette troisième pile est dite à deux liquides. Le courant qu'elle fournit conserve longtemps son intensité. Elle sert surtout pour la galvanoplastie.

On trouve, dans un couple Daniell, deux vases comme ci-dessus. L'un *V* (fig. 186), en grès imperméable; on y met de l'eau salée ou

acidulée ; une lame de zinc amalgamé, contournée en cylindre, plonge dans ce vase ; on lui donne cette forme pour avoir une large surface de zinc.

Dans ce cylindre de zinc plonge un vase P de porcelaine poreuse ; et, au centre, on met dans ce dernier vase une lame de cuivre C. Le vase poreux contient une dissolution de sulfate de cuivre dans l'eau. Les niveaux des deux liquides sont voisins l'un de l'autre. On place encore dans le vase poreux un petit sac de toile rempli de morceaux de sulfate de cuivre solide.

L'eau est décomposée lorsque le circuit de la pile est fermé ; le zinc se transforme en sulfate de zinc ; l'hydrogène, qui se porte vers le cuivre, décompose le sulfate de cuivre dissous qu'il doit traverser. Il forme de l'eau avec l'oxygène de l'oxyde de cuivre, et le cuivre se dépose à l'état métallique sur la lame de cuivre c.

Cette lame est le pôle positif de la pile que l'on forme en assemblant les couples en série.

Le sulfate de cuivre solide, renfermé dans le sac de toile, se dissout et maintient saturée la dissolution de ce sel ; car elle s'appauvrit sans cesse, par suite de l'action chimique que nous venons de décrire.

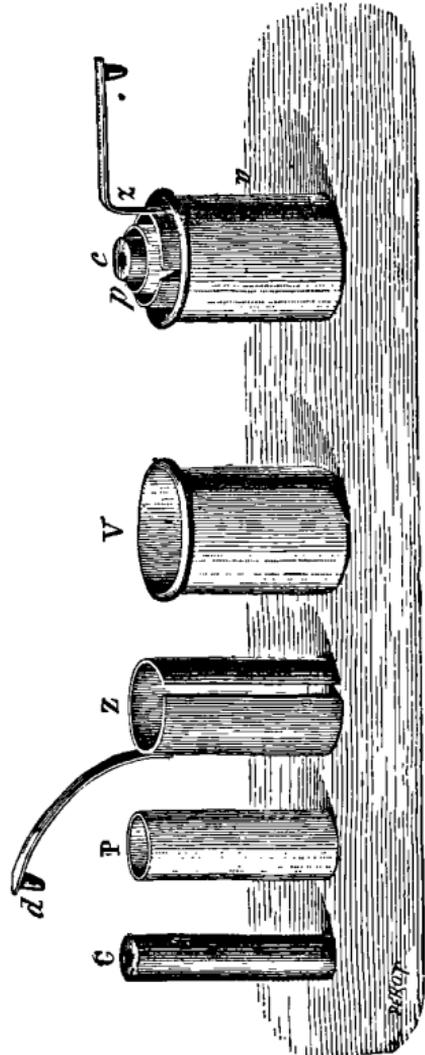


Fig. 187. — Pile de Bunsen.

La pile de Daniell est le type des piles à courant constant, imaginées par le physicien français A. Becquerel<sup>1</sup>.

**Pile de Bunsen.** — Le couple de Bunsen<sup>2</sup> est encore très souvent employé. On en forme des piles qui sont plus énergiques que la pile de Daniell et qui ont un courant sensiblement constant. On retrouve dans ce couple deux vases, l'un V (*fig.* 187) imperméable, l'autre, intérieur P, en terre poreuse. On place entre ces deux vases une lame de zinc amalgamé z, courbée en forme de cylindre. On plonge dans le second un cylindre c de charbon conducteur. Le vase poreux est rempli d'acide azotique ; le vase extérieur renferme de l'eau mélangée à un dixième de son volume d'acide sulfurique. Une lame de cuivre entoure le charbon, une autre est soudée au zinc ; elles permettent de monter les couples en série, en réunissant le charbon d'un couple avec le zinc du couple suivant. Le premier charbon est le pôle positif. Le dernier zinc est le pôle négatif.

Lorsque la pile est à circuit fermé, le zinc décompose l'eau et se transforme en sulfate de zinc ; l'hydrogène de l'eau, devenu libre, traverse le vase poreux et l'acide azotique pour se porter sur le charbon ; il décompose l'acide en oxygène, qui s'unit à l'hydrogène pour reformer de l'eau, et en acide hypoazotique, qui se dégage.

Cette pile a l'inconvénient de répandre, lorsqu'elle est en activité, une odeur désagréable d'acide hypoazotique.

De quelque pile que l'on se serve, il faut, de temps à autre, renouveler les liquides qui se chargent, à la longue, de sels de zinc et remplacer les lames de zinc qui sont peu à peu rongées par ces liquides. C'est la dépense qu'il faut faire pour avoir de l'électricité : car on n'obtient rien sans dépense.

1. Becquerel (Antoine), né en 1788, mort en 1880.

2. Bunsen, professeur à l'Université d'Heidelberg.

## CHAPITRE V

## Effets des courants électriques.

**Effets chimiques.** — Pour les expériences qui suivent, trois à cinq couples au bichromate, assemblés en série, suffisent.

On plonge dans de l'eau acidulée avec de l'acide sulfurique deux fils, ou mieux deux lames de platine *ab* (fig. 188) ; je les suppose masquées dans le fond d'un verre, ce qui n'est pas indispensable, et communiquant avec les deux fils conducteurs d'une pile. Ils sont recouverts par deux tubes-éprouvettes pleins du même liquide, convenablement soutenus pour ne pas reposer sur le fond du verre. Cet appareil porte le nom de *voltamètre*.

Le circuit de la pile une fois fermé, on voit des bulles de gaz recouvrir le platine, s'en détacher et se loger dans chacune des éprouvettes. Quand on en a un assez grand volume, on reconnaît, du côté *a* du conducteur positif de la pile, un gaz qui rallume une allumette présentant un point rouge ; c'est de l'*oxygène*.

Une seconde allumette enflammée, mise en contact avec le gaz recueilli dans la seconde éprouvette, le fait brûler ; c'est de l'*hydrogène*.

En résumé, le courant, en traversant l'eau, la décompose en ses deux éléments : oxygène et hydrogène. Le premier gaz se montre sur le platine qui reçoit de la pile l'électricité positive ; le second, sur le platine qui reçoit l'électricité négative. Ces deux lames de platine portent le nom d'*électrodes* ; la

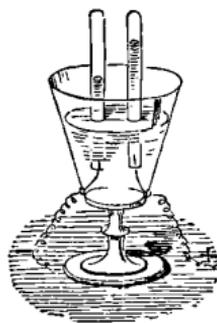


Fig. 188.  
Voltamètre.

première est l'*électrode positive*; la seconde, l'*électrode négative*. L'appareil précédent porte le nom de *voltamètre*.

**Sens d'un courant.** — On peut convenir que le courant électrique a un sens défini par l'expérience précédente. On dira que le courant va dans le circuit extérieur à la pile, du pôle positif (charbon ou cuivre) au pôle négatif (zinc), ce qui suppose que la tension électrique est plus grande au pôle positif qu'au pôle négatif. Il faut ajouter que, dans l'intérieur de la pile, il y a un courant qui va du zinc au cuivre ou au charbon. Sur toute l'étendue du circuit, s'il se trouve des lames métalliques plongeant dans l'eau acidulée, cette eau est décomposée; l'oxygène se porte sur la lame qui amène le courant. L'hydrogène se porte sur la lame par laquelle il s'en va.

La quantité d'eau décomposée dans un *voltamètre* est proportionnelle à la quantité d'électricité qui a traversé l'eau.

Cette quantité, mesurée pendant l'unité de temps, s'appelle l'*intensité* du courant. On a donné à l'unité d'intensité le nom d'un grand savant français, Ampère.

Il faut 96 *ampères* pour décomposer, en une seconde, 9 milligrammes d'eau.

**Décomposition des oxydes et des sels.** — La décomposition de l'eau fut réalisée, en 1800, par Nicholson et Carlisle.

En 1811, un autre savant anglais, Humphry Davy, décomposa, à l'aide d'un courant électrique, la potasse, la soude, et démontra que c'étaient les oxydes de deux métaux jusqu'alors inconnus et auxquels il donna les noms de *potassium* et de *sodium*.

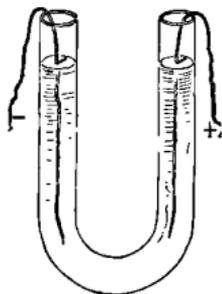


Fig. 189. — Décomposition d'un sel.

Les dissolutions salines sont également décomposées par ce courant. Prenons pour exemple le sulfate de cuivre.

On met une dissolution de sulfate de cuivre dans un verre ordinaire ou dans un large tube recourbé en U (*fig. 189*).

Deux lames de platine, réunies aux conducteurs positif et

négalif d'une pile, plongent dans ce liquide ; la pile est en activité. Au bout d'un certain temps, la lame négative est recouverte d'une couche de cuivre reconnaissable à sa couleur ; la couleur bleue de la dissolution pâlit et disparaît. Le sulfate dissous a été décomposé ; le cuivre se dépose. Il se dégage de l'oxygène sur la lame positive et il s'accumule autour d'elle de l'acide sulfurique. Ces trois corps, cuivre, oxygène et acide sulfurique, sont bien les éléments du sulfate de cuivre. On voit de quelle manière l'électricité les sépare.

Si on eût mis dans le sulfate deux lames ou électrodes de cuivre, on aurait eu également un dépôt de cuivre sur la lame négative ; mais l'oxygène qui se porte sur l'électrode positive aurait transformé le cuivre qui s'y trouve en oxyde, et celui-ci se serait dissous dans l'acide sulfurique rendu libre autour de cette lame. Le sulfate de cuivre se serait reformé aux dépens de la lame positive, et celle-ci aurait été rongée. Le poids de cuivre déposé sur l'électrode négative et le poids du même métal dissous sur la lame positive seraient égaux.

Remarquons, pour ce qui va suivre, que, si le courant est très intense, le dépôt de cuivre est très abondant ; car le poids du cuivre déposé est proportionnel à l'intensité du courant. On obtient alors, sur la lame négative, une poussière de cuivre formant une bouillie.

Ce dépôt devient cohérent et tenace comme une lame de cuivre du commerce, si le courant est peu intense. Si son intensité est très faible, le dépôt se fait très lentement ; le cuivre cristallise, il a l'aspect métallique, mais il est très cassant.

**Galvanoplastie.** — Jacobi découvrit, en 1837, le moyen d'obtenir, à l'aide de l'électricité, la reproduction, en cuivre, d'objets conducteurs.

Prenons pour exemple une médaille métallique ou même une pièce de 10 centimes.

On entoure la médaille d'un fil de cuivre fortement serré et on recouvre de cire fondue le revers de la médaille, de façon à ne reproduire que la face.

Si on a à sa disposition un couple de Daniell de petite surface et faiblement chargé avec de l'eau salée ou acidulée, on attache le fil de la médaille au zinc du couple. Une lame de cuivre est mise en communication, par un fil conducteur, avec le cuivre du même couple. On plonge l'une et l'autre dans un vase contenant une dissolution de sulfate de cuivre.

Au bout d'un ou deux jours, la médaille est recouverte d'un dépôt de cuivre assez résistant pour pouvoir en être séparé.

Si la médaille présente un dessin en relief, le cuivre le reproduit en creux. On peut se servir de cette empreinte pour obtenir un nouveau dépôt de cuivre qui, cette fois, donnera une reproduction exacte de la médaille.

On peut aussi entourer la médaille d'un carton et verser à sa surface un peu de plâtre délayé dans l'eau. Lorsque le plâtre a fait prise et est sec, il se sépare du métal et donne un moule en creux de la médaille. On le plonge dans la cire fondue pour le rendre imperméable ; puis on frotte sa surface avec un pinceau imprégné de plombagine pulvérisée, ce qui rend la surface du plâtre conductrice de l'électricité. Le moule ainsi préparé est entouré d'un fil de cuivre et on achève ensuite comme nous l'avons dit plus haut.

Nous donnons, à titre de renseignement, un appareil

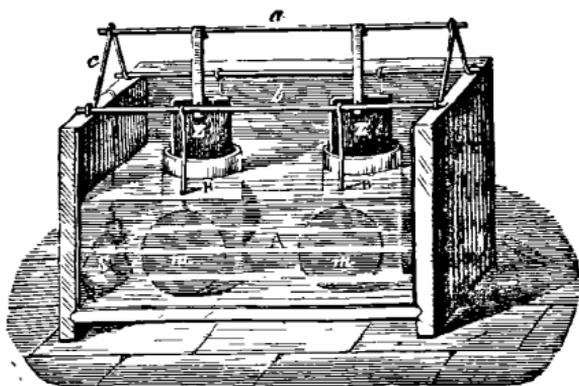


Fig. 190. — Appareil simple de galvanoplastie.

employé dans l'industrie de la *galvanoplastie* et qui peut être facilement approprié à de petites expériences.

Un vase ou une caisse contient la dissolution de sulfate de cuivre. On y plonge un ou plusieurs vases de porcelaine poreuse renfermant chacun une lame de zinc *z* (*fig. 190*) et de l'eau très faiblement acidulée.

Les moules que l'on veut recouvrir de cuivre sont plongés dans la cuve et reliés aux zincs par des fils ou des tringles de métal *a*.

Dans cet ensemble, on reconnaît facilement les éléments d'un couple de Daniell. Le dépôt de cuivre se fait sur les moules ; la dissolution du sulfate s'appauvrit et il faut, pour la maintenir à l'état de saturation, mettre du sulfate en morceaux dans un sac de toile *s* qui reste plongé dans la dissolution.

La galvanoplastie forme une industrie très prospère qui fournit au commerce un certain nombre d'ornements en cuivre. On reproduit par la galvanoplastie les planches qui servent à imprimer les timbres-poste, les cartes, les billets de banque.

**Argenture et dorure.** — L'argenture et la dorure électriques furent découvertes, en 1840, par Elkington, en Angleterre, et de Ruolz, en France.

Veut-on argenter un objet de laiton ? On commence par nettoyer avec soin sa surface, enlevant les matières grasses ou les oxydes qui pourraient la ternir. On emploie pour cela

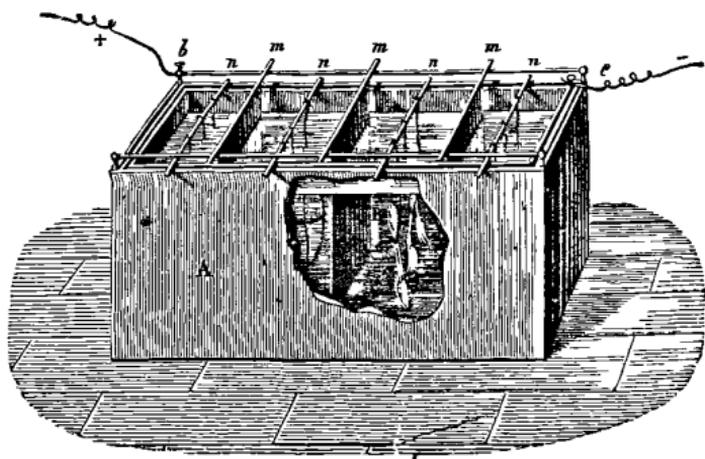


Fig. 191. — Bain d'argent.

des bains d'eau acidulée ou d'acide pur dans lesquels on plonge l'objet. On le lave à grande eau et on le plonge immédiatement dans le bain d'argent.

Ce bain est une dissolution de cyanure d'argent dans de l'eau qui a dissous déjà du cyanure de potassium. Ces deux métaux y sont combinés au cyanogène,  $C^2Az$ .

L'objet est réuni, par un fil de cuivre, au pôle négatif d'un couple de Daniell. Le pôle positif communique, par un second fil, avec une lame d'argent, plongée dans le bain, près de l'objet qu'on veut argenter. On voit (*fig. 191*) les plaques d'argent *m* soutenues par les tringles *b* qui reçoivent le courant positif et les objets supportés par les tringles *n* isolées des premières, et communiquant avec le fil de sortie *e* du courant.

Le dépôt se fait lentement par la décomposition du cyanure d'argent. Le cyanogène, rendu libre, ronge les plaques d'argent et il reproduit ce sel, comme nous l'avons dit plus haut, à propos du sulfate de cuivre.

La dorure se fait exactement de la même manière ; il n'y a qu'une seule chose de changée. On substitue le cyanure d'or et une électrode positive en or au cyanure d'argent et à la lame d'argent.

**Actions physiologiques.** — On ne ressent aucune commotion en maniant les conducteurs d'une pile de quelques éléments. Elles se manifestent si la pile est formée d'une cinquantaine de couples. A mesure que leur nombre augmente, la force des commotions grandit ; et elles deviendraient mortelles avec une pile d'un millier d'éléments.

**Chaleur et lumière.** — L'électricité de la pile est de la même nature que celle d'une machine électrique. Cependant leurs effets semblent au premier abord différents. Une machine donne de brillantes étincelles et ses décharges ne décomposent pas l'eau d'une manière sensible. Cette décomposition est facile avec une pile de quelques couples, mais les étincelles qu'elle peut donner sont très petites.

La machine fournit de l'électricité dont la tension est assez forte, mais le courant qu'elle pourrait entretenir dans un fil aurait peu d'intensité ; elle débite une quantité d'électricité très faible. L'intensité du courant d'une pile est bien plus grande, mais sa tension est moindre ; à moins, toute-

fois, qu'on ne la compose d'un très grand nombre de couples, auquel cas ses effets sont comparables ou supérieurs à ceux d'une machine à frottement.

**Étincelles.** — On peut obtenir de petites étincelles avec une pile de quelques éléments, en appuyant l'un des conducteurs de la pile sur une râpe de fer et frottant cette râpe avec l'autre conducteur.

Mais il faut renoncer à avoir des étincelles plus longues, le courant de la pile ne peut franchir une couche d'air, n'eût-elle qu'un millimètre d'épaisseur; la résistance à son passage est trop grande.

**Résistance.** — Le courant trouve partout cette résistance, même dans les fils de cuivre qu'on lui donne à parcourir. Une pile dont le courant peut décomposer l'eau lorsque les fils conducteurs sont courts, ne peut plus le faire si on interpose entre la pile et le voltamètre un kilomètre de fil; un couple Leclanché met en action une sonnerie voisine. Éloignez cette sonnerie en allongeant les fils qui la relie à la pile, elle cessera de fonctionner. La résistance du fil a eu raison du courant; elle en a diminué l'intensité.

L'expérience nous apprend que de deux fils pris dans la même bobine, le plus long est le plus résistant. Si deux fils ont même longueur, mais des diamètres différents, le plus fin est celui qui affaiblit le plus le courant; sa résistance est plus grande. Enfin donnons aux deux fils les mêmes dimensions en longueur et en diamètre, mais prenons un fil de fer et un fil de cuivre; le courant qui traverse le second est plus intense que celui qui se propage dans le premier, les deux courants provenant de la même pile.

L'intensité du courant que fournit une pile n'est donc pas toujours la même; elle dépend de la nature du circuit qui réunit les deux pôles de la pile, c'est-à-dire de la nature du étal qui forme ce circuit et de ses dimensions.

L'eau pure n'est pas décomposée par un courant, parce que sa résistance est trop grande pour que l'électricité la traverse. C'est pour diminuer cette résistance, qu'on acidule l'eau d'un voltamètre.

La résistance de la pile diminue, elle aussi, l'intensité du courant. Celui-ci la parcourt et y traverse des liquides dont la résistance est très grande. On cherche à la diminuer en donnant de larges surfaces aux éléments zinc, cuivre, et en les rapprochant le plus qu'on peut.

**Chaleur.** — Toutes les fois qu'un courant trouve une résistance sur son passage, il produit un dégagement de chaleur, d'autant plus grand que la résistance est plus forte. On réunit par un fil fin de fer ou de platine les deux conducteurs d'une pile; suivant l'intensité du courant, le fil s'échauffe, rougit, devient lumineux et arrive à fondre ou à être volatilisé.

Les piles qui conviennent le mieux pour produire ces effets sont celles dont les métaux ont une grande surface.

**Eclairage électrique.** — On trouve installé dans

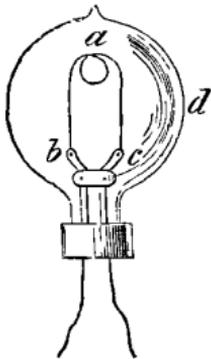


Fig. 192.  
Lampe à incandescence.

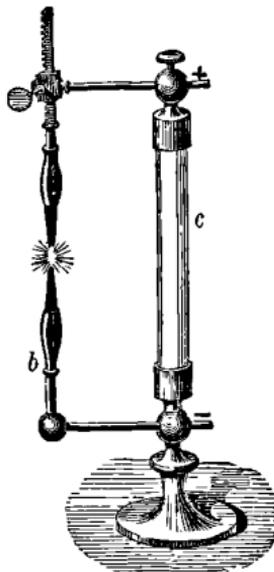


Fig. 193.  
Lumière électrique.

les grandes villes un éclairage électrique. L'appareil qui sert à éclairer les magasins ou les appartements consiste en un fil de charbon *abc* (fig. 192) très fin, qui est fixé par ses deux extrémités à des fils de cuivre. Il est enfermé dans un petit ballon de verre dans lequel on a fait le vide. Le courant électrique porte ce fil à l'incandescence. Il ne

peut brûler puisqu'il n'y a pas d'air.

On forme des lustres avec un certain nombre de ces lampes à incandescence pour obtenir un brillant éclairage.

**Lampe à arc.** — Pour éclairer les rues, on utilise une expérience de Davy faite en 1811. Les deux conducteurs

d'une pile de cinquante éléments aboutissent à deux baguettes de charbon *a, b* (*fig. 193*), conducteurs que l'on met en contact. Les charbons rougissent, et, si on les écarte, une lumière éblouissante jaillit entre eux, ce que l'on appelle l'*arc voltaïque*. Cette lumière dure autant que le courant; mais, pour la maintenir continue, il faut, de temps à autre, rapprocher les charbons qui s'usent assez rapidement; sans quoi la résistance de l'air rompt le courant et éteint cette sorte de lampe, qu'on appelle une *lampe à arc*.

L'éclairage électrique serait impraticable s'il fallait recourir aux piles pour se procurer le courant; il serait beaucoup trop coûteux. On n'a pu le réaliser qu'au moyen de machines aptes à produire des courants électriques, et dont nous nous occuperons dans le cours de troisième année.

## CHAPITRE VI

### Actions magnétiques.

OErsted découvrit en 1820 l'action qu'un courant exerce sur l'aiguille aimantée.

Une aiguille *ns* (*fig. 194*) horizontale est dans la position d'équilibre que lui donne la terre, dirigée du sud au nord.

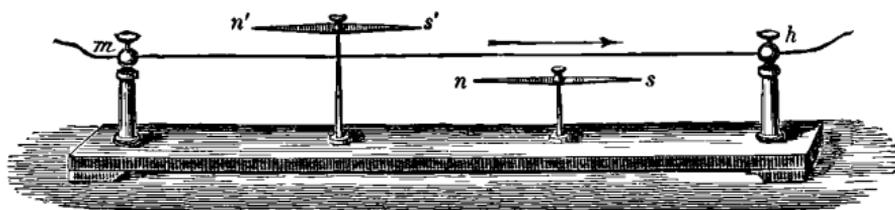


Fig. 194. — Expérience d'OErsted.

Le fil conducteur *mh* lui est parallèle, et le courant d'une pile le traverse dans le sens de la flèche. L'aiguille est déviée, et tend à se placer en croix avec le fil : le pôle nord se

portant en arrière du papier. Il se porte en avant, si on change le sens du courant.

Si, comme l'indique Ampère, on suppose un observateur couché le long du fil et regardant l'aiguille; si le courant positif lui entre par les pieds et sort du côté de la tête, il verra le pôle *nord* de l'aiguille se porter à sa gauche.

L'observateur sera couché sur le ventre pour regarder l'aiguille *ns*; sur le dos pour voir l'aiguille *n's'*; le pôle nord de la première viendra en arrière du papier, et celui de la seconde se portera en avant.

La grandeur de la déviation dépend de l'intensité du courant et peut servir à la mesurer. Elle s'affaiblit si le courant s'éloigne, et finit par devenir insensible. Ce sont surtout les parties voisines du fil qui agissent sur l'aiguille.

On augmente la déviation de l'aiguille *ns*, en la plaçant au centre d'un rectangle *abcd* (*fig. 195*) formé par le fil conducteur de la pile.

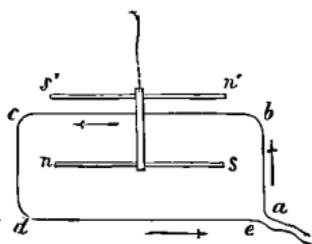


Fig. 195.

On peut s'assurer que l'observateur qui suit le courant dans le sens de la flèche, en regardant toujours l'aiguille *ns*, parcourt les quatre côtés du rectangle en ayant toujours la gauche tournée du même côté. Les actions des quatre portions de courant *ab*, *bc*, *cd*, *de* concourent à donner à l'aiguille une

position perpendiculaire au plan du papier, le pôle nord en avant.

**Aiguilles astatiques.** — L'action magnétique de la terre s'oppose à ce mouvement, et peut l'empêcher, si le courant est très faible. Dans ce cas, on fixe au-dessus de la première aiguille *ns* une seconde *n's'*. Les pôles contraires *n's* sont en regard. Les aiguilles sont maintenues parallèles par une petite tige métallique. Le courant *cb*, qui amène le pôle *n* en avant du papier, tend à placer le pôle *n'* en arrière; mouvements qui sont concordants. — Les actions de la terre sur les deux aiguilles sont de sens contraires, et se détruisent en grande partie. De faibles courants pourront dès lors dévier

le système des deux aiguilles. On lui donne le nom de système *astatique*.

**Multiplicateur.** — On augmente l'action du courant en lui faisant parcourir un long fil de cuivre enroulé sur un cadre de bois A (fig. 196), au centre duquel se trouve l'aiguille aimantée *ns*. Chaque tour du fil agit pour dévier l'aiguille; les tours sont isolés les uns des autres, parce qu'on a pris la précaution d'enrouler autour du fil de cuivre un fil de soie ou de coton qui isole les spires. Les deux extrémités du fil aboutissent aux deux bornes *a, b* dans lesquelles s'engagent les conducteurs de la pile.

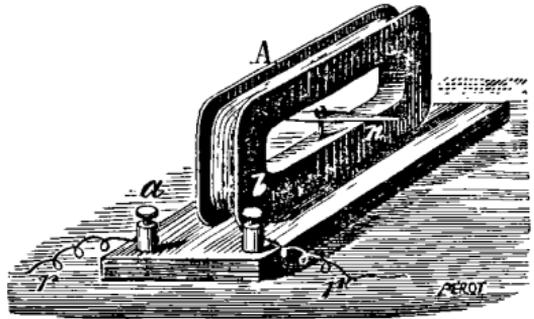


Fig. 196. — Multiplicateur.

**Galvanomètres.** — On peut, en introduisant dans le même circuit d'une pile un voltamètre et un multiplicateur, reconnaître que plus le volume d'hydrogène recueilli en une minute est considérable, plus la déviation de l'aiguille est grande. La déviation peut donc servir à comparer entre elles les intensités des courants, ou à les mesurer.

L'instrument qui sert à cet usage, le *galvanomètre*, se compose d'un multiplicateur au centre duquel se trouve une aiguille aimantée; elle est

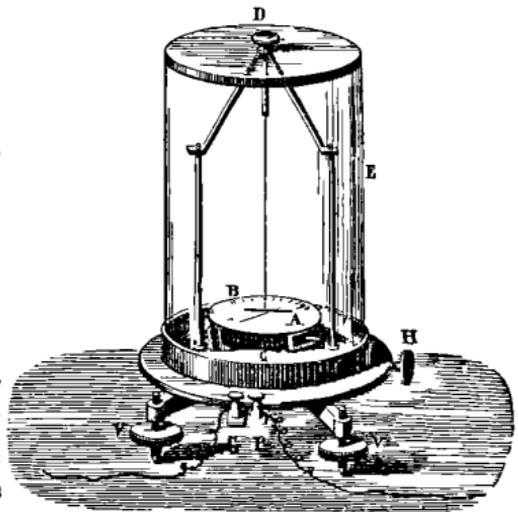


Fig. 197. — Galvanomètre.

unie par une tige verticale à une seconde aiguille placée en

dehors du cadre du multiplicateur et celle-ci se déplace sur un cadran divisé en degrés B (*fig. 197*). Les fils du multiplicateur aboutissent aux bornes C, P. L'appareil est recouvert d'une cloche de verre pour soustraire les aiguilles à l'action des courants d'air.

Si l'on veut comparer de fortes intensités, on n'emploie qu'une aiguille aimantée; la seconde, extérieure, est en cuivre et sert d'index. Si l'on étudie des courants très faibles, on emploie un système astatique de deux aiguilles aimantées, l'une extérieure, l'autre intérieure.

Avec de très forts courants, on supprime le multiplicateur et on fait agir un seul fil sur l'aiguille.

Dans les galvanomètres très sensibles, l'aiguille ne repose pas sur un pivot vertical mais est suspendue à un fil de soie, comme le montre la figure.

Une lame de zinc et une lame de cuivre, unies par des fils conducteurs aux bornes du galvanomètre et plongées dans de l'eau de puits, donnent un courant capable de dévier de sa position un système astatique. On reconnaît ainsi que le courant va dans le fil du cuivre au zinc, comme nous l'avions indiqué en parlant de la pile.

**Aimantation par les courants.** — Arago<sup>1</sup> reconnut en 1823 que l'on pouvait aimanter le fer et l'acier à l'aide des courants électriques. Une aiguille d'acier placée perpendiculairement au fil conducteur d'une pile s'aimante; son pôle nord est à la gauche du courant défini par la règle d'Ampère<sup>2</sup>. Ampère et Arago augmentèrent beaucoup la régularité et la force de l'aimantation, en enroulant en hélice sur



Fig. 198. — Aimantation de l'acier par un courant.

un tube de verre un fil de cuivre recouvert de soie (*fig. 198*). Les spires du fil doivent se toucher, on peut en superposer plu-

1. Arago, né à Estagel en 1786, mort en 1853.

2. Ampère, né à Polemieux en 1775, mort en 1836.

sieurs tours et former ainsi une espèce de multiplicateur. On met dans le tube le barreau d'acier que l'on veut aimanter, et les extrémités du fil de l'hélice sont reliées aux conducteurs d'une pile. Un contact très court suffit pour produire l'aimantation. Le pôle nord se forme toujours à la gauche du courant.

Une barre de fer s'aimante dans l'intérieur de l'hélice, mais elle se désaimante aussitôt que le courant cesse.

**Electro-aimant.** — On produit un aimant temporaire très puissant, en plaçant une barre de fer pur B ou *fer doux* (fig. 199) dans une bobine A sur laquelle on enroule un gros fil de cuivre recouvert de soie ou de coton. On forme ainsi plusieurs couches de tours. Ce fil est traversé par un courant; si l'on se place en face de la base de la bobine de façon à voir le courant tourner autour d'elle de gauche à droite, comme le font les aiguilles d'une montre, le pôle qu'on a en face de soi est un pôle sud.

Cet appareil s'appelle un *électro-aimant*; on dit aussi un *électro*.

On donne souvent à la barre de fer que l'on veut aimanter et qui est cylindrique la forme d'un fer à cheval. Les extrémités de cette barre sont entourées de bobines a, b (fig. 200) sur lesquelles s'enroule un fil

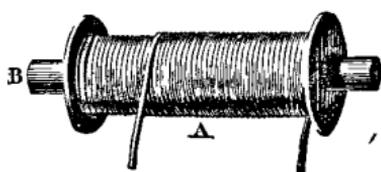


Fig. 199. — Electro-aimant.

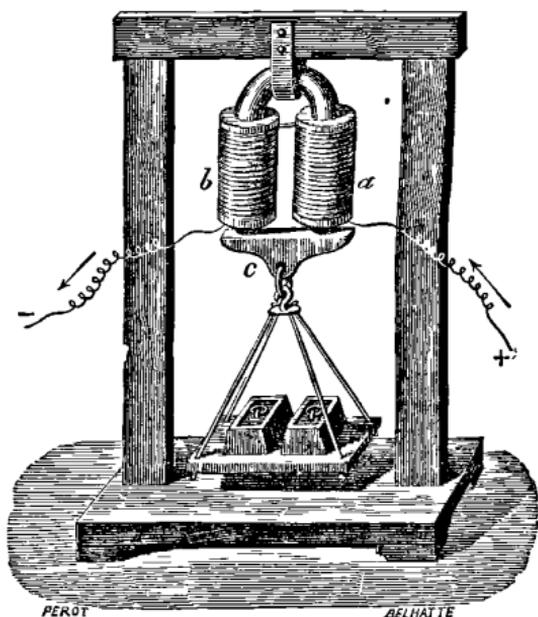


Fig. 200. — Electro-aimant en fer à cheval.

de cuivre recouvert de soie. Lorsqu'on regarde en face les

deux extrémités du fer à cheval, on voit que le sens de l'enroulement du fil change d'une branche à l'autre. D'un côté, il tourne de gauche à droite; de l'autre, de droite à gauche. Lorsque les extrémités du fil seront reliées aux conducteurs d'une pile, la barre de fer aura son pôle sud correspondant à la première bobine, son pôle nord sur la seconde branche.

L'appareil étant ainsi construit, on peut lui faire supporter une pièce de fer *c*, appelée *contact*, en l'appliquant sur les surfaces polaires. Ce contact porte un plateau sur lequel on place des poids considérables sans que la pièce de fer se détache de l'aimant.

Le contact tombe, si on interrompt le courant.

La désaimantation n'est complète que si les noyaux des bobines sont en fer doux. Avec le fer du commerce, ils conserveraient une partie de l'aimantation après la cessation du courant, et le contact resterait adhérent.

On atténue cet effet en interposant une feuille de papier entre les surfaces polaires et le contact; ce qui le maintient à une petite distance de ces surfaces.

**Electro-aimant à deux branches.** — On peut construire un électro-aimant avec deux bobines à noyau de

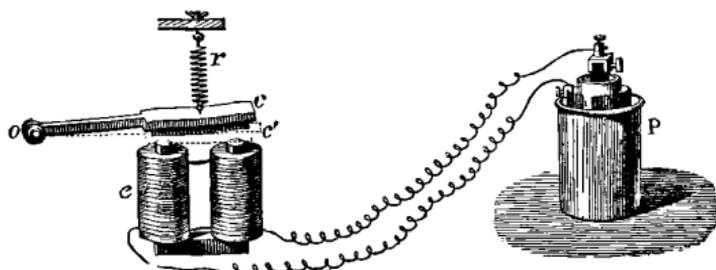


Fig. 201. — Electro-aimant à deux branches.

fer *e* (*fig.* 201) recouvertes d'un fil de cuivre isolé très fin et très long. Les deux noyaux de fer sont réunis d'un côté par une pièce de fer horizontale; les surfaces polaires sont en haut. Le contact *c*, porté par une tige de laiton mobile autour d'un axe horizontal *o*, est maintenu éloigné de ces surfaces par l'action d'un ressort *r*. Une pile *P* fournit le courant qui doit traverser le fil de l'électro.

Lorsque le courant passe dans le fil, le contact est attiré en  $c'$  malgré l'action du ressort. Si le courant cesse, cette action ramène le contact en arrière.

L'électro-aimant peut être placé très loin de la pile. S'il est réuni à ses pôles par des fils continus, convenablement isolés du sol, une personne placée près de la pile peut, en fermant le circuit et en l'ouvrant, déterminer les deux mouvements inverses du contact; et cela autant de fois qu'elle le voudra.

Ces mouvements peuvent avoir une signification convenue à l'avance entre deux personnes, l'une qui est près de la pile, l'autre près de l'électro-aimant.

De cette remarque très simple est née la *télégraphie électrique*.

**Télégraphie électrique.** — Le télégraphe électrique, prévu par Ampère, fut établi pour la première fois en 1838, par Wheatstone, entre Londres et Liverpool. Nous ne décrirons qu'un seul appareil, que l'on trouve en France dans la plupart des stations.

**Télégraphe Morse.** — Cet appareil fut imaginé en 1835 par l'Américain Morse.

Tout télégraphe se compose d'un appareil situé au point de départ, il sert à écrire la dépêche; c'est le *manipulateur*. Un autre appareil est placé à la station d'arrivée; il enregistre les signaux; c'est le *récepteur*.

**Récepteur.** — Un électro-aimant vertical A (*fig. 202*) est mis en communication par le fil de ligne avec le manipulateur placé à la station de départ. Un contact de fer doux  $b$  est au-dessus des surfaces polaires; il est porté par un levier horizontal  $ab$ , mobile autour d'un axe horizontal  $o$ . Un ressort  $d$  agit sur lui et maintient le contact éloigné de l'électro; sa course est réglée par des butoirs à vis  $e$ ,  $f$ .

L'extrémité  $a$  du levier est taillée en pointe arrondie. Elle est voisine d'un galet  $i$  qui tourne sur son axe et qui frotte constamment sur un galet plus large  $s$  recouvert d'encre d'imprimerie.

Une bande de papier, enroulée sur une roue B, passe sur

la poulie *t*, puis entre deux galets *h*, *g* serrés l'un contre l'autre. Un mouvement d'horlogerie placé dans la caisse les fait tourner en sens inverse l'un de l'autre. Ils attirent la bande de papier et la font avancer dans le sens de la flèche. Cette bande passe alors entre la pointe *a* et le galet encré *i*, sans les toucher.

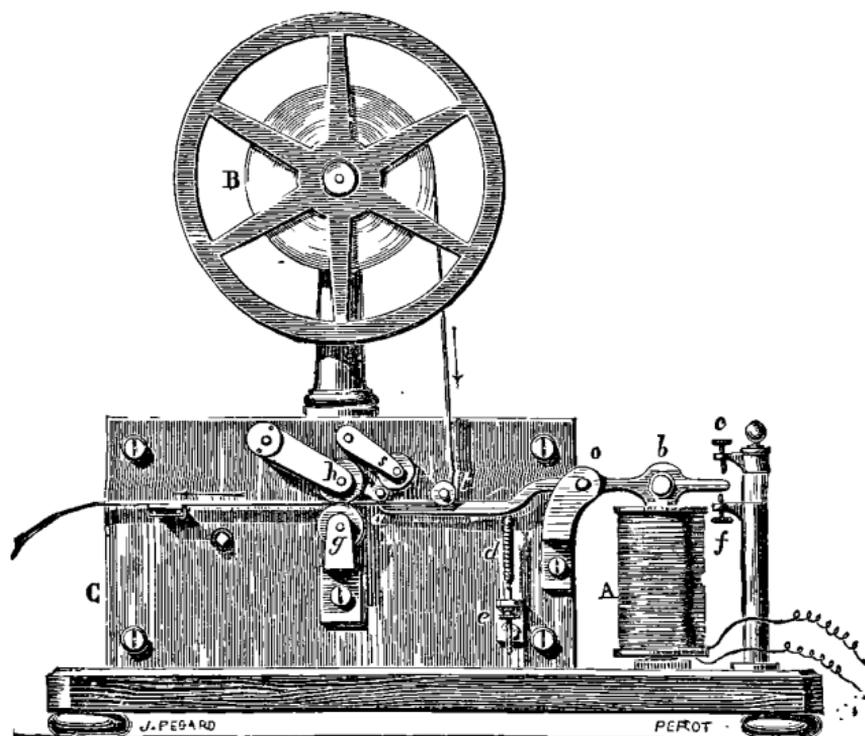


Fig. 202. — Récepteur du télégraphe Morse.

Lorsqu'un courant arrive dans l'électro, le contact est attiré, le levier *ab* bascule, la pointe *a* se relève, et pousse la bande de papier contre le galet *i*; il se forme une ligne noire sur le papier qui se déroule. Si la durée du courant est courte, cette ligne ne forme sur le papier qu'une tache de petites dimensions qu'on appelle un *point*. Si le courant dure plus longtemps, une ligne plus longue s'imprime sur la bande; c'est un *trait*. L'opérateur peut mettre en marche le mouvement d'horlogerie, lorsqu'il est averti de l'arrivée d'une dépêche; il l'arrête lorsque la dépêche est terminée.

**Manipulateur.** — Cet appareil est simple. Un levier métallique AB (*fig. 203*) est mobile autour de l'axe horizontal C. Il porte un bouton sur lequel la main s'appuie pour l'abaisser. Un ressort *s* le relève, lorsque la pression de la main cesse.

Ce levier communique, par son axe, avec le fil de ligne L. Une vis qui le traverse en B s'appuie sur une plaque métallique d'où part un fil de cuivre R se rendant au récepteur de cette station de départ et voisin du manipulateur.

Le conducteur positif d'une pile aboutit à la pièce E métallique qui, en temps ordinaire, est séparée du levier. Lorsqu'on abaisse celui-ci, on le met en contact avec cette pièce. Le courant de la pile passe dans le levier, dans son axe, arrive au fil de ligne L et, de là, parvient au récepteur de la station d'arrivée. Il se forme alors un signal sur la bande de papier de ce récepteur; ce sera un point, si le levier A ne reste abaissé que pendant un instant; ce sera un trait, si le contact du levier et de la pièce E est plus long.

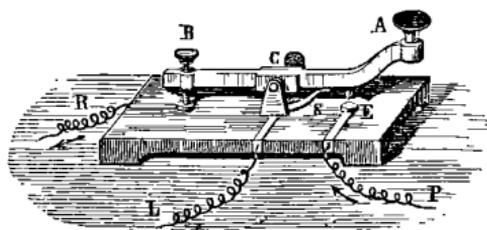


Fig. 203. — Manipulateur.

**Signes de convention.** — Les lettres de l'alphabet, les chiffres sont représentés par des combinaisons de traits grands et petits convenues à l'avance.

Nous donnons l'alphabet adopté pour le télégraphe Morse :

|   |       |   |       |
|---|-------|---|-------|
| a | ---   | n | ---   |
| b | ----  | o | ----- |
| c | ----- | p | ----- |
| d | ----  | q | ----- |
| e | -     | r | ---   |
| f | ----  | s | ---   |
| g | ----  | t | —     |
| h | ----  | u | ----  |
| i | --    | v | ----- |
| j | ----- | w | ----- |
| k | ----  | x | ----- |
| l | ----  | y | ----- |
| m | ---   | z | ----- |

L'habitude apprend aux employés à traduire promptement une dépêche en signes conventionnels et à la déchiffrer rapidement.

**Fils télégraphiques.** — Les fils qui unissent les bureaux télégraphiques et que nous avons appelés *fils de ligne* sont en fer ou en cuivre. On préfère maintenant ce dernier métal, plus conducteur que le premier. Ils sont, en France, supportés par des poteaux de bois. Ce corps n'est pas assez isolant, surtout quand il est humide, pour empêcher

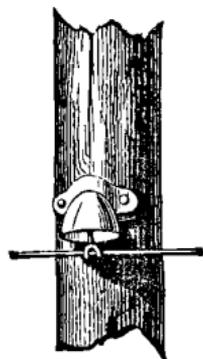


Fig. 204. — Poteau télégraphique.

une légère déperdition de l'électricité dans le sol. Ces déperditions, en se répétant un grand nombre de fois, affaibliraient le courant ou l'empêcheraient d'arriver à une station lointaine; c'est pourquoi on place à chaque poteau une plaque de porcelaine qui supporte à l'aide d'un crochet le fil de ligne (fig. 204). Au-dessus de ce crochet se trouve une petite cloche de porcelaine qui écarte les gouttes de pluie et maintient sèche une portion de la surface de porcelaine tout autour du crochet, ce qui suffit pour l'isoler.

Si on est forcé d'enfouir sous terre une portion de fil, on le recouvre de gutta-percha, substance végétale isolante. Il est, en outre, protégé par une gaine métallique.

Il n'y a qu'un fil entre deux bureaux. Faisons-le partir du pôle positif de la pile; nous mettrons le pôle négatif en communication directe avec le sol. Le courant traverse le manipulateur de la station de départ et arrive à celui de la seconde station. Ce dernier est au repos et le fil R conduit le courant au récepteur voisin. Il traverse le fil de l'électro et va se perdre dans le sol avec lequel celui-ci est en communication permanente. Le mouvement électrique se produit dans le fil comme s'il y avait un second fil de retour.

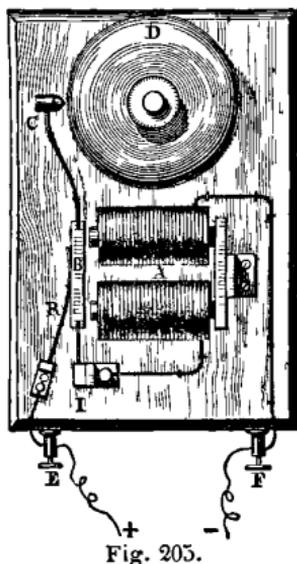
**Sonnerie électrique.** — On signale, de la station de départ, l'envoi d'une dépêche, en mettant en jeu une sonnerie électrique placée au second bureau. On trouve de telles

sonneries installées dans beaucoup de maisons. Nous allons décrire l'appareil employé dans ce dernier cas.

Le courant est fourni par deux ou trois couples Leclanché associés en série. Il arrive à la borne E (fig. 205) de la sonnerie et traverse un ressort d'acier R. Celui-ci s'appuie sur le contact B d'un électro-aimant A. Une lame d'acier soutient le contact et est fixée elle-même dans une borne I qui reçoit l'un des bouts du fil de l'électro. Le courant parvient donc à ce fil tant que le contact B et le ressort R se touchent. Le second bout du fil de l'électro arrive à la borne F et retourne au pôle négatif de la pile par un fil spécial. Le contact porte un marteau métallique C voisin d'un timbre D.

Lorsque le courant passe, l'électro subitement aimanté attire le contact et le marteau frappe sur le timbre; mais ce mouvement du contact l'éloigne du ressort R et interrompt le courant. L'aimantation disparaît et l'élasticité de la lame d'acier I ramène le contact en arrière. Le courant se rétablit et les mêmes mouvements recommencent. Il en résulte une série de chocs du marteau sur le timbre et par suite un carillon.

Pour mettre la sonnerie en action, on coupe en un certain endroit le fil conducteur de la pile; les deux bouts de ce fil sont soudés à deux lames métalliques placées l'une au-dessus de l'autre à une petite distance et qui, en temps ordinaire, ne se touchent pas. Si on appuie sur un bouton mobile placé sur l'une d'elles, on établit le contact des deux lames, et le courant se trouve lancé dans la sonnerie. Il cesse lorsqu'on cesse de presser sur le bouton.



## RÉSUMÉ ET EXERCICES

1° Reconnaître qu'il y a deux états des corps électrisés, et distinguer l'état *positif* de l'état *négalif*.

2° Reconnaître qu'un corps est électrisé, et quelle est la nature de son électricité.

3° Reconnaître de diverses manières qu'un corps est ou non bon conducteur de l'électricité.

4° Une boule de cuivre, portée par un manche isolant, est introduite dans un gobelet d'étain isolé lui-même. Les deux corps ne se touchant pas, si on électrise la boule de cuivre, quelle sera son action sur le vase qui l'enveloppe?

Quel changement se produirait-il dans l'état électrique du gobelet, si on cessait de l'isoler?

5° Décrire la machine de Rauxden, et en expliquer le jeu.

6° Décrire une bouteille de Leyde. — Indiquer comment on la charge, comment on la décharge, et pourquoi on dit que c'est un condensateur électrique.

7° Quels sont les principaux effets que l'on peut produire à l'aide de la décharge d'un corps électrisé? (Machine électrique ou batterie.)

8° Quelle est la nature de la foudre, et quels en sont les effets?

Les comparer à ceux que l'on produit par la décharge d'un corps électrisé.

9° Un nuage orageux flotte dans l'air. Quelle action exerce-t-il : 1° sur le sol? 2° sur un second nuage non électrisé, placé dans son voisinage?

Que se produira-t-il, si le vent rapproche les deux nuages, ou porte vers le sol le nuage orageux?

10° On place un oiseau dans une cage métallique, et, fixant cette cage au conducteur d'une machine, on l'électrise fortement.

L'oiseau est-il électrisé? Ressent-il des secousses, si on tire des étincelles de la cage en en approchant le doigt?

11° Une personne, qui a peur de l'orage, se réfugie dans une serre construite avec des barres de fer, qui s'entrecroisent pour supporter les vitres de la serre.

Y est-elle en sûreté? Et sa vie serait-elle en danger, si la serre venait à être frappée d'un coup de foudre?

12° Décrire une pile à un seul liquide montée en série. — Où sont les pôles de la pile? Comment pourrait-on reconnaître que les électricités, qui chargent ces deux pôles, sont différentes?

13° Décrire la pile de Daniell. Indiquer sommairement les phénomènes chimiques qui s'accomplissent dans chaque couple.

A quel moment il y aura-t-il un courant établi dans cette pile?

Quel sera le sens attribué au courant dans le circuit extérieur à la pile, et dans son intérieur?

14° Comment reconnaît-on qu'un fil métallique est traversé par un courant électrique, et quel est le sens de ce courant?

15° On coupe en un certain point un fil télégraphique, et on met les deux tronçons en communication avec les deux électrodes d'un voltamètre.

A quoi reconnaîtra-t-on que le fil est traversé par un courant, et quel est le sens du courant ?

16° Un courant électrique passe dans un voltamètre à eau, et dégage, en cinq minutes,  $100\text{cm}^3$  d'hydrogène mesurés à  $0^\circ$  sous la pression  $0^{\text{m}},760$ . Quel est le poids de ce volume de gaz, le poids spécifique est  $0,069$  de celui de l'air. Quel est le poids de l'eau décomposée en une seconde de temps ? — Quel est, en ampères, l'intensité du courant ?

17° Une aiguille aimantée est mobile, comme le fléau d'une balance, autour d'un axe horizontal. Elle est en équilibre dans une position verticale, le pôle nord en bas. On place, dans son voisinage, un fil de cuivre vertical, traversé par un courant descendant. Quelle position prendra l'aiguille sous l'action du courant ?

18° Une aiguille de galvanomètre horizontale est en repos sous l'action de la terre, sa direction est donc voisine de la méridienne. Comment faudrait-il placer, sur le prolongement de cette direction, un barreau aimanté, pour que son action détruisît celle de la terre, et rendît l'aiguille astatique.

19° Il part, des deux pôles d'une pile de télégraphe, deux fils de cuivre ; l'un, négatif, se rend directement dans le sol, l'autre, positif, y arrive en se rendant, par le fil de ligne, au récepteur non isolé d'une station éloignée.

Comment reconnaîtra-t-on, dans l'une et l'autre station, que chacun des deux fils est traversé par un courant, lorsqu'on envoie un signal ?

20° Comment peut-on produire, à l'aide d'un courant électrique, une lumière assez intense pour réaliser l'éclairage électrique d'un magasin ?

# COURS DE TROISIÈME ANNÉE

---

## LIVRE PREMIER

### NOTIONS SUR LES FORCES

---

#### CHAPITRE PREMIER

##### Du mouvement.

Les notions que nous allons donner sur les forces et sur les effets qu'elles produisent seront fondées sur l'observation et l'expérience. C'est ainsi que Galilée les a acquises et les a fait connaître, en partie du moins.

Ces notions ont été heureusement complétées et étendues par l'emploi des mathématiques. Ainsi développées, elles forment une branche de la science qui porte le nom de *mécanique*.

Je n'ai pas besoin de dire que les pages qui suivent ne constituent pas un cours de mécanique, même élémentaire. Ce sont des notions incomplètes qui s'appuient principalement sur des faits observés et sur des théorèmes de mécanique qui sont alors énoncés sans démonstration suffisante.

**Principe d'inertie. La matière est inerte.** — En dehors des êtres animés, les corps matériels qui nous entourent ne peuvent quitter d'eux-mêmes l'état d'immobilité apparente ou de repos où ils sont placés.

Ce fait est trop connu pour que j'insiste sur ce point.

En conséquence de ce principe, pour qu'un tel corps se déplace, il faut qu'il soit choqué par un autre corps mis lui-même en mouvement, ou qu'il subisse directement une action extérieure que nous appelons une *force*; cette dernière condition comprend la première, car le corps matériel qui en choque un autre doit son mouvement à l'action d'une force.

**Force.** — D'où vient cette force? C'est tantôt l'action de la terre, la pesanteur, qui fait tomber à sa surface tout corps qui n'est pas soutenu. Elle fait couler l'eau d'un fleuve sur un terrain en pente, depuis sa source jusqu'à son embouchure et elle entraîne avec elle tous les corps qui flottent à sa surface.

Ailleurs, c'est le vent qui pousse les voiles d'une barque, ou fait tourner les ailes d'un moulin.

La chaleur donne à la vapeur d'eau cette force d'expansion si utilement employée dans nos machines. L'électricité prend également sa place dans l'industrie comme force motrice.

Enfin, la vie donne aux animaux et à l'homme la puissance nécessaire pour mettre en mouvement les corps inertes qui les entourent ou bien leur propre corps.

Il y a une seconde face de l'inertie qu'il faut indiquer. Un corps inerte ne peut changer de lui-même l'état de mouvement où il a été mis par une force.

Celle-ci peut n'agir sur lui que pendant un temps limité, parfois très court; c'est le cas d'un boulet lancé par l'explosion de la poudre.

Il prend, au sortir de l'arme, un mouvement rapide qui, je le suppose, lui fait parcourir sur une ligne droite, horizontale, une longueur de 300 mètres par seconde. C'est ce que nous appellerons sa vitesse. Il continue à se mouvoir en ligne droite; de lui-même, il ne peut changer la direction horizontale de son mouvement. Il conserve sa vitesse; de lui-même il ne peut l'altérer.

Dans la réalité des faits, il faut bien constater que le boulet décrit une ligne courbe qui le ramène à terre. C'est que

la pesanteur ne cesse d'agir sur lui et c'est elle qui le fait tomber à terre, comme elle le ferait s'il était en repos.

Si, après avoir touché le sol, le boulet roule sur un plan horizontal, la pesanteur semble ne plus intervenir pour gêner son mouvement, puisqu'il est soutenu par le sol. Elle agit cependant ; elle presse le corps sur le plan horizontal et détermine un frottement qui finit par anéantir son mouvement. Il roule plus longtemps sur la glace que sur un sol raboteux, parce que, dans le premier cas, le frottement est moindre.

Pour vérifier au complet les effets de l'inertie, il faudrait soustraire le corps mobile à l'action de toute force étrangère, ce qui n'est pas réalisable.

Observons cependant le mouvement de la mesure de rotation de la terre autour de la ligne des pôles. Sa durée est notre *jour*. Elle n'a pas varié depuis que les hommes ont pu la mesurer.

Depuis des siècles, la vitesse de chacun de ses points est restée la même. Chacun d'eux décrit la même circonférence de cercle en un jour de vingt-quatre heures ; la moitié de cette circonférence en douze heures ; la millième partie de la circonférence dans la millième partie d'un jour. C'est la meilleure preuve que nous puissions donner de l'inertie des corps qui la composent ; les seuls que nous connaissions bien, les seuls qui doivent nous occuper ici.

**Mouvement.** — Nous sommes assis sur une pierre et nous nous jugeons immobiles. Devant nous se trouve un clocher que nous déclarons également immobile, estimant que la distance qui nous en sépare est toujours la même. Un oiseau est dans l'air et nous voyons varier, soit en augmentant, soit en diminuant, la distance qui le sépare du coq du clocher. Nous en concluons que l'oiseau se meut, qu'il s'éloigne ou se rapproche du point que nous considérons comme immobile ; c'est par des observations de ce genre que nous reconnaissons le mouvement d'un corps. Ce que nous observons ainsi, c'est le mouvement d'un corps relativement à un autre que nous croyons immobile.

L'immobilité n'est qu'apparente, car nous sommes, ainsi

que tous les corps qui nous entourent, entraînés par la terre dans son mouvement de rotation autour de la ligne des pôles et dans le second mouvement qui la fait circuler dans l'espace autour du soleil. Nous ne pouvons donc observer que des mouvements *relatifs* et non des mouvements réels, c'est-à-dire rapportés à un point réellement immobile ; nous n'en connaissons pas, d'une manière certaine, dans le monde entier.

**Trajectoire.** — Si nous réduisons à de très petites dimensions le corps mobile, un grain de poussière, par exemple, nous pourrions lui donner le nom de *point matériel*. En se transportant dans son mouvement d'une position à une autre, il passe par des positions intermédiaires situées sur une ligne droite ou courbe qu'on appelle la *trajectoire*.

Le mouvement est dit *rectiligne* si la ligne est droite : c'est le cas d'un point matériel qui tombe sous l'action de la pesanteur. Il est *curviligne* si le point décrit une courbe, s'il est sur une roue qui tourne.

Une trajectoire rectiligne AB donne la direction du mouvement. Le point matériel peut parcourir cette ligne droite en



Fig. 206.

allant de A à B ou de B à A (*fig. 206*). Ce sont deux mouvements de *sens opposés*.

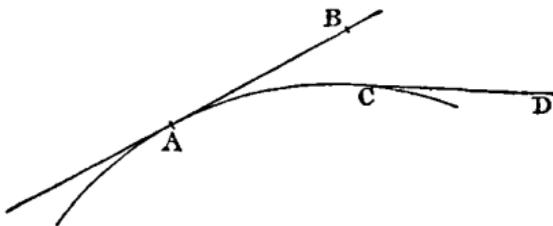


Fig. 207.

Lorsque la trajectoire est une ligne courbe (*fig. 207*) et que le mobile est au point A, la direction du mouvement est donnée par la ligne AB, tangente à la courbe au point A ;

plus tard, lorsque le mobile sera au point C, la tangente CD donnera une nouvelle direction du mouvement. On voit qu'elle change d'un point à l'autre.

**Mouvement uniforme.** — Un point matériel qui parcourt sur sa trajectoire des longueurs égales dans des temps égaux, quelque petits qu'ils soient, a un *mouvement uniforme*.

Tel est le mouvement de rotation de la terre autour de son axe; tel, le mouvement d'un corps qui, soumis quelque temps à une force, puis soustrait à son action, se meut par inertie.

L'espace parcouru par le mobile pendant un temps pris pour unité, est la *vitesse* du mouvement.

Dès lors, l'espace parcouru dans un certain nombre d'unités de temps se calcule en multipliant la vitesse par ce nombre. De même, on calcule la vitesse en divisant l'espace par le temps employé à le parcourir.

On peut encore dire que *les espaces parcourus avec la même vitesse sont proportionnels aux temps qui mesurent la durée du parcours*.

En représentant la vitesse par la lettre  $v$ , le temps par  $t$ , l'espace parcouru par  $e$ , on a :  $e = vt$ . C'est la formule qui convient au mouvement uniforme.

Les mouvements ainsi définis diffèrent par la vitesse.

La vitesse de la lumière est de 300 000 kilomètres par seconde.

Celle du son est de 340 mètres également par seconde.

La grandeur numérique de la vitesse dépend des grandeurs que l'on a choisies pour unités de longueur et de temps.

Ainsi, la vitesse de la lumière n'est plus que 75 000 lieues, si on prend pour unité de longueur la lieue de 4 kilomètres.

On fera connaître la vitesse d'une locomotive en disant qu'elle a une vitesse de 15 lieues à l'heure, ou d'un kilomètre par minute ou de 16<sup>m</sup>,66 par seconde.

**Mouvement varié.** — Un mouvement est varié lorsque le mobile parcourt dans le même temps des longueurs différentes.

Ce sont ces mouvements que l'on rencontre le plus fréquemment.

Un mobile parcourt 35 mètres en 5 secondes ; peu après 48 mètres en 6 secondes.

Un second corps marchant d'un mouvement uniforme parcourrait le premier espace, 35 mètres, en 5 secondes avec une vitesse de  $\frac{35}{5}$  ou de 7 mètres par seconde ; et, pour faire 48 mètres en 6 secondes, il lui faudrait une vitesse de  $\frac{48}{6}$  ou 8 mètres.

Ces nombres, 7 mètres et 8 mètres, donnent la *vitesse moyenne* du mobile, dans le cas du mouvement varié. C'est encore le quotient d'un espace par le temps employé à le parcourir.

Nous sommes dans une gare et nous voyons arriver une locomotive qui marche à pleine vapeur.

Elle marche à grande vitesse. - Mais qu'appellerons-nous vitesse dans ce cas ?

Si l'on nous dit qu'elle vient de parcourir 300 kilomètres en six heures, nous aurons une vitesse moyenne de 50 kilomètres à l'heure. Mais cela ne nous donne aucun renseignement sur la vitesse d'arrivée qui, au gré du mécanicien, peut être grande ou faible. Nous en aurons une idée plus nette si nous savons que le mobile a parcouru en 24 secondes les 500 mètres qui précèdent la gare ; la vitesse moyenne,  $\frac{500}{24}$ , est alors 20<sup>m</sup>,8 par seconde. Si les 50 derniers mètres ont été franchis en 2,5 secondes, la vitesse moyenne, 20 mètres, a une valeur bien voisine de la vitesse réelle que nous cherchons à définir ; enfin, si on nous disait que, lorsque la locomotive passe devant nos yeux, elle fait 1<sup>m</sup>,995 en un dixième de seconde, on pourrait considérer sans grande erreur le quotient  $\frac{1,995}{0,1} = 19<sup>m</sup>,95$  comme représentant la vitesse du mobile au moment considéré.

Nous définirons donc la vitesse d'un mobile à un moment

donné, la valeur que prend la vitesse moyenne lorsqu'on l'évalue pendant un temps aussi court que possible, de telle sorte que l'on puisse considérer comme uniforme le mouvement du mobile pendant ce temps.

Il y aurait, dans le cas que nous avons choisi, un moyen pratique de mesurer la vitesse du mobile; ce serait de lâcher la vapeur, et de laisser la locomotive marcher en vertu de l'inertie, ou, comme on dit encore, en vertu de sa *vitesse acquise*. Celle-ci ne diffère pas de la dernière des vitesses que la vapeur avait donnée au mobile; par suite de la disparition de la force, le mouvement cesse de varier, devient uniforme, et l'espace que le mobile parcourt en une seconde mesure la vitesse cherchée.

**Force.** — Nous donnons le nom de force à toute cause qui modifie l'état de repos ou de mouvement d'un corps. Une variation de vitesse, un changement de direction du mouvement sont, disons-nous, les effets d'une force. La nature de la force : pesanteur, chaleur, électricité, nous est inconnue.

Pour nous représenter les qualités d'une force, il faut étudier les effets que nous lui attribuons.

Nous prendrons pour type la pesanteur. Nous allons donc indiquer rapidement ce que l'expérience nous apprend sur le mouvement d'un corps qui tombe, et comment on en déduit les caractères de la force qui le fait tomber.

**Lois de la chute des corps.** — Nous savons déjà, qu'un point matériel pesant suit, en tombant librement, une ligne droite, *verticale*, dirigée vers le centre de la terre, supposée sphérique<sup>1</sup>.

Tous les corps tombent dans le vide avec la même vitesse, quel que soit leur poids, quelle que soit leur nature.

Les lois du mouvement d'un corps pesant ont été trouvées par Galilée, à la suite d'expériences ingénieuses et très simples.

**Lois des espaces.** — *Les espaces parcourus en chute*

1. Voy. p. 114.

*libre par un corps pesant qui part du repos sont proportionnels aux carrés des temps employés à les parcourir.*

En France, un corps qui part du repos, et qui tombe verticalement parcourt  $4^m,9$  dans la première seconde de sa chute. L'espace parcouru en deux secondes est quatre fois plus grand ou  $19^m,8$ . Il serait neuf fois plus grand en trois secondes ou  $44$  mètres.

Dans un temps représenté par  $t$  l'espace parcouru  $e$  est donné par la formule  $e = 4,9 \times t^2$  mètres.

**Lois des vitesses.** — Un corps pesant, qui a été soumis à l'action de la pesanteur pendant un certain temps, ne s'arrête pas si l'on parvient à neutraliser l'action de la pesanteur. Il se meut alors par inertie, d'un mouvement uniforme. La vitesse de ce mouvement est la vitesse acquise par le mobile, sous l'action de la pesanteur.

La vitesse d'un corps pesant au bout d'une seconde de chute est, à Paris,  $9^m,8^1$ .

Elle est double, triple, etc., si la durée de la chute est deux ou trois secondes. Ce qu'exprime la loi suivante.

*Les vitesses d'un corps qui tombe sont proportionnelles aux durées de la chute.*

La vitesse  $9^m,8$  acquise au bout d'une seconde est double de l'espace  $4^m,9$ , parcouru par le corps pendant cette seconde, sous l'action de la pesanteur.

Si on représente par  $t$  la durée de la chute, et par  $V$  la vitesse,  $V = 9,8 \times t$  mètres.

La vitesse augmente de  $9^m,8$  à chaque seconde de chute; elle s'accroît de  $0^m,98$  en un dixième de seconde, de  $0^m,098$  en un centième, etc.

Le mouvement n'est donc pas uniforme, puisque la vitesse change à chaque instant.

Comme les accroissements de vitesse sont égaux dans des temps égaux, quelque petits que soient ces temps, le mouvement d'un corps qui tombe est d'une espèce particulière; on dit qu'il est *uniformément varié*.

1. Exactement,  $9^m,81$ .

L'accroissement de vitesse par unité de temps, c'est ici la seconde, s'appelle l'*accélération*.

Dans un mouvement uniformément varié, l'accélération est toujours la même;  $9^m,8$  par seconde pour la chute des corps pesants.

On ne peut songer à vérifier exactement les lois de la pesanteur dans une école; cependant les élèves comprennent mieux ce qu'ils ont vu.

C'est ce qui nous engage à décrire une série d'expériences faciles à réaliser, elles ont été imaginées par le physicien Atwood.

### Machine d'At-

**wood.** — Une poulie *a* (fig. 208) très mobile est placée sur un support fixe à une certaine distance du sol. Un cordon de soie passe sur la gorge de la poulie et supporte à ses deux extrémités deux poids égaux *m*, *n* qui se font équilibre. Une règle verticale *r*, divisée en centimètres, est placée derrière le fil; elle porte trois plaques métalliques *s*, *p*, *q*. Deux d'entre elles, *p*, *q*, peuvent glisser le long de la règle. On les fixe à une hauteur convenable à l'aide de

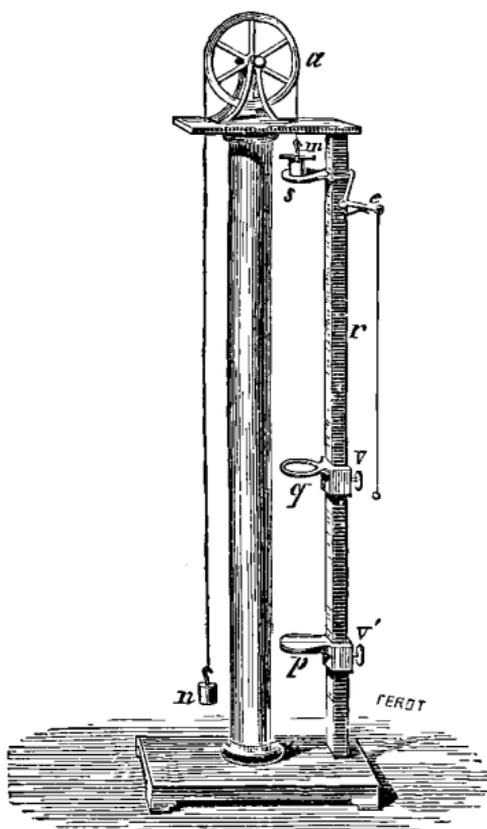


Fig. 208. — Machine d'Atwood.

vis de pression *v*, *v'*. On les appelle des *courseurs*. L'un *p* est plein et arrête le poids qui tombe; l'autre *q* a la forme d'un anneau.

La plaque d'arrêt *s* est fixe. Elle peut basculer autour

d'un axe horizontal; on y place, au début, le poids  $m$  dont on veut étudier la chute. Un petit levier coudé  $e$  pressé par un ressort la maintient horizontale; mais, si on le tire de haut en bas à l'aide d'un cordon, il se produit un déclanchement qui rend libre la plaque  $s$ ; elle prend alors la position verticale, le poids  $m$  cesse d'être soutenu et tombe.

La pesanteur ne peut donner aucun mouvement aux deux poids  $m, n$  s'ils sont égaux, car le cordon de soie est tiré également, en sens inverse, par ces deux poids.

Admettons que chacun d'eux pèse 90 grammes. Ajoutons sur le corps  $m$  un nouveau poids de 20 grammes; il détermine la chute du poids surchargé et le mouvement ascendant du poids  $n$ . Le mouvement général est plus lent que si le poids de 20 grammes tombait seul en chute libre; car il ne peut se mouvoir sans entraîner les deux corps  $m, n$  qui pèsent ensemble 180 grammes.

La pesanteur met en mouvement un ensemble de corps qui pèsent 200 grammes; l'effort utile qu'elle exerce n'est que 20 grammes. L'expérience montre que le système ne parcourt plus  $4^m,9$  pendant la première seconde de chute, comme il le ferait en chute libre, mais un espace dix fois moindre  $0^m,49$ .

C'est toujours la pesanteur qui est la seule force motrice. Le mouvement du corps qui tombe est encore uniformément varié, comme il le serait en chute libre: mais les deux mouvements diffèrent par la grandeur absolue des espaces parcourus ou des vitesses acquises en un même temps.

Nous avons besoin de mesurer le temps. Pour cela nous accrochons à un clou un fil qui soutient à sa partie inférieure une balle de plomb d'un centimètre de diamètre. La distance du clou au bord inférieur de la balle étant d'un mètre, nous aurons un pendule qui battra sensiblement *la seconde*. La durée d'une oscillation de ce pendule sera pour nous l'*unité de temps* que, pour abrégé, nous appellerons une seconde.

On a réglé d'avance les poids  $m, n$  de telle sorte que l'espace parcouru par  $m$  pendant une oscillation du pendule soit de  $0^m,15$ . La masse surchargée  $m$  est sur la plaque d'arrêt  $s$ ;

le curseur plein  $p$  est à  $0^m,15$  de  $s$ ; le pendule est mis en mouvement. On convient de compter quatre oscillations du pendule avant de déclencher la plaque d'arrêt.

On produit le déclenchement au commencement de la cinquième seconde. Le poids  $m$  frappe le curseur  $p$  à la fin de cette seconde.

On recommence l'expérience en plaçant le curseur  $p$  à  $0^m,60$  du point de départ. C'est à la fin de la quatrième seconde que s'abaisse la plaque d'arrêt  $s$  qui soutient de nouveau le corps; c'est à la fin de la sixième que celui-ci rencontre le curseur  $p$ ; l'espace parcouru en deux secondes est quatre fois plus grand que celui qui convient à une chute d'une seconde de durée.

Si on plaçait le curseur  $p$  à  $1^m,35$  de la plaque d'arrêt, le corps  $m$  mettrait trois secondes à aller de l'une à l'autre. Cet espace est neuf fois plus grand que le premier.

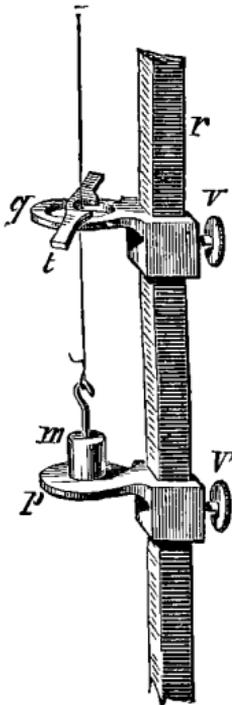


Fig. 202.  
Vérification de la loi  
des vitesses.

**Vérification de la loi des vitesses.** — Nous donnons au poids additionnel  $t$  (fig. 209) une forme allongée telle qu'il soit arrêté par le curseur annulaire; ce dernier est assez large pour laisser passer la masse principale  $m$ .

Nous plaçons le curseur annulaire à la division 15, et, opérant toujours comme nous l'avons dit, nous laissons tomber le poids surchargé. Il arrive en une seconde au curseur  $q$  et y abandonne son poids additionnel. A partir de ce moment, le fil supporte deux poids égaux  $m, n$ ; il n'y a plus de force motrice. Cependant, leur mouvement ne s'arrête pas et nous avons là une démonstration expérimentale de leur inertie. Nous plaçons le curseur plein  $p$  à une telle distance du premier  $q$ , que le corps  $m$ , se mouvant par inertie, mette une seconde à aller de l'un à l'autre. La distance des deux curseurs est  $0^m,30$ .

Recommençons l'expérience en laissant en place l'anneau  $q$ , mais en plaçant le curseur plein  $p$  à  $0^m,60$  de celui-ci ; il faudra *deux* secondes pour franchir cet espace.

Le corps  $m$  a donc un *mouvement uniforme* aussitôt que la pesanteur cesse d'agir sur lui comme force motrice.

La vitesse de ce mouvement est  $0^m,30$ , c'est la vitesse acquise par le corps lorsqu'il est tombé, pendant une seconde, sous l'action de la pesanteur ; c'est l'*accélération* du mouvement uniformément varié.

Remarquons qu'elle est double de l'espace parcouru par le corps pendant cette seconde.

On refait l'expérience en plaçant le curseur annulaire à la division 60, et le curseur plein à la division 120. Le corps  $m$  parti de  $s$  atteint en *deux* secondes l'anneau  $q$  ; il y laisse le poids additionnel et prend après cela un mouvement uniforme qui l'amène au bout d'une seconde sur le curseur plein.

La vitesse acquise au bout de deux secondes de chute est ici de  $0^m,60$ , double de ce qu'elle était dans l'expérience précédente.

Les lois de Galilée se trouvent vérifiées par ces expériences qui conviennent à des chutes lentes produites cependant par la seule action de la pesanteur.

Nous admettrons que la vérification serait aussi complète si le corps tombait en chute libre.

Alors, l'accélération que nous désignerons par  $g$  est  $9^m,8$ , et les lois précédentes peuvent se résumer en deux formules :

$$e = 1/2 gt^2 \text{ et } v = gt.$$

On en déduit en éliminant le temps :

$$v^2 = 2ge$$

qui fait connaître la vitesse acquise par un corps qui tombe d'une hauteur égale à  $e$ .

**Force de la pesanteur.** — L'effet de la pesanteur sur un corps qui tombe est de faire varier la vitesse de son mouvement et de l'accroître de  $9^m,8$  après chaque seconde

de chute. Il est naturel de considérer cet accroissement comme proportionnel à l'intensité de la force.

Remarquons encore que, si l'accroissement de vitesse est de  $9^m,8$  par seconde, il est de  $0^m,98$  en un dixième de seconde; de  $0^m,098$  en un centième.

L'intensité de la pesanteur reste donc la même pendant toute la durée de la chute; autrement dit, la pesanteur est une force d'intensité constante.

### **Proportionnalité des forces aux accélérations.**

— Une force d'intensité constante, quelle qu'elle soit, agirait sur un corps comme le fait la pesanteur, et, si elle était seule, lui donnerait un mouvement uniformément varié. Si on fait agir successivement plusieurs forces constantes sur le même corps, il prend des mouvements qui diffèrent par la grandeur de l'accélération

*Ces accélérations sont proportionnelles aux intensités de ces forces.*

Cette loi est donnée comme un fait d'expérience.

Reprenons les expériences de la machine d'Atwood en les modifiant un peu.

Les deux masses principales pèsent 90 grammes, le poids additionnel est 20 grammes, la masse totale mise en mouvement est 200 grammes. Supposons-la composée de pièces de 10 centimes pesant 10 grammes. Dans une première expérience déjà décrite nous mettons neuf pièces d'un côté, et onze de l'autre, et l'accélération mesurée par expérience est  $0^m,98$ . La force motrice est 20 grammes.

Mettons sept pièces à l'une des extrémités du fil et treize à l'autre. Nous trouverons par expérience que l'accélération est doublée,  $1^m,76$ . La masse qui se meut pèse toujours 200 grammes, mais la force motrice est 40 grammes, double de la précédente.

On peut varier dans ce sens les expériences et l'on vérifiera toujours le principe énoncé : la proportionnalité des forces aux accélérations.

L'intensité de la pesanteur varie, à la surface de la terre, lorsqu'on passe du pôle à l'équateur.

Imaginons que l'on détermine à Paris et à Lima le chemin que parcourt un corps pesant dans la première seconde de sa chute. On le trouve de 4<sup>m</sup>,9048 à Paris et 4<sup>m</sup>,8917 à Lima.

Si nous doublons ces nombres, nous aurons les accélérations produites par l'action de la pesanteur agissant sur le même corps à Lima et à Paris : 9,7834 et 9,8096. Nous en concluons que l'action de la pesanteur n'est pas la même dans les deux villes.

Cette action de la pesanteur sur un corps est le *poids* de ce corps, et on sait que l'unité de poids est le kilogramme, c'est-à-dire le poids d'un décimètre cube d'eau pure, dont la température est 4°, évaluée à Paris, et dans un espace vide d'air. A Lima, ce poids serait, d'après la loi énoncée,

$$1^{\text{kg}} \times \frac{9,7834}{9,8096} \text{ ou } 0^{\text{kg}},9973.$$

On déduit, d'expériences analogues, que si l'intensité de la pesanteur est constante dans un même lieu, elle varie d'un lieu à l'autre. Elle va en croissant lorsque, partant de l'équateur, on se dirige vers les pôles.

Un corps qui pèse 5 kilogrammes à Paris ne pèse plus que  $5 \times 0,9973$  ou 4<sup>kg</sup>,9865 à Lima. Si nous divisons les deux poids par les accélérations correspondantes, nous trouverons le même quotient :

$$\frac{5}{9,8096} = \frac{4,9865}{9,7834} = 0,51.$$

C'est la traduction arithmétique de la loi de proportionnalité. Ce quotient 0,51 s'appelle la *masse* du corps. Elle ne change pas, quand on transporte le corps d'un lieu à un autre et elle caractérise le corps au point de vue de la mécanique.

La masse d'un corps est le quotient de son poids *P* par l'accélération *g* qui convient à sa chute libre.

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

Le poids est le produit de la masse du corps par l'accélération  $g$ .

$$P = mg.$$

La masse de l'unité de volume d'un corps est la *densité*  $D$  du corps.

Le poids de l'unité de volume est le *poids spécifique*  $p$  de ce corps.

La densité est donc le quotient du poids spécifique par le nombre  $g$ , qui convient au lieu où l'on se trouve : 9,8096 à Paris.

On voit que dans un même lieu les densités sont proportionnelles aux poids spécifiques.

Si on prend pour unité de densité celle de l'eau, c'est aussi l'unité des poids spécifiques, les nombres qui représentent les poids spécifiques représenteront également les densités relatives des corps.

Dire que le poids spécifique du fer est sept fois plus grand que celui de l'eau, c'est dire aussi que la densité du fer est sept fois plus grande que celle de ce liquide.

## CHAPITRE II

### Mesure des forces.

La pesanteur nous a donné l'exemple d'une force agissant sur un corps matériel. Cette force est le *poids* du corps. On peut la considérer comme agissant sur un seul point du corps, le *centre de gravité* ; c'est son *point d'application*. Sa direction est la *verticale*, c'est celle du mouvement qu'elle imprime au corps lorsqu'elle est seule à agir sur lui. Elle agit de haut en bas ; c'est, en effet, le sens du mouvement. Sa grandeur ou son *intensité* est toujours la même dans le même lieu : c'est une *force constante*.

Cette intensité est définie par ce fait que le *poids* agissant sur un corps qui tombe pendant plusieurs secondes augmente sa vitesse de  $9^m,81$  après chaque seconde de chute.

On peut opposer une seconde force à celle de la pesanteur, de façon à s'opposer à la chute du corps ; l'homme peut soutenir celui-ci par la contraction de ses muscles. Si le corps matériel pèse un kilogramme et est attaché à une corde, la main qui maintient le corps immobile en tirant sur cette corde exerce sur lui une force verticale, dirigée de bas en haut et justement égale au poids du corps, c'est-à-dire à la force de la pesanteur. On dit, dans ce cas, que les deux forces, l'action de la main et celle de la pesanteur, se font *équilibre*.

Si on attache à la corde un second corps pesant encore un kilogramme, il faudra un effort plus grand pour faire équilibre à ces deux poids ; il sera double du premier.

Ces exemples, que l'on pourrait multiplier, montrent que les intensités des forces sont des quantités dont on peut définir l'égalité.

Deux forces sont égales lorsque, agissant sur le même point matériel, dans une même direction, mais en sens opposé, elles se font équilibre, c'est-à-dire lorsqu'elles maintiennent ce point immobile.

Une force est double, triple d'une autre lorsque, pour lui faire équilibre, il faut lui opposer deux ou trois forces égales à la première, ayant le même point d'application et la même direction que celle-ci, mais tirant en sens contraire de la force considérée.

Les intensités de deux forces s'ajoutent si elles tirent le même point, dans le même sens et dans une direction unique. Elles se retranchent, si, la direction étant la même, leurs sens sont opposés.

Il résulte de ces notions un moyen de mesurer les forces.

**Unité de force.** — Nous choisissons pour unité de force le *kilogramme* : c'est le poids d'un décimètre cube d'eau, prise à  $4^{\circ}$ , ce poids étant déterminé à Paris et dans le vide.

Pour mesurer une force, nous lui opposerons une autre

force qui lui fasse équilibre et que nous puissions évaluer en kilogrammes.

Les appareils le plus souvent employés utilisent la force de réaction d'un ressort tendu. On leur donne le nom de *pesons* ou de *dynamomètres* (mesureurs de forces).

**Réaction.** — Lorsqu'on agit sur une lame d'acier pour la courber, on se sent attiré par elle; l'acier résiste, et la force qu'on exerce sur lui développe une force égale et contraire qui constitue son *élasticité*. Cette *réaction* du corps est une conséquence de l'*action* de la force, elle dure autant qu'elle et cesse lorsque la force cesse d'agir.

On pose, en principe, que toute action, ce qui veut dire toute force, fait naître une réaction qui lui est égale et qui agit en sens opposé.

C'est ainsi qu'un aimant mobile est attiré par un morceau de fer que l'on tient à la main. C'est un effet de la réaction du fer sur l'aimant qui l'attire.

La terre attire la lune et tend à la faire tomber à sa surface, comme un corps pesant; par une réaction naturelle, la lune attire la terre. Cette attraction, sensible sur la mer, produit le phénomène des marées.

**Peson.** — Un fil d'acier roulé en hélice est une forme de ressort fort commune (*fig. 210*). Ces *ressorts à boudin* sont employés dans la confection des sommiers de lits. C'est le moteur des lampes à modérateur. On en fait aussi des pesons.

Un tel peson se compose de deux tubes de laiton B, C, qui entrent l'un dans l'autre. Un fil d'acier roulé en hélice est attaché à la partie supérieure du cylindre extérieur B, l'extrémité inférieure du ressort, se prolonge en une tige qui est fixée au tube intérieur C et qui se termine au dehors par un crochet D. Une rainure *ab*, pratiquée dans le cylindre B, livre passage à un index E fixé au tube C. Celui-ci se déplace

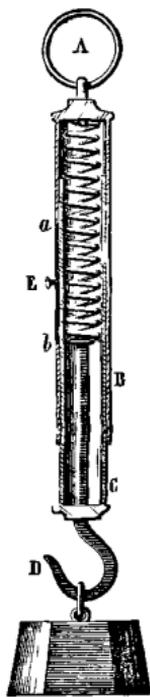


Fig. 210.

verticalement le long d'une règle graduée, lorsqu'on tire en sens contraire sur l'anneau A et sur le crochet D.

Pour graduer le peson en kilogrammes, il faut accrocher l'anneau A à un obstacle fixe et charger le crochet D d'un poids connu : un kilogramme par exemple. L'effet du poids est d'entraîner le cylindre C et d'écarter les spires du fil d'acier. L'élasticité du métal est mise en jeu, elle développe une force qui arrête le poids et amène l'index en une certaine place sur la règle *ab*. On marque d'un trait cette place, elle correspond à la charge d'un kilogramme.

En portant cette charge à deux, cinq, dix kilogrammes, on détermine des allongements du ressort qui vont en croissant. Le cylindre C s'abaisse de plus en plus et on marque à chaque fois la position de l'index E. On grave vis-à-vis de chaque trait un chiffre qui indique la charge correspondante du peson et celui-ci se trouve gradué en kilogrammes.

Imaginons une force quelconque, qui ait pour point d'application le crochet D et qui tire dans la direction de l'axe des cylindres BC; supposons que sous l'action de cette force l'index se déplace et se maintienne vis-à-vis la division 15 de la règle graduée : nous en concluons que l'intensité de la force est de 15 kilogrammes.

Dans certains de ces appareils, l'acier est employé sous forme de lames qui se courbent plus ou moins sous l'action des forces. Le principe de ces appareils est toujours le même.

Deux lames d'acier L, N (fig. 211) sont articulées sur deux tiges *a*, *b* et forment avec elles un rectangle, quand il n'y a pas de force à agir. L'anneau A fixé à la lame L sert à fixer l'appareil. La force est appliquée au crochet C, qui fait corps avec la lame N; nous la représentons par le poids P.

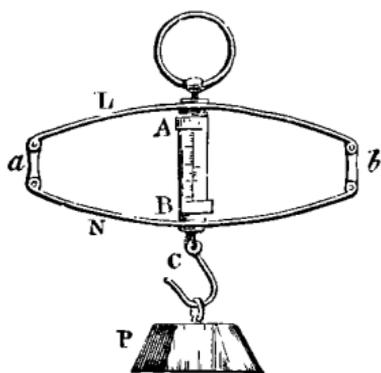


Fig. 211. — Dynamometre.

Chaque lame porte une règle graduée; les deux règles A, B glissent

l'une sur l'autre et mesurent l'écartement des ressorts. Ceux-ci se courbent par l'action du poids  $P$ , et, en changeant la valeur de ce poids, on peut graduer en kilogrammes ce dynamomètre.

En employant des lames d'acier d'épaisseurs différentes, on construit des appareils qui conviennent, les uns à de petites forces, les autres à des forces considérables.

**Mesure d'une force motrice.** — La loi de proportionnalité des forces constantes aux accélérations qu'elles produisent en agissant sur un même corps nous permet de comparer chacune de ces forces à la pesanteur, et par suite d'évaluer leur intensité en prenant encore pour unité le kilogramme.

Supposons qu'un corps pesant 20 kilogrammes, soumis à une force constante  $f$ , ait un mouvement uniformément varié dont l'accélération soit 49 mètres.

Ce même corps, entraîné par son poids en chute libre, prendrait un second mouvement dont l'accélération est de  $9^m,8$ . Ecrivons que les deux intensités  $f$  et 20, exprimées en kilogrammes, sont proportionnelles aux accélérations 49 et  $9,8$ .

$$\frac{f}{20} = \frac{49}{9,8}.$$

Nous en tirerons  $f = 20 \times \frac{49}{9,8}$ , qu'on peut écrire

$$f = \frac{20}{9,8} \times 49 = 100.$$

La force motrice est 100 kilogrammes.

Si on remarque que  $\frac{20}{9,8}$  est la masse du mobile  $m$ , et si on représente par  $a$  l'accélération produite par la force  $f$ , on a :

$$f = m \times a = \frac{P}{g} \times a.$$

*Une force constante a pour valeur le produit de la masse*

*du mobile par l'accélération du mouvement qu'il prend sous l'influence de la force.*

La force est, comme le poids  $P$  du mobile, exprimée en kilogrammes. Les accélérations  $a$  et  $g$  sont évaluées à l'aide des mêmes unités de temps et de longueur : la seconde et le mètre par exemple.

On voit facilement que : *Deux forces  $f, f'$  donnent à deux corps différents la même accélération  $a$ , si leurs intensités sont proportionnelles aux masses  $m, m'$  de ces corps*  $\frac{f}{m} = \frac{f'}{m'} = a$ .

C'est pour cela que tous les corps tombent dans le vide avec la même vitesse ; leurs poids, qui sont ici forces motrices, sont proportionnels à leurs masses.

*Si deux corps différents sont soumis à des forces égales, les accélérations de leurs mouvements sont inversement proportionnelles aux masses.*

Qui ne sait que l'allure d'un cheval attelé à une voiture dépend de la charge, nous dirons maintenant de la masse qu'il doit entraîner.

## CHAPITRE III

### Composition des mouvements et des forces.

Un corps peut être animé de deux mouvements distincts qui s'accomplissent en même temps et indépendamment l'un de l'autre.

Par exemple, une bille parcourt une ligne droite  $ab$  (fig. 212) sur le pont d'un bateau qui dérive sans secousses et vient dans le même temps en  $a'b'$ . Un observateur placé sur le rivage verra distinctement ces deux mouvements : celui de la bille qui va du point  $a$  du pont au point  $b$  et celui du bateau.

Le premier mouvement s'accomplit comme si le bateau était en repos, le second, comme si la bille était immobile

en  $a$ . C'est en cela que consiste l'*indépendance des deux mouvements*.

Il en résulte pour la bille un mouvement particulier qui est la combinaison de deux mouvements, et la trajectoire qu'elle parcourt est par exemple une ligne droite ou courbe, telle que  $ab'$ .

**Composition de deux mouvements rectilignes et uniformes.** — Bornons-nous au cas le plus simple et cherchons le *mouvement résultant* de deux mouvements rectilignes et uniformes.

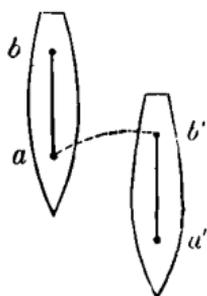


Fig. 212.

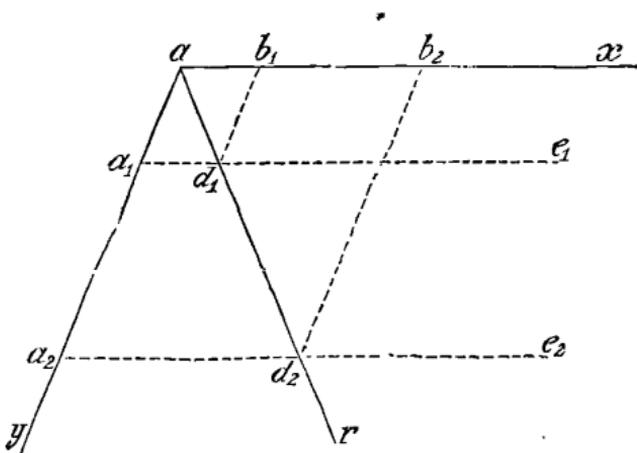


Fig. 213.

Le mobile partant du point  $a$  (fig. 213) se meut sur la droite  $ax$ , tandis que celle-ci se déplace parallèlement à elle-même, de telle manière que l'extrémité  $a$  parcourt la ligne  $ay$ . Si le premier mouvement existait seul, le mobile serait aux points  $b_1, b_2$ , sur  $ax$ , au bout des temps  $t_1, t_2$ , que nous prenons quelconques.

Comme le mouvement est uniforme, les espaces parcourus  $ab_1, ab_2$ , sont proportionnels aux temps  $t_1$  et  $t_2$ .

$$\frac{ab_1}{ab_2} = \frac{t_1}{t_2}.$$

Si le second mouvement existe seul, les espaces  $aa_1, aa_2$ ,

parcourus dans les mêmes temps  $t_1, t_1$ , sont aussi proportionnels à ces temps.

$$\frac{aa_1}{aa_2} = \frac{t_1}{t_2}.$$

Dès lors 
$$\frac{ab_1}{ab_2} = \frac{aa_1}{aa_2}.$$

Par suite de la coexistence des deux mouvements, le mobile se trouve aux points  $d_1, d_2$ , déterminé par la condition  $a_1d_2 = ab_1$  et  $a_2d_2 = ab_2$ ; ces distances étant prises sur des lignes  $a_1c_1, a_2c_2$  parallèles à  $ax$ . Les figures  $aa_1d_1b_1$  et  $aa_2d_2b_2$  sont des parallélogrammes.

Si nous menons les diagonales  $ad_1, ad_2$ , nous formerons deux triangles  $aa_1d_1, aa_2d_2$  semblables, car ils ont les angles  $a_1$  et  $a_2$  égaux et compris entre côtés proportionnels.

$$\frac{aa_1}{aa_2} = \frac{ab_1}{ab_2}$$

Les angles  $a_1ad_1$  et  $a_2ad_2$  sont donc égaux, c'est-à-dire que les points  $a, d_1, d_2$  sont sur une même ligne droite : *le mouvement résultant est rectiligne*. De plus, *il est uniforme*; car la similitude des triangles  $aa_1d_1, aa_2d_2$  donne :  $\frac{ad_1}{ad_2} = \frac{aa_1}{aa_2} = \frac{t_1}{t_2}$ . Les espaces parcourus par le point  $a$  dans la direction de la diagonale sont proportionnels aux temps employés à les parcourir.

Si nous prenons pour unité le temps  $t_1$ , les lignes  $aa_1, ab_1$  représentent les vitesses des deux mouvements composants et la diagonale  $ad_1$  est la vitesse du mouvement résultant. De là la loi de composition des vitesses, loi très importante.

*La vitesse du mouvement résultant est représentée en grandeur et en direction par la diagonale du parallélogramme construit sur les deux droites qui représentent en grandeur et en direction les vitesses des deux mouvements composants.*

**Composition de deux mouvements rectilignes uniformément accélérés.** — En suivant pas à pas la

démonstration précédente, on démontre que deux mouvements uniformément accélérés, l'un entraînant le point  $a$  dans la direction  $ax$ ; l'autre lui faisant parcourir la direction  $ay$ , ont un mouvement résultant, rectiligne, uniformément varié, dirigé suivant la diagonale du parallélogramme construit sur les chemins  $aa_1$ ,  $ab_1$  parcourus dans le même temps dans l'un et l'autre mouvement.

La seule différence à établir entre les deux démonstrations vient de ce que les espaces parcourus dans les temps  $t_1$  et  $t_2$  ne sont plus proportionnels aux temps (cas d'un mouvement uniforme), mais aux carrés des temps (cas d'un mouvement uniformément varié).

Les vitesses au bout de l'unité de temps sont dans chacun des trois mouvements doubles des espaces  $aa_1$ ,  $ab_1$ ,  $ad_1$  parcourus dans l'unité de temps; elles sont donc proportionnelles à ces trois longueurs. L'accélération du mouvement résultant est encore représentée en grandeur et en direction par la diagonale du parallélogramme construit sur les accélérations des mouvements composants.

**Représentation des forces.** — On représente une

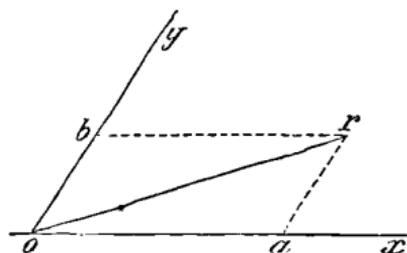


Fig. 214.

force sur un dessin théorique, en marquant son point d'application  $o$  (fig. 214). Une ligne  $ox$  menée par ce point donne la direction de la force. On prend sur cette ligne, à partir du point  $o$  une longueur  $oa$  proportionnelle à l'intensité de la force. On convient,

par exemple, qu'une force d'un kilogramme sera représentée par une longueur d'un centimètre; une longueur de cinq centimètres correspondra à une force de cinq kilogrammes.

**Composition de deux forces appliquées au même point.** — Deux forces  $f_1$ ,  $f_2$  d'intensités constantes sont appliquées au point matériel  $o$ , dont la masse est prise pour unité. Leurs directions, également constantes, sont  $ox$  et  $oy$ .

La première, agissant seule, donne au point  $o$  un mouvement uniformément accéléré, dirigé suivant  $ox$ . L'accélération de ce mouvement  $a_1$  est déterminée par la relation  $f_1 = ma_1$ , dans laquelle  $m = 1$ . On a donc numériquement  $f_1 = a_1$ . Ce qui veut dire que, si l'unité de force est le kilogramme, et l'unité de longueur, le mètre, la force  $f$  valant, je suppose, 7 kilogrammes, l'accélération  $a_1$  sera 7 mètres.

De même, le point  $o$  soumis à la seule action de la force  $f_2$  prendra dans la direction  $oy$  un mouvement uniformément varié, dont l'accélération  $a_2$  aura même valeur numérique que la force  $f_2$ .

Lorsque les deux forces agissent en même temps, les deux mouvements suivant  $ox$  et  $oy$  coexistent. D'après ce que nous avons dit plus haut, si on représente par  $oa$  et  $ob$  les accélérations des deux mouvements composants, le point  $o$  prendra un mouvement unique, dirigé suivant la diagonale  $or$  du parallélogramme construit sur les lignes  $oa, ob$ . Ce mouvement sera uniformément varié et son accélération sera  $or$ .

Puisqu'un mouvement uniformément varié est produit par une force d'intensité constante, le point  $o$  prendrait le même mouvement résultant s'il était soumis à l'action d'une force constante unique  $F$  dirigée suivant  $or$ , et remplaçant à elle seule les deux autres  $f_1, f_2$ . Cette force  $F$  est dite la *résultante* des deux forces composantes  $f_1, f_2$ .

Sa valeur numérique est celle de l'accélération résultante  $or$ .

Les lignes  $oa, ob, or$ , qui représentent sur la figure les valeurs des accélérations, peuvent représenter également les intensités des forces  $f_1, f_2, F$ .

De là, l'énoncé suivant ou la loi du parallélogramme des forces.

*Lorsque deux forces appliquées au même point sont représentées en grandeur et en direction par deux lignes droites passant par ce point, leur résultante est donnée, en grandeur et en direction, par la diagonale du parallélogramme construit sur ces deux droites.*

### **Vérification de la loi du parallélogramme des**

**forces.** — On peut donner une vérification approchée de la loi précédente à l'aide de l'appareil suivant<sup>1</sup>.

Quatre planchettes, assemblées à charnières aux points *a*, *b*, *c*, *d* (fig. 215), forment un parallélogramme articulé que l'on peut déformer en faisant varier la distance des points *a*, *c*.

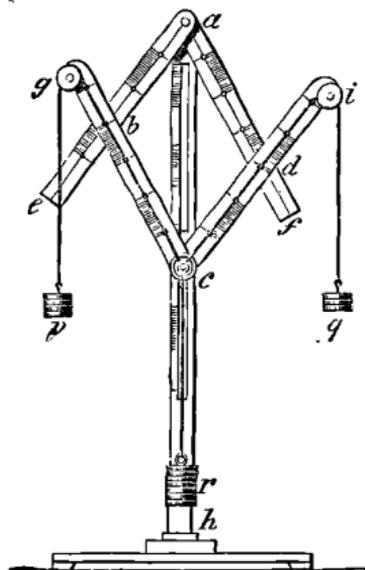


Fig. 215.  
Parallélogramme des forces.

Il est soutenu en *a* par un pied vertical, et la tige horizontale qui réunit en *c* les côtés *cd*, *cb*, s'engage dans une rainure pratiquée dans le pied.

Une vis de pression permet de fixer le sommet *c* en un point convenable; après quoi, la forme du parallélogramme ne change plus. Les côtés *cb*, *cd*, portent deux poulies *g*, *i*. Le pied et les planchettes sont divisés en parties d'égales longueurs. Des trous sont percés vis-à-vis de chaque division des côtés; ils reçoivent les chevilles qui réunissent en *b* les côtés *bc*,

*ab*, et en *d*, les côtés *ad*, *dc*.

On peut donc faire varier à volonté la longueur des côtés et de la diagonale du parallélogramme.

Supposons qu'on ait pris  $ab = 3$ ,  $ad = 4$ , et  $ac = 6$ . On place en *c* un anneau métallique auquel sont attachés trois cordons. L'un est vertical et supporte un poids *r* de 600 grammes; les deux autres ont la direction des côtés *bc*, *cd*; ils passent sur les poulies *g*, *i*, et soutiennent: l'un, un poids *q* de 300 grammes, l'autre un poids *p* de 400 grammes.

Ces trois forces se font équilibre, les forces *p*, *q*, tiennent dans la direction des côtés du parallélogramme et leurs intensités sont proportionnelles à ces côtés. Leur résultante doit

1. Dans le cours élémentaire, cette vérification pourrait suppléer à la démonstration précédente.

avoir la direction de la diagonale  $ac$  et son intensité proportionnelle à la longueur  $ac$  doit être de 600 grammes d'après la loi. Elle est verticale et dirigée de bas en haut.

C'est bien ce que montre l'expérience, puisque l'effet de cette résultante, qui serait de soulever l'anneau, est détruit par le poids de 600 grammes placé en  $r$ , force verticale dirigée de haut en bas.

L'équilibre est détruit si, sans changer les poids, on altère la forme du parallélogramme en déplaçant le point  $c$  le long du pied.

On peut faire un grand nombre d'expériences de ce genre avec cet appareil; elles vérifient toutes les lois énoncées.

*Cette expérience démontre que, si trois forces appliquées au même point se font équilibre, l'une d'elles est égale à la résultante des deux autres et dirigée en sens opposé.*

**Détermination graphique de la résultante de deux forces.** — Deux forces dont les intensités sont 10 et 15 kilogrammes agissent sur le même point matériel, dans des directions qui font entre elles un angle de  $40^\circ$ . On propose de trouver la grandeur et la direction de leur résultante.

Nous tracerons, en nous aidant d'un rapporteur, deux

droites  $ox, oy$  (fig. 216) faisant un angle de  $40^\circ$ . Nous viendrons de représenter une force d'un kilogramme par une longueur de deux millimètres et nous porterons sur  $ox$  une longueur  $oa = 20$  millimètres et sur  $oy$  une longueur  $ob = 30$  millimètres. Puis nous

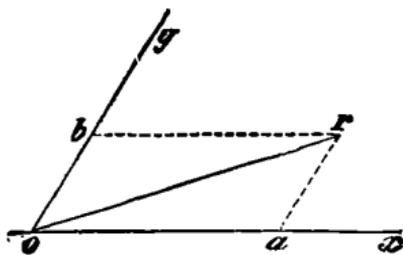


Fig. 216.

achèverons le parallélogramme dont  $oa, ob$  sont les côtés et nous tracerons la diagonale  $or$ , qui nous donne la résultante en grandeur et en direction. On mesure alors avec un double décimètre la longueur  $or$ ; si elle est de 47 millimètres, la force résultante a pour intensité  $23^{\text{Kgr}},5$ . On détermine avec un rapporteur l'angle  $rox$ , qui est de  $15^\circ,5$ .

La direction de la résultante se trouve ainsi déterminée.

On peut remarquer que la grandeur de la résultante est toujours plus petite que la somme des deux composantes, car elle est représentée par le côté  $or$  du triangle  $oar$ . Il est plus petit que la somme des deux autres côtés. Si l'angle  $boa$  diminue constamment, la valeur de la résultante s'approche de plus en plus de la somme des deux composantes et elle lui est égale lorsque l'angle  $box$  est nul, les deux forces tirent alors dans la même direction.

Si l'angle  $box$  est obtus et voisin de  $180^\circ$ , la valeur de la résultante est voisine de la différence des deux composantes; elle lui est égale si l'angle  $box$  est  $180^\circ$ ; les deux forces sont alors directement opposées.

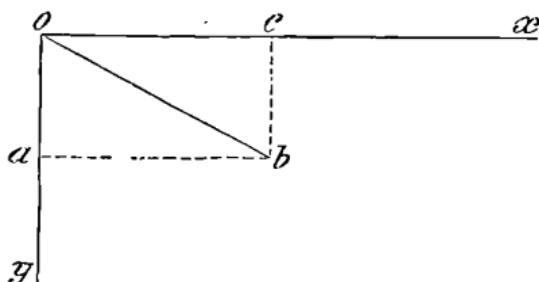


Fig. 217.

Si l'angle  $aox$  est droit (fig. 217), le calcul de la résultante est facile, car le triangle  $boc$  est rectangle et

$$ob^2 = oc^2 + bc^2. \quad \text{Et comme } bc = oa;$$

le carré de la résultante est égal à la somme des carrés des composantes.

De plus :

$$\text{Tang } boc = \frac{bc}{oc},$$

ce qui permet de calculer l'angle que fait la résultante avec l'une des forces données.

**Décomposition d'une force en deux autres.** —

Une force donnée  $ob$  peut toujours être considérée comme la résultante de deux autres forces appliquées au même point  $o$ . Posée en ces termes, la question est indéterminée. Mais sup-

posons données les directions  $ox$ ,  $oy$  des deux composantes inconnues de la force  $ob$ ; on détermine ces composantes en menant par le point  $b$  deux parallèles  $ab$ ,  $bc$ , aux lignes  $ox$ ,  $oy$ . Les côtés  $oc$ ,  $oa$  du parallélogramme ainsi construit représentent les grandeurs des composantes.

On peut les calculer si l'angle  $xoy$  est droit et si l'angle  $boc$  est connu.

Soit la force  $ob$  égale à 20 kilogrammes, et  $boc = 30^\circ$ . Nous aurons dans le triangle  $boc$  :

$$oc = ob \cos. 30^\circ \text{ et } bc = ob \sin. 30^\circ.$$

On trouve, à l'aide des tables trigonométriques :

$$oc = 17^{\text{ksr}},32 \text{ et } bc = 10 \text{ kilogrammes.}$$

**Composition de plusieurs forces.** — Plusieurs forces  $AB$ ,  $AC$ ,  $AD$ ,  $AE$  (*fig.* 218), sont appliquées au même point  $A$ . Pour trouver leur résultante, on construit sur les deux premières  $AB$ ,  $AC$  un parallélogramme qui détermine la résultante  $AM$  de ces deux forces. On cherche de même la résultante des forces  $AM$  et  $AD$ ; c'est la diagonale  $AN$  du parallélogramme  $AMND$ . Enfin un dernier parallélogramme, construit sur les lignes  $AN$ ,  $AE$ , donne la résultante définitive  $AP$  de toutes les forces.

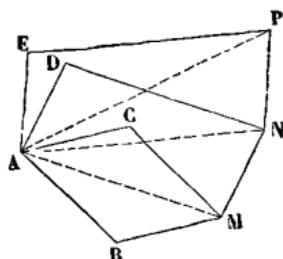


Fig. 218.

La ligne polygonale  $ABMNP$  a ses côtés égaux et parallèles aux forces données; elle peut être construite directement sans qu'on ait besoin de construire la série des parallélogrammes.

La ligne  $AP$ , qui ferme le polygone, est la résultante des forces données.

Si ce *polygone des forces*, comme on l'appelle, est fermé par la construction même, la résultante de toutes les forces est nulle et le point  $A$  est en équilibre.

**Forces appliquées à un corps solide.** — Nous appelons corps *rigide* un corps qui ne peut se déformer sous l'action d'une force.

Une force  $f$  (*fig. 219*), appliquée au point  $a$  d'un corps rigide, peut être supposée appliquée en un point quelconque  $b$  du même corps, pourvu que ce second point soit pris sur la direction de la force; et voici pourquoi.

Si on applique au point  $b$  une force égale à  $f$ , mais directement opposée, elle lui fera équilibre, que la force  $f$  ait pour point d'application  $a$  ou  $b$ .

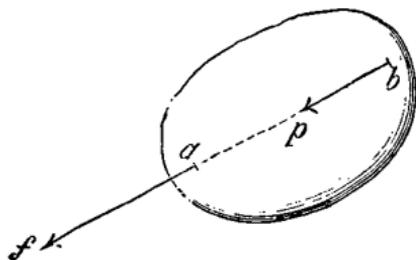


Fig. 219.

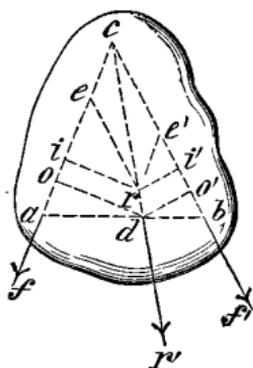


Fig. 220.

**Forces concourantes.** — Deux forces  $af$  et  $bf$  (*fig. 220*) sont appliquées aux points  $a$  et  $b$  d'un corps rigide; elles sont dans le même plan et leurs directions prolongées se rencontrent au point  $c$ . On peut les supposer l'une et l'autre transportées en ce point. Soient  $ce$  et  $ce'$  les grandeurs représentatives de ces forces, achevons le parallélogramme dont ces lignes sont les côtés; la diagonale  $or$  donne la grandeur et la direction de la résultante des deux forces.

Si on joint  $ab$ , la direction  $cr$  coupe cette ligne en un point  $d$  que l'on peut prendre pour le point d'application de la résultante.

**Théorème de Varignon**<sup>1</sup>. — *Les distances d'un point quelconque de la résultante aux deux composantes sont inversement proportionnelles aux intensités des deux forces.*

Soit  $d$  ce point; menons par les points  $d$  et  $r$  des perpendiculaires aux lignes  $ca$ ,  $cb$ .

1. Varignon, né à Caen en 1654, mort en 1722.

Les triangles  $rie$ ,  $ri'e'$  sont semblables, car ils sont rectangles, et les angles  $ier$  et  $i'e'r'$  sont égaux à l'angle  $c$ .

On a donc :

$$\frac{ri}{r'i'} = \frac{re}{re'} = \frac{f'}{f}$$

Les lignes  $ri$  et  $od$  sont parallèles et, par suite :

$$\frac{ri}{od} = \frac{cr}{cd}.$$

Les lignes  $ri'$  et  $do'$  sont parallèles :

$$\frac{ri'}{o'd} = \frac{cr}{cd}.$$

On en déduit l'égalité des rapports  $\frac{ri}{od}$  et  $\frac{ri'}{o'd}$ , ou

$$\frac{ri}{ri'} = \frac{od}{o'd}$$

Mais  $\frac{ri}{ri'} = \frac{f'}{f}$ , donc  $\frac{f'}{f} = \frac{od}{o'd}$ , ou

$$f' \times o'd = f \times od,$$

ce qui démontre le théorème.

Si le point  $d$  par lequel passe la résultante est fixe, de telle sorte que le corps ne puisse que tourner autour de ce point, la résultante  $dr$  n'a aucune action efficace et le corps reste immobile.

*Deux forces concourantes, appliquées à un corps solide qui peut tourner autour d'un point fixe se font équilibre, si les distances de ce point aux deux forces sont en raison inverse de leurs intensités.*

**Forces parallèles et de même sens.** — Le théorème de Varignon est applicable à deux forces concourantes, quel que soit le point de rencontre de leurs directions. Si on suppose ce point indéfiniment éloigné, les deux forces auront des directions parallèles et seront de même sens.

Que deviendra la résultante dans ce cas limité ?

Elle sera parallèle aux deux forces, égale à leur somme. Si on joint par une ligne droite les points d'application des deux forces, elle sera coupée par la résultante en un point tel que ses distances aux deux forces soient inversement proportionnelles à leurs intensités. Il en serait de même de ces distances si elles étaient comptées sur la droite qui joint les points d'application des forces.

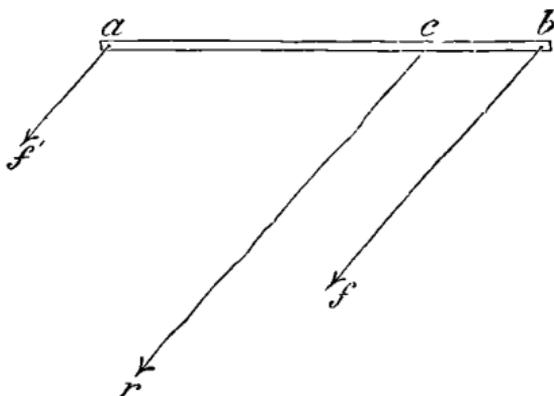


Fig. 221.

Réduisons le corps solide à une barre rigide  $ab$  (fig. 221). Soient  $bf$  et  $af'$  les lignes représentatives des deux forces,  $cr$  leur résultante, on a

$$cr = af' + bf \text{ et } bf \times cb = af' \times ca.$$

Nous nous bornerons à vérifier cet énoncé par expérience, dans le cas où les forces parallèles sont verticales et perpendiculaires à la barre.

Une règle horizontale  $ed$  (fig. 222) oscille comme le fléau d'une balance autour d'un axe horizontal qui passe par son milieu  $c$  et qui est suspendu à une chape.

On attache celle-ci à une corde; elle passe sur une poulie fixe  $v$  et supporte un poids  $P$ . La règle porte des anneaux ou des chevilles également espacées. On peut y suspendre des poids en choisissant des points  $a$  et  $b$ , dont les distances à l'axe  $c$  sont dans un rapport connu, celui de 3 à 4, par exemple.

Si on attache en  $p$  un poids de 4 hectogrammes; en  $b$ , un poids  $p'$  de 3 hectogrammes, et à l'extrémité de la corde un poids  $P$  de 7 hectogrammes, la règle est en équilibre, immobile et horizontale.

L'équilibre se maintient lorsqu'on remplace les deux poids  $p, p'$  par un poids unique de 7 hectogrammes attaché en  $c$  au-dessous de la chape.

Ce poids unique est la résultante des poids  $p, p'$ ; il est égal à leur somme, il agit comme eux dans la direction verticale, et son point d'application est tel que

$$p \times ac = p' \times bc.$$

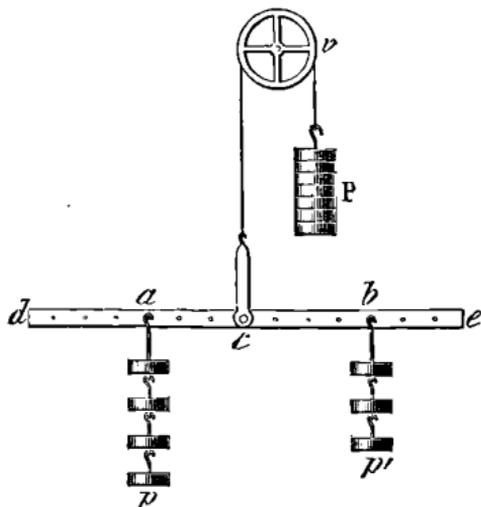


Fig. 222.

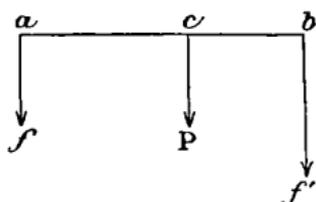


Fig. 223.

**Décomposition d'une force en deux autres de directions parallèles.** — Une force  $P$ , appliquée au point  $c$  (fig. 223) d'une barre  $ab$ , peut être remplacée par deux forces  $f, f'$  parallèles, dont elle serait la résultante.

Il faut, pour cela, que  $P = f + f'$ , et que  $\frac{f'}{f} = \frac{ac}{cb}$ .

Par exemple, deux hommes portent un poids  $P$  de 80 kilogrammes à l'aide d'une barre  $ab$  d'un mètre de longueur. Le poids est placé au tiers de la longueur  $cb = \frac{ab}{3}$ . Quel est l'effort que doit exercer chacun des deux hommes sur les points  $a, b$  pour soutenir le poids? Représentons ces efforts par  $f$  et  $f'$ ,

on a :  $80 = f + f'$ , et  $\frac{f'}{f} = \frac{ac}{cb} = \frac{1}{2}$ , ou  $f' = 2f$ .

On tire facilement  $f = \frac{80}{3}$ , et  $f' = 2 \times \frac{80}{3}$ .

**Forces parallèles et de sens contraire.** — La résultante de deux forces parallèles  $f, f'$  (fig. 224) agissant en sens contraire sur une barre rigide  $ab$  leur est parallèle,

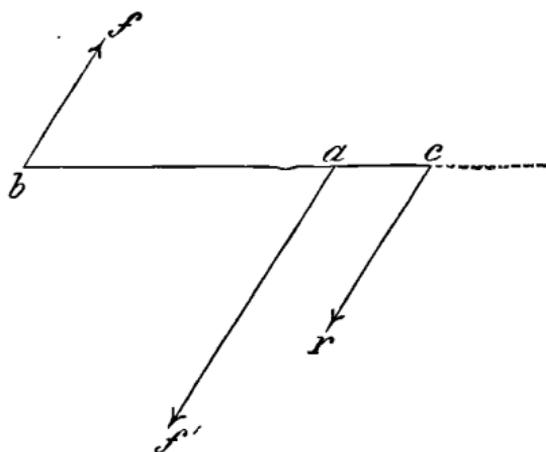


Fig. 224.

égale à leur différence, dirigée dans le sens de la plus grande. Son point d'application  $c$  est placé sur le prolongement de  $ab$ , et ses distances  $ca, cb$  aux points d'application des forces sont inversement proportionnelles à leurs intensités.

On a donc :  $r = f - f'$  et  $f \times cb = f' \times ab$ .

On vérifie comme il suit cet énoncé :

Une règle horizontale  $ac$  (fig. 225) est supportée à ses deux extrémités  $a, c$ , par deux cordons qui passent sur les poulies  $v, v'$  et sont tendus par deux poids  $P, p'$ . Un poids  $p$ , placé en un point convenable  $b$  de la règle, fait équilibre aux deux autres et maintient la règle horizontale et immobile.

Chacun d'eux est égal et opposé à la résultante des deux autres. Considérons  $p$  et  $p'$  comme deux forces verticales qui

tirent la barre dans des directions parallèles, mais en sens opposés. La tension du cordon  $c$ , qui est égale au poids  $P$ , sera égale et opposée à la résultante des deux forces  $p$  et  $p'$ . L'expérience montre que, si  $ac = 4$  décimètres,  $bc = 1$  décimètre. Si  $p = 4$  hectogrammes et  $p' = 1$  hectogramme, le

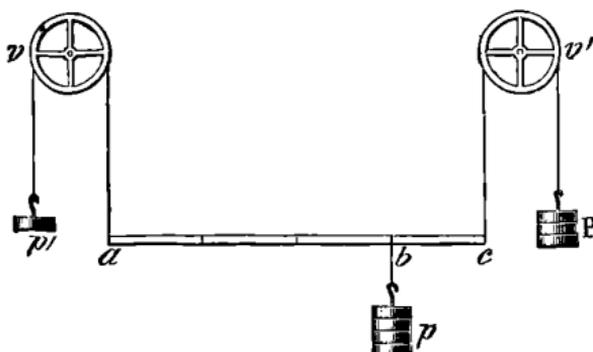


Fig. 225. — Composition des forces parallèles et de sens contraire.

poids  $P$  est 3 hectogrammes. Ce poids  $P$  est bien la différence des deux autres, et son point d'application  $c$  est bien tel que l'énoncé le comporte, puisque le rapport des poids  $\frac{p}{p'}$  est 4, et le rapport inverse des distances  $\frac{ca}{cb}$  est aussi 4.

Le point d'application de deux forces parallèles est indépendant de leur direction; il ne change pas si on fait tourner les forces autour de leurs points d'application, en conservant leur parallélisme et leurs intensités.

**Couple.** — Deux forces égales, parallèles, de sens contraires, n'ont pas de résultante; leur ensemble forme un *couple*. Si la barre qui joint leurs points d'application peut tourner autour d'un point fixe et si, dans cette rotation, les forces conservent leur parallélisme et leurs directions, l'effet du couple est d'amener la barre dans la direction des forces; elles sont alors directement opposées et se font équilibre.

La terre agit sur une aiguille de boussole comme le feraient deux forces égales, parallèles. L'une, dirigée vers le nord,

agit sur le pôle nord; l'autre, appliquée au pôle sud de l'aimant, est tournée vers le sud.

Elles forment un couple qui fait tourner l'aiguille jusqu'à ce que sa direction soit celle des forces terrestres.

**Composition de plusieurs forces parallèles.** —

Plusieurs forces parallèles  $f_1, f_2, f_3$  (fig. 226), de même sens ou non, sont appliquées aux points  $a, b, c$  d'un corps solide.

On opère, pour trouver leur résultante, comme nous l'avons déjà indiqué pour les forces concourantes.

On cherche la résultante des forces  $f_1, f_2$  en observant les règles précédentes. Cette résultante est  $dr$ , elle remplace les deux forces  $f_1, f_2$ . On détermine alors la résultante OR de  $dr$  et de  $f_3$ . C'est la résultante finale.

Comme les trois forces ont le même sens, la résultante est

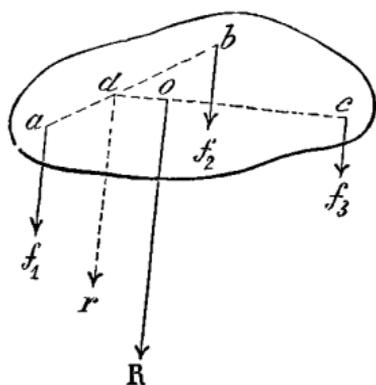


Fig. 226.

égale à leur somme arithmétique; si certaines forces étaient de sens contraire, la résultante serait égale à leur somme algébrique; les forces dirigées dans un sens étant considérées comme positives; les forces de sens contraires comme négatives. Cette résultante est parallèle aux forces. Son point d'application  $o$  est indépendant de la direction commune des forces. On lui

donne le nom de *centre des forces parallèles*.

**Centre de gravité.** — On considère un corps comme formé par l'agglomération de très petites parties que l'on appelle des *molécules*. Chaque molécule a un poids, car, pulvériser un corps aussi finement que vous le pourrez, et la pesanteur fera tomber cette poussière. Le poids de chaque molécule est une force verticale agissant de haut en bas. La résultante de toutes ces petites forces est une force verticale unique, appelée le *poids* du corps. Il est égal à la somme de tous les poids des molécules. Son point d'application est un

point déterminé du corps, que l'on appelle le *centre de gravité*.

Quand on parle du centre de gravité d'une ligne ou d'une surface, on ne considère plus alors une ligne ou une surface géométriques qui n'ont pas d'épaisseur.

Rangeons des molécules pesantes en ligne droite ou sur la circonférence d'un cercle, nous aurons des lignes pesantes dont on pourra chercher le centre de gravité. Il en sera de même d'un carré, surface plane que nous supposerons recouverte de molécules pesantes juxtaposées. La surface de ce carré aura un poids et, par suite, un centre de gravité.

Si nous parlons du centre de gravité d'un solide géométrique, d'un cylindre, nous supposerons tacitement qu'il est formé d'une matière pesante, telle que le fer ou le bois.

Par raison de symétrie, le centre de gravité d'une ligne droite est au milieu de sa longueur. Celui d'une circonférence de cercle est au centre du cercle ; ce n'est plus alors un point de la ligne pesante considérée.

L'idée d'un centre de gravité où serait appliqué le poids d'un corps, que l'on pourrait considérer comme étant le seul point pesant au corps, et dont le poids serait le poids même du corps, cette idée est toute théorique. Elle simplifie le raisonnement et c'est pour cela qu'on la conserve ; mais elle ne représente pas du tout la réalité des faits.

Un anneau, formé avec un fil de fer, a tous ses points pesants, voilà la réalité. Nous cherchons ensuite par le raisonnement où serait le point d'application de la résultante de tous ces poids ; cette résultante n'existe que dans notre imagination de savant. Il n'est pas étonnant que nos raisonnements nous fassent trouver un point situé en dehors du corps pesant, au centre de l'anneau.

Comme conséquence pratique, nous ne pouvons, en soutenant un seul point de l'anneau de fer, le maintenir en équilibre dans un plan horizontal. Ou bien il faudrait avoir trois points d'appui comme dans le trépied, ou bien il faudrait ajouter à l'anneau un fil de fer diamétral dont on soutiendrait le milieu.

Le centre de gravité de la surface d'un cercle (une feuille de tôle mince taillée en rond) est au centre du cercle. Celui d'un parallélogramme (rectangle, carré) au point de rencontre des deux diagonales. Celui d'un triangle, au point de rencontre des trois médianes.

*Nous appelons solide homogène celui dont toutes les parties ont un égal poids, quand on y découpe des volumes égaux et très petits.*

Parmi les solides homogènes, le centre de gravité d'un cylindre ou d'un parallélépipède est au milieu de la ligne qui joint le centre de gravité des deux bases parallèles.

Celui d'une pyramide, d'un cône, sur la ligne qui joint le sommet au centre de gravité de la base et au quart de cette ligne à partir de la base.

Le centre géométrique d'une sphère est en même temps son centre de gravité.

Un cylindre formé de deux parties qui se raccordent exactement, l'une en bois, l'autre en plomb, n'est pas homogène et le centre de gravité n'est plus dans la section médiane du cylindre. Il se trouve plus près du plomb ou dans l'intérieur de sa masse.

**Équilibre des corps pesants.** — La considération du centre de gravité simplifie beaucoup la recherche des conditions dans lesquelles il faut placer un corps pesant pour qu'il reste immobile, malgré l'action incessante de la pesanteur.

Il sera en équilibre, s'il présente un point fixe par lequel passe la verticale du centre de gravité. Ce point se trouve alors sur la direction de la force qui tend à faire tomber le corps ; on peut le prendre pour le point d'application de cette force. Sa fixité détruit tout l'effet du poids du corps.

**Équilibre stable.** — Si le centre de gravité B (*fig. 227*) se trouve situé au-dessous du point fixe, il se place, dans l'état d'équilibre, au point le plus bas. Tout mouvement que l'on imprimera alors au corps, autour du point fixe, soulèvera le centre de gravité et la pesanteur le ramènera au point qu'il vient de quitter. Le corps, dérangé de sa position d'équi-

libre, y revient de lui-même, l'équilibre est *stable*. Un fil à plomb, un pendule d'horloge, sont en équilibre stable lorsque le fil de l'un, la tige de l'autre sont verticaux (*fig. 227*).

**Équilibre instable.** — Si le centre de gravité est au-dessus du point de suspension, il est le plus élevé possible dans la position d'équilibre. Dérange-t-on tant soit peu le corps de cette position, la pesanteur fait descendre le centre de gravité et l'équilibre est détruit sans retour. L'équilibre est *instable*.

C'est le cas d'une règle que l'on place sur le bout du doigt et que l'on veut maintenir verticale.

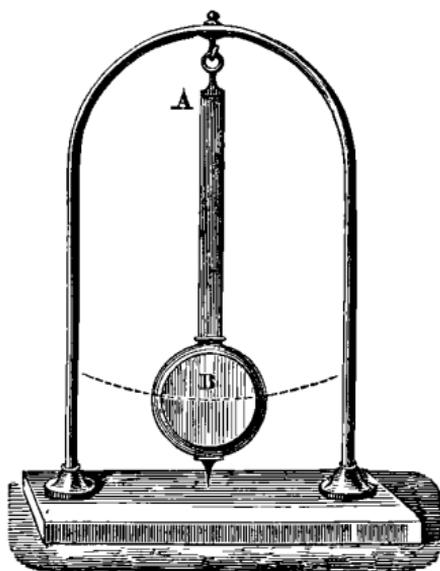


Fig. 227.

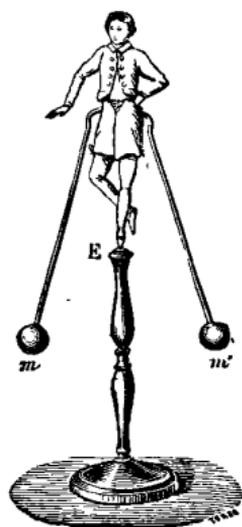


Fig. 228.

Il serait presque impossible de placer verticalement sur son support une petite figurine (*fig. 228*) qui y reposerait sur la pointe d'un des pieds. Mais si on fixe à la figurine, à l'aide de deux fils de fer, deux masses de plomb  $m$ ,  $m'$ , on abaisse le centre de gravité de l'ensemble au-dessous du point d'appui, l'équilibre devient stable. La figurine peut être inclinée sans culbuter, elle redevient d'elle-même verticale.

Si le corps a deux points d'appui ou bien tourne autour d'un axe horizontal, il y aura *équilibre*, lorsque la verticale

du centre de gravité rencontrera l'axe de rotation ou la ligne droite qui passe par les deux points d'appui.

L'équilibre est *stable*, si le centre de gravité est au-dessous de cette ligne ; c'est le cas d'une grosse cloche ; *instable*, s'il est au-dessus. De là la difficulté pour l'homme de marcher sur une corde tendue.

L'équilibre est *indifférent* si le centre de gravité se trouve sur l'axe de rotation ; c'est le cas d'une poulie, d'une roue bien centrées. Le corps reste en équilibre dans toutes les positions qu'on lui donne.

Si le corps a au moins trois points d'appui, il faut, pour l'équilibre, que la verticale du centre de gravité tombe dans l'intérieur de la figure que l'on obtient en joignant deux à deux les divers points d'appui.

C'est le cas d'un trépied, d'une table ou d'un cube, d'un cylindre reposant par sa base sur un plan.

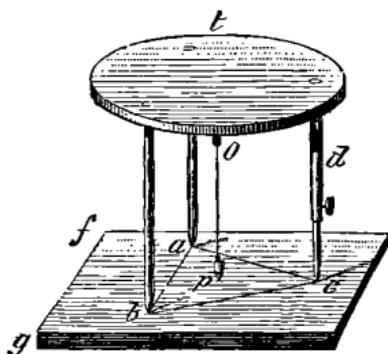


Fig. 229. — Equilibre d'un trépied.

Pour le montrer, on forme, avec une planchette et trois règles, un trépied *t* (fig. 229). Il repose sur une seconde planchette sur laquelle on a tracé le triangle *abc*, qui passe par les trois points d'appui. L'une des règles *d* est formée de deux parties qui glissent à frottement l'une sur l'autre, ce qui

permet d'allonger ce pied à volonté.

Le centre de gravité du trépied est *o*. On attache en ce point un petit fil à plomb *op*.

Lorsque les pieds sont d'égale longueur, le fil à plomb tombe dans l'intérieur du triangle *abc* ; l'équilibre est stable.

Il devient instable si, en allongeant le pied *d*, on amène le fil à plomb au-dessus de la ligne *ab*. Le trépied culbute si le plomb *p* tombe en dehors du triangle.

L'équilibre de l'homme exige que son centre de gravité, qui est à peu près au bas de l'abdomen, tombe dans le qua-

drilatère obtenu en joignant les talons d'une part, les bouts de pied de l'autre. L'homme qui porte un fardeau sur le dos se courbe en avant pour ramener son centre de gravité au-dessus de sa base d'appui. Il se pencherait en arrière pour le même motif s'il soutenait le fardeau devant sa poitrine.

La base d'appui d'une voiture est déterminée par les points d'appui des roues sur le sol et les pieds du cheval attelé au timon. Si on charge trop le derrière de la voiture, elle peut basculer. Si le centre de gravité est trop élevé au-dessus du sol, une inégalité de terrain, la rencontre d'une pierre, peut faire verser la voiture. C'est pour cela qu'on donne un petit diamètre aux roues des camions destinés à porter de lourds fardeaux.

---

## CHAPITRE IV

### Travail des forces.

Deux manœuvres tirent l'eau d'un puits, en agissant directement sur la corde qui soutient le seau. Les réservoirs qu'ils remplissent ainsi sont : l'un à huit mètres, l'autre à douze mètres du niveau de l'eau. L'un des réservoirs a une contenance de 10 hectolitres, l'autre de 16. Quel salaire mériteront les ouvriers pour leur travail ?

Deux éléments interviennent pour le fixer : la résistance vaincue, qui est ici le poids de l'eau soulevée et la hauteur à laquelle elle a été portée.

A égalité de hauteur, le travail est proportionnel au poids d'eau ; à égalité de poids, il est proportionnel à la hauteur.

Supposons que l'entrepreneur soit convenu d'un prix déterminé  $a$  pour le travail fait en soulevant un kilogramme d'eau à un mètre de hauteur.

Le salaire du premier sera  $a \times 1\,000 \times 8$ ; et celui du second  $a \times 1\,600 \times 12$ .

*Les travaux sont proportionnels aux produits des poids soulevés par les chemins parcourus.*

Il en sera de même toutes les fois que la force agira comme ici, dans la direction du chemin.

Un homme d'équipe pousse un wagon sur les rails; l'effort moyen qu'il fait est de 30 kilogrammes. Le wagon est déplacé de 50 mètres.

Si on convient de prendre pour unité de travail celui qui élève un kilogramme à un mètre, unité appelée le *kilogram-mètre*, l'homme d'équipe aura fait le même travail que le manœuvre qui soulève verticalement 30 kilogrammes à 50 mètres; c'est-à-dire 1500 kilogrammètres.

La résistance qu'une force peut vaincre, exprimée en kilogrammes, représente l'intensité de cette force. Le travail accompli par elle est le produit de cette intensité par le chemin que parcourt son point d'application et qui doit être dans la direction de la force.

Il est des cas où la direction du mouvement de ce point diffère de la direction de la force. Par exemple, un cheval

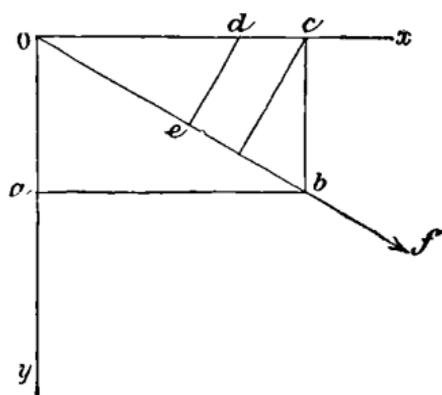


Fig. 230.

tire un bateau à l'aide d'une corde; celle-ci fait un angle avec la ligne que suit l'axe du bateau sur le canal; la direction du mouvement ne coïncide plus avec celle de la force.

Soit  $ob$  (fig. 230) la direction de la force  $f$  et sa grandeur;  $ox$  la direction du mouvement;  $oy$  une perpendiculaire à  $ox$ . Décomposons la force  $f$  en deux autres dirigées: l'une  $oc$  suivant  $ox$ , l'autre  $oa$  suivant  $oy$ . Cette dernière  $oa$  est une force perdue, qui ne sert en rien au déplacement du point  $o$  le long de la ligne  $ox$ . La seule force motrice est  $oc$ .

Si le chemin parcouru par le point  $o$  est  $od$ , le travail sera exprimé par

$$T = oc \times od.$$

C'est le *produit du chemin par la composante de la force dirigée dans le sens du mouvement.*

Projetons le chemin  $od$  sur la direction de la force, en abaissant du point  $d$  la perpendiculaire  $de$  sur  $ob$ . Les deux triangles rectangles  $ode$ ,  $obc$ , qui ont l'angle  $o$  commun, sont semblables et

$$\frac{od}{ob} = \frac{oe}{oc},$$

ou réduisant au même dénominateur et égalant les numérateurs,

$$od \times oc = ob \times oe,$$

on a donc

$$T = ob \times oe.$$

Ce qui fournit une autre expression du travail. Il est le *produit de la force par la projection du chemin parcouru sur la direction de la force.*

Il résulte de là : 1° Que le travail est nul s'il n'y a pas de force.

2° S'il y a une force, mais si son point d'application ne se déplace pas. C'est le cas d'un homme qui épuise ses forces à pousser un bloc de pierre qui ne bouge pas.

3° Enfin, il n'y a pas de travail utile, si la direction du chemin est perpendiculaire à celle de la force.

Le point d'application de la force, supposée constante, peut décrire une courbe, une circonférence de cercle, par exemple, à laquelle la direction de la force est toujours tangente (*fig. 231*). Au point  $a$ , la ligne  $af$  représente et la direction de la force et celle du mouvement ; pendant que le point  $a$  parcourt le petit arc  $ab$  commun à la courbe et à la tangente, le travail est  $f \times ab$ . Les directions de la force et

du mouvement changent en même temps et restent communes à l'une et à l'autre en chaque point  $a'$ ,  $a''$  de la courbe.

La longueur de l'arc  $a a''$ , qui mesure l'espace parcouru, est composée d'éléments tels que  $ab$ , situés toujours dans la

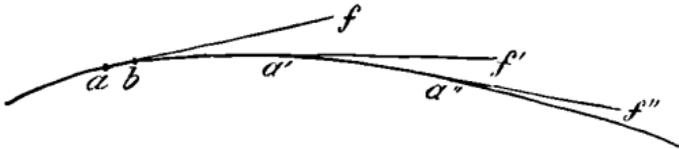


Fig. 231.

direction de la force. Le travail total est donc  $a a'' \times f$ . Si la force parcourt ainsi toute la longueur d'une circonférence de rayon  $R$ , le travail, pour chaque tour, est :

$$f \times 2\pi R;$$

et pour 10 tours :

$$f \times 2\pi R \times 10.$$

**Énergie.** — Un homme remonte le poids d'une grosse horloge, depuis le sol jusqu'à une hauteur de 10 mètres ; le poids est de 8 kilogrammes, ce qui exige un travail de 80 kilogrammètres.

Le poids ainsi soulevé peut à son tour accomplir, en tombant, un travail de 80 kilogrammètres ; ce qu'on exprime en disant que, par le seul fait d'être pesant et d'avoir été élevé de 10 mètres au-dessus du sol, le corps pesant a acquis de l'énergie.

*Energie* veut dire ici une certaine capacité à produire du travail mécanique.

Dans l'exemple que nous avons pris, l'énergie du poids se dépensera en un travail nécessaire pour faire tourner, pendant huit jours ou plus, les rouages et les aiguilles de l'horloge.

Après quoi, si on veut que le mouvement continue, il faudra qu'un homme dépense encore 80 kilogrammètres pour renouveler la provision d'énergie du corps pesant.

Un boulet est lancé par une arme à feu avec une grande vitesse. Il a une provision d'énergie qu'il conserve tant que sa vitesse ne change pas. Il se meut par inertie et non plus sous l'influence d'une force. Il n'exige donc aucun travail nouveau pour se déplacer : il n'en dépense que pour vaincre la résistance de l'air. Mais qu'il rencontre un obstacle, son énergie se transforme aussitôt en travail et en travail désastreux ; il tue les hommes, il perce une cible d'acier, il fait une brèche dans un mur. Plus sa masse est grande, ainsi que sa vitesse, plus est considérable sa force de destruction.

La mécanique nous apprend qu'un corps de masse  $m$ , de vitesse  $V$ , peut produire un travail représenté par la moitié du produit de sa masse par le carré de sa vitesse :  $\frac{1}{2} mV^2$ , en dépensant son énergie. Ce produit porte le nom de *force vive*.

Citons-en un exemple très simple. Un corps, dont le poids est  $P$ , est soulevé à une hauteur verticale  $h$ , au prix d'un travail représenté par  $P \times h$ . Il peut, en retombant de cette hauteur, produire le même travail  $Ph$ . On peut utiliser ce travail à la fin de sa course ; c'est ce qui arrive lorsqu'on enfonce des pieux à l'aide d'un *mouton*, c'est-à-dire en faisant tomber sur leur tête un poids de fonte que l'on a soulevé à une certaine hauteur.

Au moment où il est arrêté par le pieu, il est animé d'une vitesse acquise  $V$  dont l'expression nous est connue (p. 281)

$V^2 = 2gh$ . On en tire  $h = \frac{V^2}{2g}$ . Remplaçant, dans l'expression

du travail  $T$ ,  $h$  par cette valeur, on a  $T = \frac{P \times V^2}{2g}$ ; or,  $\frac{P}{g}$  est

la masse  $m$  du corps; on a donc  $T = \frac{1}{2} mV^2$ . Le travail que peut accomplir le corps est bien exprimé par la moitié de sa force vive.

Un boulet pesant 10 kilogrammes a sensiblement l'unité de masse. Si sa vitesse est 300 mètres par seconde, il sera capable, en vertu de son énergie, de produire un travail de 45 000 kilogrammètres : c'est la moitié du carré de sa vitesse.

Il ne faut pas confondre les idées de force et d'énergie.

Un forgeron qui poserait son plus gros marteau sur le bloc de fer qu'il veut forger, ne produirait aucun effet. Mais, s'il soulève le marteau et le ramène sur l'enclume avec une certaine vitesse, il lui donnera une provision d'énergie qui se dépensera en travail au moment du choc. La vitesse sera plus grande s'il fait faire à la lourde masse un ou deux tours en l'air avant de frapper son coup; il y aura plus de travail produit parce que l'énergie acquise sera plus grande.

Un train en marche, avec sa masse énorme et sa grande vitesse, a une énergie considérable qui produit de terribles accidents si le train s'arrête tout d'un coup. Il faut, pour les prévenir, lui faire perdre peu à peu cette énergie, en diminuant sa vitesse : soit par l'action des freins et des frottements qu'ils font naître, soit en renversant la vapeur.

Dans la considération du travail, on ne fait entrer que la grandeur de la résistance vaincue et le chemin parcouru dans la direction de la force. On ne s'occupe pas du chemin réel.

On veut extraire 10000 kilogrammes de pierre d'une carrière qui a 20 mètres de profondeur verticale; voilà le poids à soulever et le chemin évalué dans la direction de la force. Que l'on élève la pierre en lui faisant suivre une verticale, ou bien qu'on en charge des chariots qui remonteront un plan incliné, lorsque le travail sera accompli, il sera, au point de vue mécanique, de 200 000 kilogrammètres.

On peut, pour faire ce travail, recourir à des hommes ou à des chevaux, ou à une machine à vapeur. Le travail utile de tous ces agents sera toujours le même : 200 000 kilogrammètres.

Cette considération du travail simplifie donc la solution des questions de mécanique.

Ce n'est pas à dire que toutes les machines ou les agents employés aient la même valeur. Les uns donneront plus de travail dans le même temps, d'autres seront plus coûteuses.

Pour les comparer, il ne faut pas se contenter d'évaluer le travail qu'elles peuvent faire, il faut savoir en combien de

temps elles le font ; puis on examinera le prix de revient du travail. De ce dernier nous ne dirons rien.

Mais il est bon de savoir qu'il existe une unité de travail autre que le kilogrammètre. Dans cette nouvelle unité on introduit la notion du temps. Nous l'appellerons la *puissance dynamique du cheval-vapeur*.

**Cheval-vapeur.** — Une machine a une *puissance dynamique d'un cheval-vapeur, quand elle fait un travail de 75 kilogrammètres en une seconde*. Une machine de vingt chevaux fait par seconde un travail de  $20 \times 75$  ou de 1500 kilogrammètres. On a le tort de dire une machine de la *force* de vingt chevaux : le *cheval*, ici, ne représente pas un effort de traction tel qu'une force de 30 ou 50 kilogrammes, mais un *travail* ; ce qui est tout différent.

Du reste, il ne faudrait pas croire que l'on pourrait, avec vingt chevaux, en chair et en os, faire le travail d'une machine à vapeur de vingt chevaux-vapeur. La machine travaille jour et nuit sans fatigue. Le travail de 75 kilogrammètres par seconde est un maximum que Watt a choisi et qu'on ne pourrait demander à un animal ; en fait, il faudrait au moins un escadron de cent chevaux pour remplacer la machine.

## CHAPITRE V

### Machines simples.

Nous n'avons à nous occuper que des machines les plus simples, employées par l'homme pour utiliser au mieux son travail.

Considérons une des machines les plus répandues, celle que l'on installe sur un puits pour puiser l'eau à l'aide d'un seau. Celui-ci B (*fig.* 232) est attaché à une corde qui s'en-

roule sur un cylindre A. On fait tourner ce cylindre autour d'un axe horizontal, en agissant sur une manivelle *m*.

La *force motrice* ou *puissance* a pour point d'application la manivelle; c'est l'effort que fait l'homme pour mettre la machine en mouvement. Elle agit dans le sens du mouvement et tend à l'accélérer. Le travail de cette force est le *travail moteur*.

La *résistance* est le poids du seau plein d'eau. La pesanteur tend à donner à la machine un mouvement inverse et, par suite, à diminuer la vitesse. Le travail de la pesanteur doit

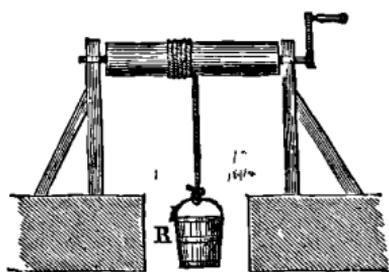


Fig. 232.

être considéré comme *négalif*, tandis que le travail moteur sera *positif*. On l'appelle *travail utile*, parce que le but de la machine est de soulever le seau.

La force motrice a encore à vaincre le frottement de l'axe du cylindre sur ses points d'ap-

pui, ou la raideur de la corde qui doit s'enrouler sur le cylindre. Il y aura là une partie du travail moteur employé en pure perte. Ce travail, ajouté au travail moteur, s'appellera le travail *des résistances passives*.

Lorsque l'on commence à agir sur la machine, le seau s'élève lentement, puis la vitesse de rotation s'accélère et le seau monte plus vite; enfin, il arrive un moment où cette vitesse devient constante et où, sous l'action des forces qui agissent sur la machine, le mouvement est uniforme. Ce n'est plus un cas d'inertie, mais un cas d'équilibre des forces *motrices* et des forces *résistantes*.

Ce qu'on peut exprimer en disant que la résultante de toutes les forces qui agissent sur les diverses parties de la machine est nulle, et partant, ne peut plus modifier, ni dans un sens, ni dans un autre, sa vitesse. Le travail de la résultante est également nul. Il est la somme algébrique des travaux des forces agissantes.

Nous poserons donc le principe fondamental suivant, que

nous appellerons le *principe de transmission de travail*. *Lorsqu'une machine a pris un mouvement uniforme sous l'influence de forces qui sont les unes motrices, les autres résistantes, le travail des premières est égal à celui des secondes.*

Dans ce qui va suivre, nous négligerons le travail perdu par le frottement, par l'ébranlement des bâtis de la machine, par les secousses qu'elle peut imprimer au sol.

Nous supposerons, ce qui est un cas bien éloigné de la réalité, que le travail moteur se retrouve en entier dans le travail utile, et nous chercherons dans ce cas les conditions d'équilibre de la machine. Cela revient à rechercher ce que doivent être les forces, pour qu'en les appliquant à la machine en repos, elles ne puissent la mettre en mouvement, ou, pour qu'en les appliquant à la machine déjà lancée, elles n'altèrent pas sa vitesse.

Il y a deux méthodes qui permettent de trouver les conditions d'équilibre : dans l'une, on considère les forces qui maintiennent la machine au repos.

C'est ainsi que dans une balance ordinaire, on dit qu'il y a équilibre lorsque le fléau reste immobile et horizontal ; les deux plateaux sont alors chargés de poids égaux.

Nous chercherons plus loin les conditions d'équilibre du levier par cette première méthode, pour en donner un exemple.

Dans la seconde méthode, on considère la machine en mouvement : on l'a construite pour cela ; et on cherche ce que doivent être les forces pour que le mouvement soit uniforme, ou pour que le travail moteur soit égal au travail résistant.

C'est cette seconde méthode que nous choisissons, parce qu'elle donne, plus que la première, une idée vraie du rôle que joue la machine et de ce que l'on est en droit de lui demander.

**Plan incliné.** — La plus simple des machines est le plan incliné.

Pour élever un lourd fardeau à une hauteur AB (*fig.* 233) de 5 mètres, par exemple, on le fait glisser sur un plan incliné BC dont la longueur est 25 mètres. Admettons que le

poids  $R$  du corps, qui sera la *résistance*, soit 100 kilogrammes, et que la force motrice  $P$ , que nous appellerons la *puissance*, tire parallèlement à la longueur  $BC$  du plan. S'il y a équilibre entre les forces  $P$  et  $R$ , il devra y avoir égalité de travail de part et d'autre.

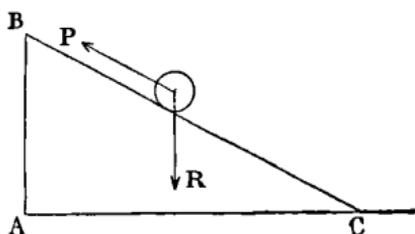


Fig. 233.

Le poids  $R$  est une force verticale qui parcourt dans le sens vertical un chemin  $AB$  égal à 5. Son travail est  $R \times AB$  ou  $100 \times 5$  kilogrammètres.

Le travail correspondant de la puissance  $P$  s'obtient en multipliant cette force par la longueur  $BC$  du plan incliné, c'est le chemin parcouru dans la direction de la force. On a donc l'égalité  $P \times 25 = 500$  ou  $P = 20$ . Ainsi un effort de 20 kilogrammes maintiendrait immobile le corps sur le

plan incliné. Augmentez l'effort, portez-le à 25 kilogrammes, le corps montera.

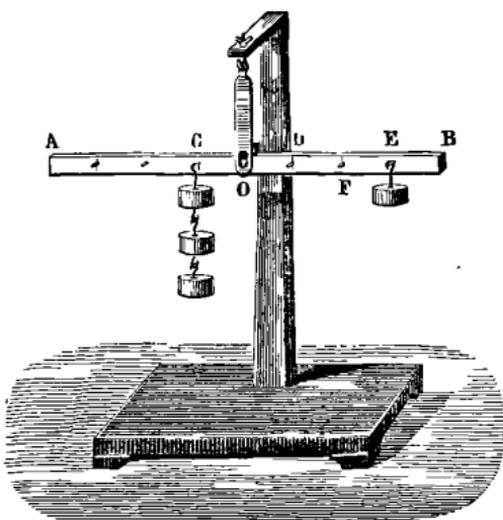


Fig. 234. — Appareil pour la démonstration de la loi du levier.

On voit que, lors de l'équilibre, la puissance  $P$  est à la résistance  $R$  dans le même rapport que la hauteur  $AB$  du plan à sa longueur  $BC$ .

**Levier.** — Une barre rigide  $AB$  (fig. 234), ayant un point d'appui  $O$ , nous représente un *levier*.

Ici le point d'appui est un axe horizontal supporté par une chape.

La barre, que nous supposons rectiligne, porte des chevilles équidistantes auxquelles on peut accrocher des poids. Met-

tons un poids de 300 grammes à la première cheville de gauche C, un poids de 100 grammes à la troisième de droite E. Il y aura équilibre. Ce qu'on pouvait prévoir, puisque les deux forces appliquées aux points C E étant parallèles et verticales, leur résultante est une force verticale égale à leur somme et appliquée au point fixe O tel que  $OF = 3OC$ .

Cette résultante, s'exerçant sur le point d'appui, est détruite par la fixité de ce point et le levier reste immobile.

Si les forces n'étaient pas parallèles, mais concordantes comme  $f f'$  (fig. 235); si même le levier n'était pas rectiligne,

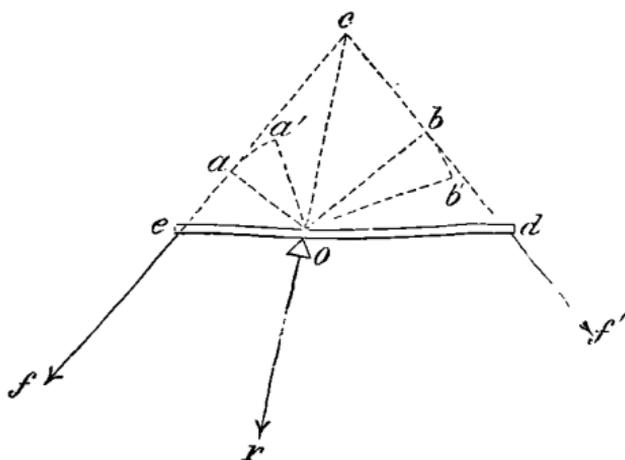


Fig. 235.

l'équilibre exigerait encore que leur résultante passât par le point fixe  $o$ .

Nous avons démontré que, dans ce cas, le rapport des intensités des forces est inverse de celui de leurs distances au point fixe (page 298),

$$f \times ao = f' \times ob;$$

les perpendiculaires  $ao$  et  $ob$ , abaissées des points  $o$  sur les directions des deux forces, s'appellent *les bras de levier*.

Ainsi, en ne considérant que l'état d'équilibre du levier en repos, on trouve pour condition :

*Les intensités des forces sont inversement proportionnelles aux bras de levier.*

Considérons le levier en mouvement. Il tourne autour du point  $o$ ; la résultante des forces  $f, f'$  s'exerçant sur le point d'appui ne peut faire varier son mouvement, qui dès lors est uniforme.

Au levier matériel  $eod$ , substituons le levier coudé  $aob$  et, pour cela, transportons en  $a$  et en  $b$  les points d'application des deux forces. Elles ne cesseront pas d'être perpendiculaires aux bras de levier  $oa, ob$ , lorsque ceux-ci viendront en  $oa'$  et  $ob'$ , en décrivant les arcs de cercle  $aa', bb'$  dont les rayons sont  $oa$  et  $ob$ .

Dès lors le travail des deux forces est :

$$f \times aa' \text{ et } f' \times bb'.$$

Mais nous venons de démontrer que :

$$f \times oa = f' \times ob \text{ ou } \frac{f}{f'} = \frac{ob}{oa}.$$

Les arcs  $aa', bb'$  correspondent, dans des cercles différents, à des angles égaux  $aoa', bob'$ ; leurs longueurs sont proportionnelles aux rayons  $oa, ob$ , et l'on a :

$$\frac{ob}{oa} = \frac{bb'}{aa'}.$$

On en conclut :

$$\frac{f}{f'} = \frac{bb'}{aa'} \text{ ou } f \times aa' = f' \times bb'.$$

$$f \times aa' \text{ et } f' \times bb'$$

sont les travaux des deux forces.

Ainsi, dans le cas de deux forces concourantes appliquées aux extrémités d'un levier en équilibre, *le travail de la puissance est égal au travail de la résistance.*

C'est la vérification du principe de transmission de travail.

On a classé les leviers en trois groupes, suivant les positions relatives des deux forces et du point d'appui. Cette classification n'a qu'une importance très secondaire.

**Leviers du premier genre.** — Le point d'appui se trouve entre les deux forces.

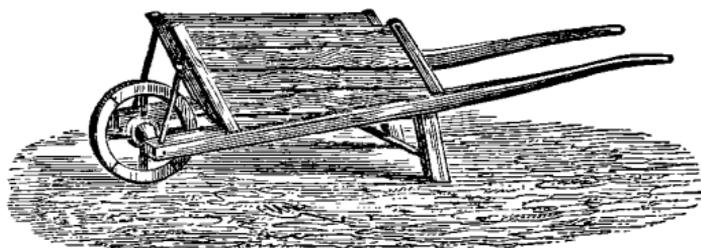
On donne au levier des bras inégaux, et on attribue le plus grand à la puissance P, en diminuant autant qu'on le peut celui de la résistance R. Nous citerons le levier des charpentiers et des maçons, les fléaux de balance (*fig.* 236).



*Fig.* 236. — A, point d'appui ; R, résistance ; P, puissance.

Les ciseaux, les cisailles des ferblantiers, sont un assemblage de deux leviers du premier genre.

**Leviers du second genre.** — La résistance est entre le point d'appui et la puissance. On trouve cette disposition dans la brouette, sorte de levier roulant (*fig.* 237), dans le grand ciseau des sabotiers, dans le casse-noisette.



*Fig.* 237.

**Leviers du troisième genre.** — La puissance est entre le point d'appui et la résistance.

Son point d'application se déplace moins lorsque le levier tourne, mais son intensité doit l'emporter sur celle de la résistance.

Nous trouvons ce genre de levier dans les membres de l'homme : le muscle de la cuisse C (*fig. 238*) s'attache en A sur l'os de la jambe, très près de l'articulation du genou qui est le point fixe.



Fig. 238.

La puissance naît de la contraction du muscle. Son point d'application est en A. La résistance est à l'extrémité du membre.

Les pincettes sont formées de deux leviers du troisième genre (*fig. 239*).

**Balances.** — Nous avons déjà décrit les balances ordinaires. Le fléau est un levier du premier genre, à bras égaux. L'équilibre est établi lorsque les plateaux ont le même poids et qu'ils ont des charges égales.

Pour que cet équilibre soit stable, il faut que le centre de gravité du fléau soit au-dessous de l'arête du couteau.

L'équilibre serait instable et impossible à établir, s'il était au-dessus. Il serait indifférent, s'il se trouvait sur l'arête même. La balance perdrait la propriété d'osciller.

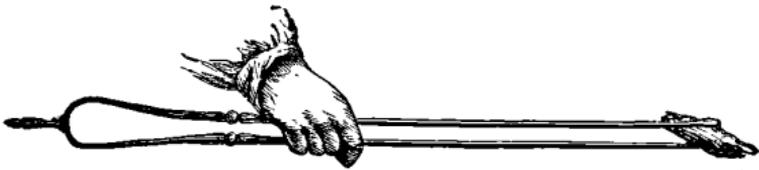


Fig. 239.

On réalise très facilement ces trois cas à l'aide d'un appa-

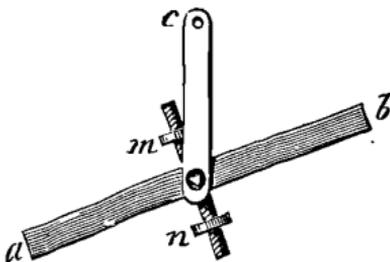


Fig. 240.

reil facile à installer. Une règle de bois *ab* (*fig. 240*) représente le fléau ; elle est mobile autour d'un couteau, portée par une chape *c*. On a disposé, au milieu de la règle et vis-à-vis du couteau, deux tiges de fer taillées en vis, et dont les écrous

sont formés par deux disques de plomb  $m$ ,  $n$ , que l'on peut dès lors soulever à son gré. On est libre alors de déplacer le centre de gravité et de l'amener au-dessous de l'arête du couteau, sur cette arête ou au-dessus, ce qui rend l'équilibre stable, indifférent ou instable.

Pour que la balance soit sensible et penche lorsqu'on établit une très petite différence entre les poids placés dans les plateaux, il faut que le centre de gravité soit très près de l'arête du couteau. Les bras du fléau doivent être longs, et l'arête du couteau, les points de suspension des plateaux doivent être sur une ligne droite.

**Balance romaine.** — La balance romaine est encore en usage dans le midi de la France; on la retrouve dans les bascules des gares.

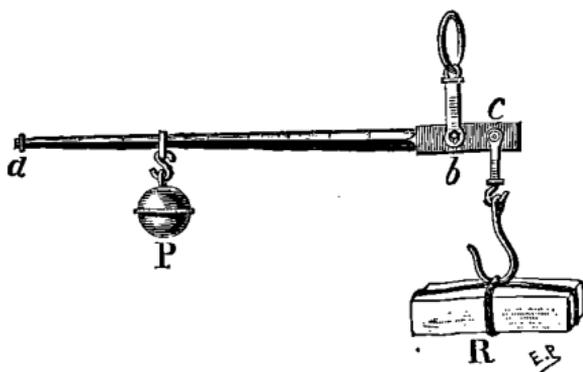


Fig. 211.

Un fléau  $ac$  est soutenu par une chape  $b$  (fig. 241). Il est à bras inégaux. Le corps  $R$  que l'on veut peser s'accroche en  $c$ , à l'extrémité de la petite branche. On lui fait équilibre avec un poids  $P$  d'un kilogramme, je suppose, qui se déplace le long du grand bras  $ab$ . Ce bras porte une graduation en kilogrammes, qui fait connaître immédiatement le poids  $R$ .

Cette graduation peut être établie d'après la loi d'équilibre du levier.

**Balance de Roberval.** — Cette balance, qui est la plus communément employée, se compose de deux fléaux

$c, d$  (fig. 242), mobiles autour de couteaux qui passent par leurs milieux. Ils sont parallèles et reliés, par articulations, à deux tiges verticales  $m, n$  qui portent les plateaux.

Une aiguille, placée au-dessus du couteau supérieur  $c$ , marque sur un arc divisé la position d'équilibre de la balance.

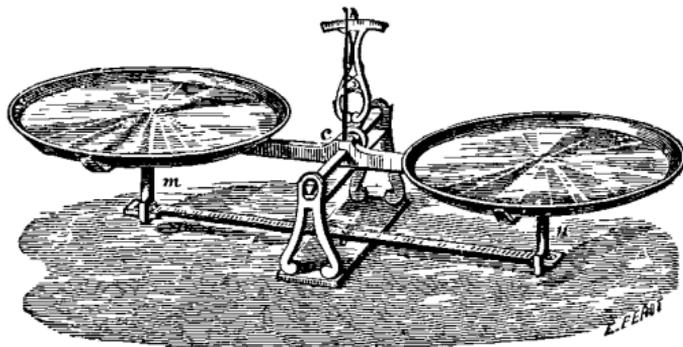


Fig. 242. — Balance à la Roberval.

Les tiges  $m, n$  restent verticales lorsque les fléaux oscillent, et les corps que l'on pèse peuvent occuper sur les plateaux telle position que l'on voudra, sans que les conditions d'équilibre soient changées.

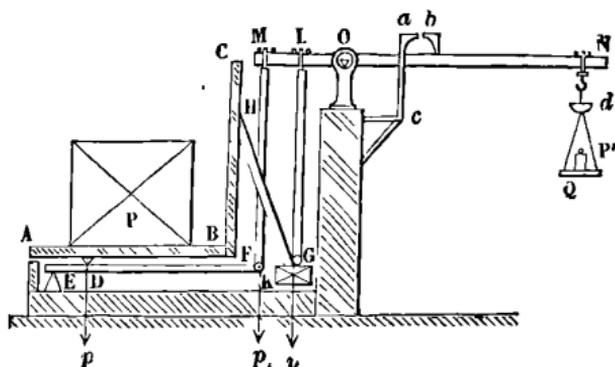


Fig. 243. — Balance-basculé

**Balance-basculé.** — Les bascules ont un petit volume et donnent le poids de lourds fardeaux à l'aide de poids marqués, dix fois moindres.

Le corps que l'on veut peser se place sur un plateau dont on voit la coupe verticale en AB (*fig.* 243). Les poids se déposent sur un petit plateau Q porté à l'extrémité d'un fléau horizontal MN, à bras inégaux. Le couteau O repose sur une chape renversée, fixée au support de la bascule. Deux petits repères *a*, *b*, l'un fixe, l'autre porté par le fléau, doivent se trouver l'un vis-à-vis de l'autre, lorsque l'équilibre est établi.

Le fléau MN est relié, par la tige verticale MF, à un autre levier EDF horizontal, mobile sur un couteau E et offrant en D un point d'appui au plateau AB. Les liaisons M, F des deux leviers sont articulées, de telle sorte qu'ils puissent osciller librement.

Le plateau AB prend un second point d'appui sur une traverse G, à l'aide de la tringle inclinée GH. Cette traverse est soutenue par le fléau MN, à l'aide de la tige verticale GL.

La distance ED est le *cinquième* de EF, de même que la distance OL est le *cinquième* de OM et le *dixième* de ON.

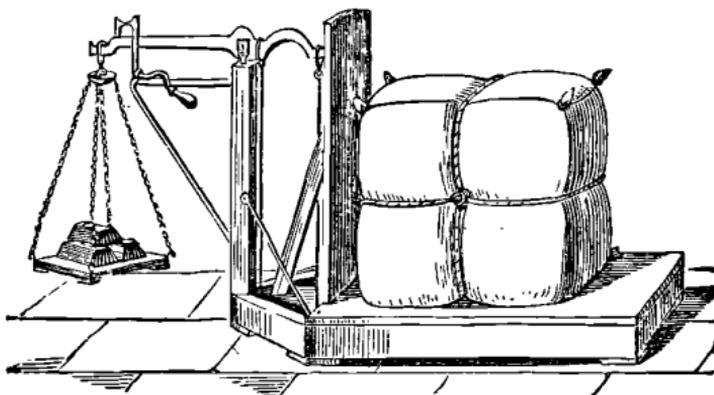


Fig. 244. — Vue d'ensemble de la bascule.

Un poids de 60 kilogrammes repose, par exemple, sur le plateau AB. Ce poids se répartit en deux forces verticales *p* et *p'* qui passent par les points d'appui D et G du plateau. Il y a, par exemple, une pression de 40 kilogrammes en D et de 20 kilogrammes en G. Les 40 kilogrammes pourraient être remplacés par un poids cinq fois moindre, soit 8 kilo-

grammes, appliqué en F; telle est la charge appliquée au point M du fléau. On peut la remplacer elle-même par un poids cinq fois plus grand, 40 kilogrammes, appliqué en L, et, comme ce même point L supporte les 20 kilogrammes supposés appliqués en G, on voit que tout se passe comme si le poids total du corps, 60 kilogrammes, était directement attaché au point L. On lui fera équilibre en plaçant dans le plateau N un poids dix fois moindre ou 6 kilogrammes.

**Poulie.** — Une poulie est un disque de bois ou de métal traversé par un axe qui, assez souvent, s'engage dans une chape. Elle est, sur ses bords, creusée d'une gorge dans laquelle s'enroule une corde qui contourne la poulie sur une portion de sa circonférence.

**Poulie fixe.** — La chape est attachée à un point fixe. Le poids R (*fig.* 245) que l'on veut soulever est supporté par

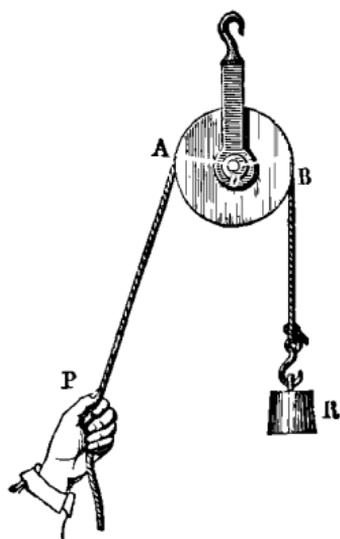


Fig. 245. — Poulie fixe.

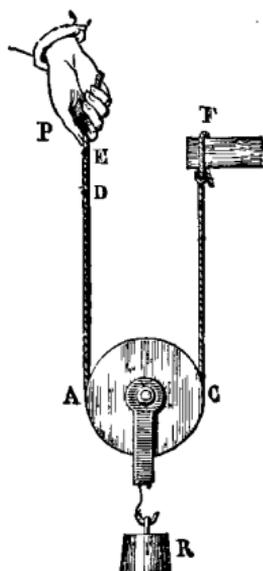


Fig. 246. — Poulie mobile.

une des extrémités de la corde; la main P tire la corde par l'autre extrémité.

Si les deux cordons A, B soutenaient chacun un poids, il faudrait pour l'équilibre que ces poids fussent égaux. En suppo-

sant les cordons parallèles, la main P devra descendre d'un mètre pour que le poids R s'élève d'autant. Les chemins parcourus sont les mêmes, et *le travail de la puissance est égal à celui de la résistance, par suite la puissance est égale à la résistance.*

La poulie fixe change la direction de la puissance :

Appliquée en un des points du cordon BR, elle doit être dirigée de bas en haut pour faire monter le corps R. Si elle était directement appliquée sur le cordon AP, elle devrait agir de haut en bas.

**Poulie mobile.** — Cette fois la corde est attachée, par son extrémité F (fig. 246), à un point fixe. La main tient l'autre extrémité, et la poulie repose sur la corde. Le poids R que l'on veut soulever est supporté par la chape. Nous supposons les deux cordons parallèles.

Lorsque le poids R se soulève d'un mètre, chaque cordon se raccourcit d'autant et la main parcourt verticalement une longueur de deux mètres.

La puissance P fait un chemin 2e double de celui e que parcourt la résistance R.

Lors de l'équilibre, les travaux des deux forces sont égaux :

$$P \times 2e = R \times e \text{ ou } P = \frac{R}{2}.$$

*La puissance est la moitié de la résistance.*

**Moufles ou palans.** — Trois poulies, B, B', B'' (fig. 247), montées sur le même axe, sont soutenues par une chape attachée à un point fixe. Un système semblable A, A', A'' soutient par sa chape un fardeau R. Une corde, fixée en F à la chape fixe, passe successivement sous la première poulie mobile A,

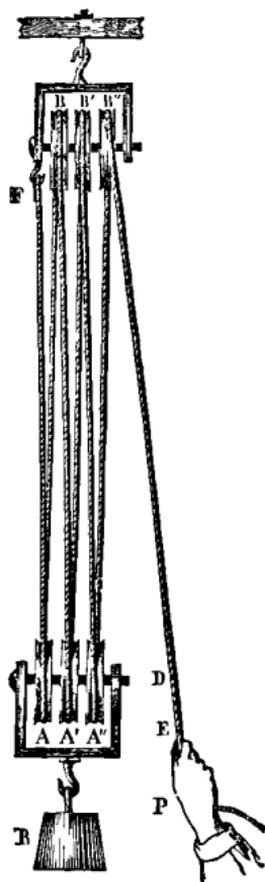


Fig. 247. — Palan.

puis sur la première fixe B, et ainsi de suite pour les autres poulies. La main tient en P le dernier cordon.

Pour soulever la résistance R d'un mètre, il faut raccourcir d'autant chacun des six cordons qui vont d'un système à l'autre. La main doit donc s'abaisser de 6 mètres.

Si le nombre total des poulies est  $2n$ , si le fardeau se souève d'une hauteur  $e$ , la puissance fera un chemin  $2ne$ . Par suite du principe de transmission de travail, on doit avoir le travail de la puissance  $2ne \times P$  égal à celui de la résistance  $e \times R$ ,

ou 
$$P = \frac{R}{2n}.$$

Avec 6 poulies, une force P de 5 kilogrammes fera équilibre à une force R de 60 kilogrammes.

On n'emploie que des palans à quatre ou à six poulies, afin d'éviter de trop grandes pertes de travail par suite des frottements ou de la raideur des cordes.

Cette machine est très souvent employée pour soulever des fardeaux.

**Treuil.** — Le treuil est un cylindre appelé *arbre du treuil*, qui peut tourner autour d'un axe. Pour cela, il se termine à chacune de ses extrémités par un cylindre métallique d'un

petit diamètre, un *tourillon*, qui repose sur deux paliers fixes. Au cylindre est adapté une roue d'un assez grand diamètre dont le plan est perpendiculaire à l'axe.

Le corps R (*fig. 248*) que l'on veut soulever est attaché à une corde qui s'enroule sur l'arbre. La puissance P est appliquée à la circonférence

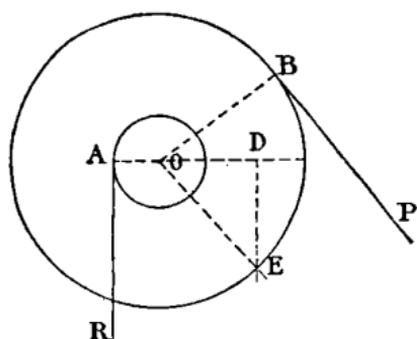


Fig. 248.

de la roue et lui est tangente; on réalisera cette condition si l'homme qui fait manœuvrer le treuil tire dans la direc-

tion BP sur une seconde corde fixée à la roue et enroulée sur elle. Soient OA le rayon de l'arbre, OB celui de la roue.

La figure théorique représente le treuil vu par un œil situé sur le prolongement de l'axe.

L'équilibre des deux forces exige que leur travail soit le même de part et d'autre.

Si le treuil fait un tour complet, il s'enroulera sur l'arbre une longueur de corde égale à la circonférence d'un cercle de rayon OA. Le fardeau se soulève de la même longueur, et le travail de la résistance a pour expression  $2\pi OA \times R$ .

La longueur de la corde fixée à la roue, et qui se déroule sous l'action de la puissance, est égale à une circonférence de rayon OB. C'est le chemin parcouru par la puissance dans la direction de cette force. Le travail accompli est

$$2\pi OB \times P.$$

$$\text{On a donc : } 2\pi OA \times R = 2\pi OB \times P;$$

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

*La puissance est à la résistance comme le rayon de l'arbre est au rayon de la roue.*

Si le diamètre de la roue est dix fois plus grand que celui de l'arbre, une force de 10 kilogrammes agissant comme puissance fera équilibre à une résistance de 100 kilogrammes.

Mais, pour faire monter ce dernier poids de 20 mètres, il faut que l'homme qui fait l'effort de 10 kilogrammes fasse faire à la roue un nombre de tours assez grand pour que le chemin parcouru par sa main soit au moins de 200 mètres.

Ici, comme dans toute machine, *ce que l'on gagne en force, on le perd en vitesse.*

**Rôle des machines.** — L'exemple numérique que nous venons de donner montre bien quel est le rôle d'une machine.

On pourrait dire que le treuil décuple l'effort que fait l'homme. Cet effort de 10 kilogrammes appliqués au point B de la roue maintient entre ciel et terre un poids de 10 kilogrammes attaché à la corde du treuil; c'est vrai. Si on s'ar-

rêtait là, on aurait une idée fort incomplète de la machine.

Elle n'est pas faite pour soutenir ainsi un corps au repos, elle doit le soulever de 20 mètres, et pour cela, il faut la mettre en mouvement. Dans ce cas, on doit accomplir un travail de  $20 \times 100$  ou 2 000 kilogrammètres. Ce travail serait impossible à l'homme, s'il fallait soulever directement le poids de 100 kilogrammes à l'aide d'une corde, comme on tire l'eau d'un puits avec un seau. Le treuil lui permet de faire le même travail en développant un effort moindre.

Il peut faire un petit effort de 2 kilogrammes, mais il lui faudra faire un chemin d'un kilomètre; ce n'est pas pratique. Il peut porter l'effort à 10 kilogrammes, le chemin est réduit à 200 mètres. Il donnera à l'arbre du treuil un rayon d'un décimètre, à la roue, un rayon d'un mètre. La circonférence de la roue sera de 6 mètres environ, et, quand il aura fait 34 tours de roue au plus, le fardeau aura atteint le sol.

N'oublions pas que nous raisonnons sur une machine parfaite et qu'avec les treuils tels qu'on les fabrique il faudra compter avec des pertes de travail, et faire un effort de 15 kilogrammes au lieu de 10 ou plus encore. On dépensera ainsi 3 000 kilogrammètres pour en recueillir 2 000; mais, malgré cette perte de travail, l'effet industriel que l'on veut produire sera accompli; et, comme on ne peut pas faire autrement, on gardera la machine, tout imparfaite qu'elle soit.

**Roue des carriers.** — Pour extraire d'une carrière profonde des blocs de pierre, on donne à la roue de grandes dimensions, relativement à l'arbre qui doit seulement être assez résistant pour soutenir des poids considérables.

La roue (*fig.* 249) est formée de madriers reliés par une couronne de bois dans laquelle sont implantées des chevilles assez fortes pour porter un ou deux hommes. Ceux-ci montent d'une cheville sur l'autre, comme dans une échelle. C'est leur poids qui est la puissance. Il fait tourner la roue et soulève la pierre. Le travail de l'homme consiste à soulever le poids de son corps, et, comme la roue se dérobe sous lui à mesure qu'il monte, on voit sans peine qu'il fait du chemin

tout en paraissant rester à la même place ; et ce ne sera pas sans fatigue qu'il travaillera ainsi pendant quelques heures.

Souvent, dans les treuils, on supprime la roue ; on la remplace par des barres qui traversent l'arbre perpendiculairement à l'axe. L'homme agit sur ces barres, avec ses bras pour faire tourner l'arbre.

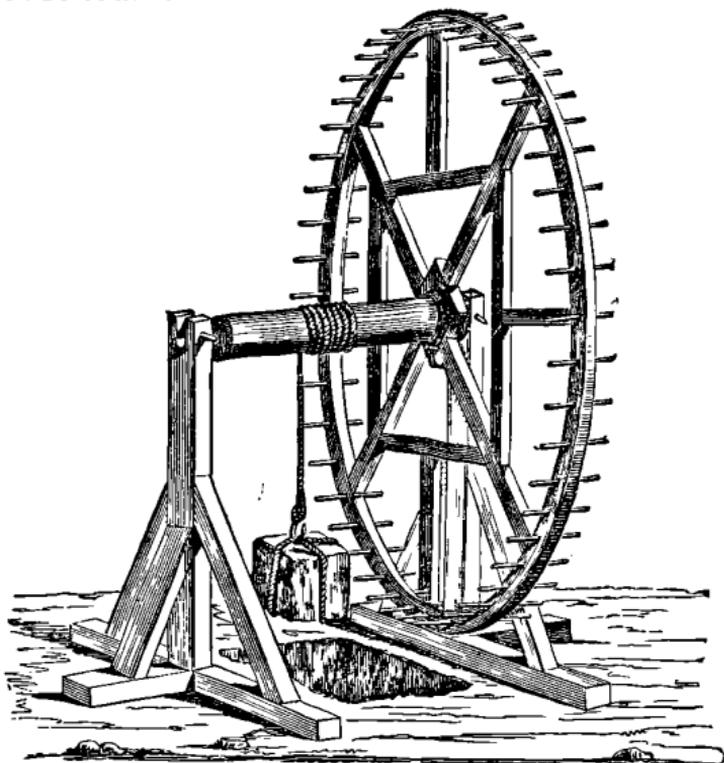


Fig. 249. — Roue des carriers.

**Cabestan.** — Le *cabestan* des bateaux est un treuil à axe vertical que l'on fait tourner en poussant les barres horizontales dont il est muni. Ces barres sont assez longues et assez multipliées pour que les hommes de l'équipage puissent unir leurs efforts, s'il s'agit, par exemple, de déramer l'ancre et de la soulever.

Nous avons déjà dit que l'on fait tourner le treuil des puits à l'aide d'une manivelle qui remplace la roue ou les barres (*fig. 232*).

**Machine composée.** — On trouve une combinaison du treuil et de la poulie fixe dans la *chèvre* des charpentiers.

La *grue*, qui sert à charger ou à décharger les wagons, est une combinaison du treuil de la poulie fixe et de la poulie mobile ou du palan.

Dans le *haquet*, voiture qui sert principalement à transporter des barriques, on trouve un treuil et un plan incliné.

**Vis.** — La vis est un cylindre à la surface duquel s'enroule en hélice un filet saillant dont le profil est carré ou triangulaire.

Le profil est la section du filet par un plan mené par l'axe du cylindre (*fig. 250*). L'hélice est une ligne courbe tra-

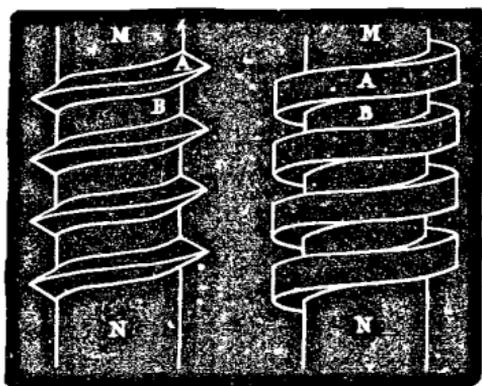


Fig. 250. — Vis.

cée à la surface du cylindre et qui fait en chaque point le même angle avec les génératrices du cylindre. La distance de deux spires d'une hélice mesurée sur la génératrice est le *pas* de l'hélice.

On appelle *pas* de la vis la distance de deux filets. La vis s'engage dans un *écrou* qui est un cylindre reproduisant en

creux la forme de la vis. Le filet saillant de celle-ci s'engage dans un filet de même forme creusé dans l'écrou.

Si l'on fait tourner la vis dans un écrou fixe, en agissant sur une barre fixée dans la tête de la vis, celle-ci s'avance en ligne droite d'une quantité égale au pas pour chaque rotation complète de la vis.

On peut, à l'aide d'une vis, soulever un fardeau porté ou soutenu par son extrémité libre.

Soit 100 kilogrammes le poids du fardeau et deux centimètres le pas de la vis. Supposons que l'ouvrier agisse normalement sur une barre d'un mètre pour faire tourner la

vis, et représentons par  $x$  l'effort qu'il fait estimer en kilogrammes.

Ecrivons que le travail moteur égale le travail résistant. Celui-ci s'obtient à chaque tour de la vis, en multipliant le poids soulevé par le pas  $100 \times 0,02$ .

Le travail moteur se calcule en multipliant l'effort de l'homme par la circonférence du cercle décrit par la main, cercle dont le rayon est un mètre.

Son expression est  $2 \pi \times 1 \times x$ .

On a donc  $2 \pi \times 1 \times x = 100 \times 0,02$ .

$$x = \frac{2}{2\pi} = \frac{1}{\pi} = 0,318.$$

L'effort nécessaire pour faire équilibre au fardeau, à l'aide de la vis, ne serait que 318 grammes ou, environ, les trois millièmes du poids.

Si nous représentons la puissance par  $P$ , et par  $R$  le rayon du cercle qu'elle décrit ; la résistance par  $P'$  et le pas de la vis par  $H$ , la condition d'équilibre de la vis sera

$$P \times 2 \pi R = P' H$$

ou 
$$\frac{P}{P'} = \frac{H}{2\pi R}.$$

Le rapport de la puissance à la résistance est égal à celui du pas de la vis à la circonférence décrite par la puissance.

Celle-ci n'est toujours qu'une fraction très faible de la résistance. De là l'emploi de la vis dans les vérins dont se servent les charpentiers pour soulever des charpentes entières. Dans l'étau, dans les presses (*fig. 251*), la vis sert à exercer une forte pression.

On en a un exemple bien connu dans les pressoirs à cidre ou à vin.

Le tire-bouchon, la vis, qui servent à assembler des planches ou des lames métalliques, les hélices des bateaux à vapeur, peuvent être cités comme des applications usuelles des propriétés de la vis.

Parfois la vis est fixée à ses extrémités et tourne sans pouvoir se déplacer, c'est alors l'écrou qui glisse le long de la vis et prend un mouvement rectiligne.

On en a des exemples dans le *tour parallèle*, dans lequel l'outil entraîné par l'écrou mobile d'une vis s'avance parallèlement à la pièce qu'il doit entamer, tandis que la vis reçoit du dehors un mouvement de rotation continu.

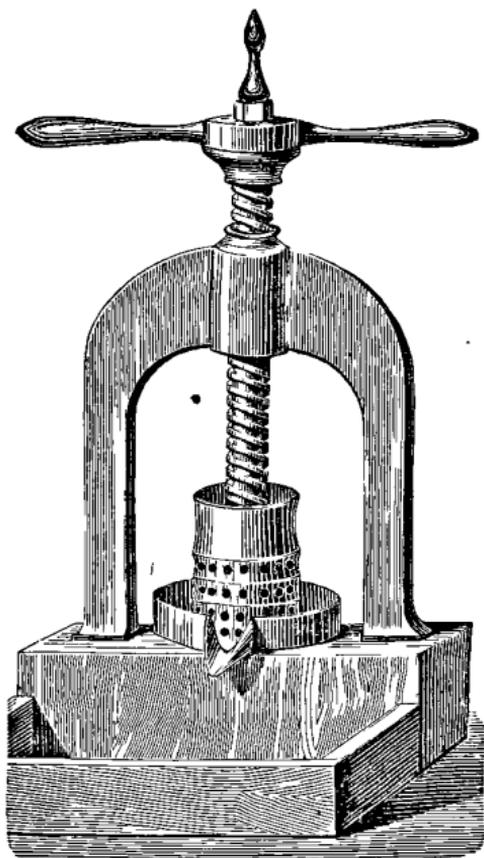


Fig. 251. — Presse.

**Résumé.** — Les machines que nous avons décrites ont toutes ce caractère, que le travail qu'elles fournissent peut, théoriquement, égaliser celui qu'elles reçoivent des forces motrices; elle ne peut jamais le dépasser.

La plus grande somme de travail qu'un homme puisse produire est celle qu'il développe en soulevant son corps sur la roue du treuil des carrières. Il donne ainsi

280 000 kilogrammètres en dix heures de travail. Quel que soit le travail qu'on lui fasse faire, soit avec une bêche, soit à l'aide d'une machine, on n'obtiendra pas de lui un travail plus grand. Plus on compliquera la machine, plus on s'éloignera du but; car on multipliera ainsi les pertes de travail qui proviennent du frottement des parties mobiles, des chocs, des ébranlements qui peuvent s'y produire et qui absorbent inutilement un certain travail.

Il faut bien se mettre cette idée en tête pour ne pas se faire des illusions dangereuses. Méfiez-vous d'un inventeur qui vous propose une machine mue par un homme, et qui ferait le *travail* de dix ouvriers.

Il se trompe ou il veut vous tromper.

Nous disons *travail* et non pas *force*. Un homme, à l'aide d'une machine, peut bien soutenir un poids que dix ouvriers soulèveraient à peine ; mais il le maintient au repos ; et, dans ce cas, il n'y a pas de travail. S'il veut le soulever, il fera, à l'aide de la machine, le travail d'un homme, 28 000 kilogrammètres par heure, au maximum. Si le poids pèse 2000 kilogrammes, tout ce qu'il pourra faire sera de le soulever de dix mètres en une heure, et, avec ce résultat, on pourra dire que l'homme est d'une force peu commune, et que la machine est des meilleures.

**Rendement.** — Dans notre exemple, l'homme a dépensé 28 000 kilogrammètres pour en recueillir 20 000. En divisant le second nombre par le premier, on a le quotient 0,7 qui représente le *rendement* de la machine.

On lui fournit 10 kilogrammètres, elle en rend 7.

Les meilleures machines ont un rendement de 0,8, beaucoup ne rendent que la *moitié* du travail reçu, et on voit parfois le rendement descendre au *quart*.

Il est impossible de construire une machine qui ait un rendement égal à l'unité.

Il est impossible de construire une machine qui, une fois mise en mouvement et soustraite à l'action d'une force motrice, conserve indéfiniment sa vitesse et par suite son énergie. Les frottements, la résistance de l'air, etc., agiront toujours pour diminuer cette énergie et la machine finira par s'arrêter.

Il est impossible de construire une machine qui, une fois lancée et conservant toujours la même vitesse, puisse faire un travail extérieur, soulevant des fardeaux, par exemple, sans l'intervention d'aucune force motrice.

C'est cependant ce qu'espèrent les chercheurs du *mouvement perpétuel*.

Il ne faut ni les imiter, ni les croire. Ce qu'ils cherchent est impossible ; ici-bas, *on ne fait rien avec rien.*

**Transformation du travail en chaleur.** — Les actions mécaniques, telles que le frottement, la compression, le choc, etc., sont accompagnées d'un dégagement de chaleur, nous en avons cité des exemples dans le cours de première année (p. 45).

Rumford<sup>1</sup> eut, en 1798, l'idée de faire bouillir de l'eau en utilisant la chaleur que donne le frottement. L'eau entourait, dans une caisse, un cylindre horizontal de bronze qui recevait d'un manège un mouvement de rotation. Des chevaux attelés au manège fournissaient le travail moteur. Une tarière d'acier pressait sur la pièce de bronze et y forait un trou. L'eau s'échauffait et au bout de deux heures et demie elle était en pleine ébullition.

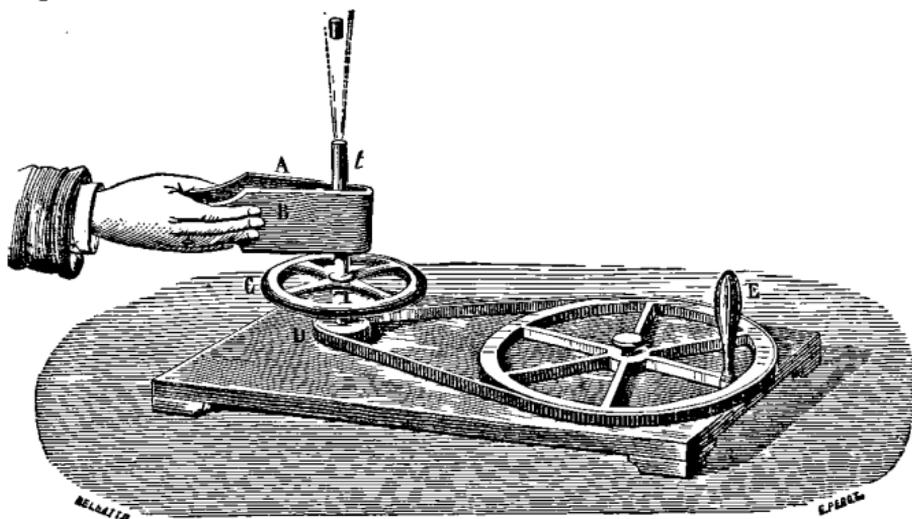


Fig. 252.

Pour imiter cette expérience, on met dans un tube métallique  $t$  (fig. 252) de l'eau ou mieux de l'éther ; on le ferme avec un bouchon.

Le tube est monté sur un axe vertical que l'on fait tourner rapidement à l'aide d'un rouet DE, composé d'une roue E

1. Rumford, né en 1757, mort en 1814.

et d'une poulie *D*, sur lesquelles passe une courroie sans fin<sup>1</sup>; le petit volant *c* régularise le mouvement.

On presse légèrement le tube *t* avec une pince de bois *AB* recouverte de drap à l'intérieur, de manière à avoir un frottement doux. Le dégagement de chaleur qui en résulte est assez grand pour porter l'eau à l'ébullition et la vapeur fait sauter le bouchon. Si on a mis de l'éther et si le bouchon est traversé par un tube de verre effilé, la vapeur d'éther sort par le tube et on peut l'enflammer au dehors.

Dans ces expériences, le frottement emploie une partie du travail moteur qui disparaît; c'est, avons-nous dit, du *travail perdu*.

D'un autre côté, nous voyons apparaître de la chaleur, chaque fois qu'il y a ainsi disparition de travail. On s'est de-

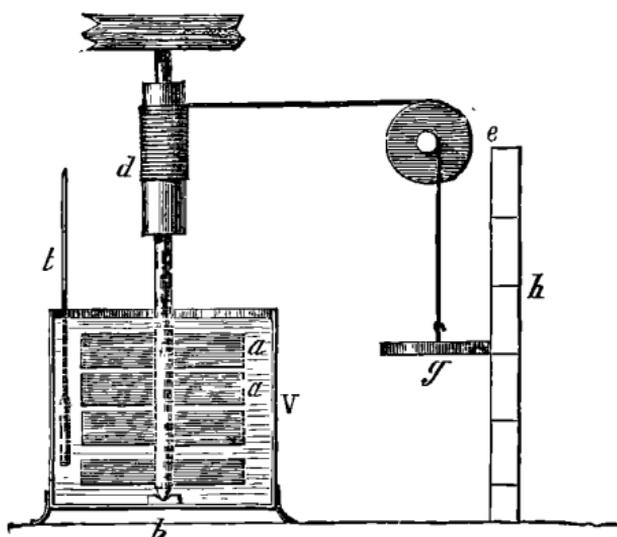


Fig. 253. — Expérience de M. Joule.

mandé quelle relation pouvait bien exister entre le travail perdu et la chaleur produite.

Un savant anglais, Joule, a fait un grand nombre d'expé-

1. Si le rayon de la roue est cinq fois plus grand que celui de la poulie, la circonférence de celle-ci sera contenue cinq fois dans celle de la roue; la courroie égalise la vitesse des deux circonférences évaluées en mètres. Il faut dès lors que la poulie fasse cinq tours pour un tour de roue.

riences sur ce sujet et il a été suivi par un grand nombre de physiciens. Nous ne citerons que les expériences qu'il fit en 1844.

Un vase  $V$  (*fig.* 253) renferme un poids connu d'eau froide que l'on veut échauffer par frottement. Un arbre vertical reposant en  $b$  porte un certain nombre de palettes plongées dans l'eau ; il reçoit un mouvement de rotation et les palettes, en tournant dans l'eau, éprouvent une résistance qui fait disparaître une partie du travail moteur, l'eau s'échauffe ; un thermomètre  $t$  mesure l'élévation de température. En multipliant le poids de l'eau par l'élévation de température, on a le nombre de calories produites par le frottement des palettes sur l'eau.

L'arbre  $b$  porte un cylindre plus gros sur lequel s'enroule une corde. Elle passe sur une poulie  $e$  et supporte un poids  $g$  qui tombe. Une règle verticale divisée  $h$  mesure la hauteur de la chute. Si le poids qui tombe est  $P$  kilogrammes, si la hauteur est  $h$  mètres, le travail moteur, qui est celui de la pesanteur est  $P h$ . On renouvelle la chute un certain nombre de fois  $n$  et  $n P h$  est le travail moteur.

On le compare à la chaleur reçue par l'eau du vase  $V$ . Ces expériences sont très délicates, nous en donnons le principe, sans chercher à les décrire minutieusement.

De toutes les expériences faites par Joule et par d'autres physiciens, il résulte qu'il existe un rapport invariable entre le travail dépensé et la chaleur produite.

Ce rapport porte le nom d'équivalent mécanique de la calorie, on dit le plus souvent équivalent mécanique de la chaleur. Sa valeur est de 425 kilogrammètres pour une calorie.

Cela veut dire que si on laisse tomber un poids d'un kilogramme d'une hauteur de 425 mètres et si on le reçoit à la fin de sa chute, dans une masse d'eau d'un kilogramme à  $0^{\circ}$ , cette eau sera portée à la température d'un degré centigrade.

La perte d'énergie est équivalente à la perte de travail qu'elle pourrait produire et elle engendre de la chaleur en restant soumise à la même loi.

Une balle de fusil qui vient frapper une cible, et qui est

arrêtée en pleine vitesse, s'échauffe parfois assez pour fondre. La chaleur dégagée par le choc d'un boulet contre une cible est bien plus grande encore.

Tout le monde a vu des *étoiles filantes*. Ce sont des masses de pierre qui voyagent dans l'espace et qui pénètrent parfois dans l'atmosphère terrestre. L'air oppose une grande résistance à leur rapide mouvement; elles perdent une partie de leur énergie et la chaleur apparaît en quantité équivalente. Elle est suffisante pour échauffer les pierres jusqu'à les rendre lumineuses. Quelquefois elles les font éclater, les fragments tombent sur le sol; ils sont brûlants. Lorsqu'ils sont refroidis, on les recueille: ce sont les *pierres tombées du ciel*, ou, en langage scientifique, des *aérolithes*.

**Transformation de la chaleur en travail.** — Réciproquement, la chaleur peut, en disparaissant, produire un travail mécanique.

Nous prendrons pour exemple la machine à vapeur. Pour qu'elle travaille, il faut brûler sous la chaudière un certain poids de combustible qui produit de la chaleur. Celle-ci est emportée par la vapeur d'eau qui sort de la chaudière.

\* La vapeur passe dans le cylindre, puis, de là, dans le condenseur, où elle reprend, au contact de l'eau froide, la forme liquide, en échauffant cette eau. Si la machine est au repos, la vapeur apporte dans le condenseur toute la chaleur qu'elle possédait en sortant de la chaudière; chaque kilogramme avait reçu du foyer 650 calories, je suppose. On retrouve ces calories dans le condenseur.

Recommençons l'expérience en faisant travailler la machine. Elle soulève, je suppose, un bloc de pierre de 425 kilogrammes à une hauteur de 20 mètres; le travail accompli, 8 500 kilogrammètres, est l'équivalent de 20 calories. L'expérience montre que l'eau du condenseur ne reçoit plus que 630 calories. La vapeur, en travaillant, a perdu 20 calories. C'est l'équivalent en chaleur du travail accompli.

La machine à vapeur sert donc, en quelque sorte, à transformer la chaleur en travail.

Le calcul que nous venons de faire n'est pas une consé-

quence théorique du principe énoncé de l'équivalence du travail mécanique à la chaleur; nous ne disons pas que les choses doivent se passer ainsi, mais que c'est ainsi qu'elles se passent. C'est encore un fait d'expérience qui s'impose et qu'on ne peut nier.

Un ingénieur français, Hirn, a fait sur une grande machine à vapeur, installée dans une usine d'Alsace, les expériences les plus concluantes; elles confirment tout ce que nous venons de dire. Marche-t-elle à vide, sans faire de travail, la vapeur ne perd rien de la chaleur qu'elle avait en sortant de la chaudière. Si elle fait un travail extérieur, il y a une perte de chaleur équivalente au travail produit.

La transformation de chaleur en travail, c'est ainsi que l'on exprime cette perte, est par là même démontrée.

Nous la retrouvons dans bien des faits qui se passent sous nos yeux.

Le travail de l'homme fait disparaître une portion de la chaleur qui se produit continuellement dans son corps par suite de la combustion de l'hydrogène et du carbone, par l'oxygène de l'air que la respiration introduit dans le sang.

Ce sont les aliments qui renouvellent chaque jour cette provision d'hydrogène et de carbone qui, sans cela, s'épuiserait vite. Il faut manger pour pouvoir travailler.

La chaleur solaire verse sur la mer de grandes quantités de chaleur, l'eau de mer s'évapore, elle forme des nuages; ceux-ci nous donnent la pluie et la neige qui recouvre les sommets des montagnes.

La chaleur solaire fait fondre cette neige, l'eau tombe dans les vallées sous forme de torrents issus des glaciers, ces torrents forment les fleuves, et quel travail mécanique ne peut-on pas tirer d'un cours d'eau! Il transporte des bateaux lourdement chargés, il fait tourner des roues de moulin, et, avant l'invention des machines à vapeur, c'était la source la plus abondante et la plus économique du travail mécanique réclamé par notre industrie. Sans la chaleur solaire, qui porte des masses d'eau au sommet d'une montagne, cette source serait tarie.

Il n'y a pas de végétation sans l'influence du soleil. Elle permet à la plante de faire, jour par jour, provision d'hydrogène et de carbone pour constituer ses tissus. L'arbre grandit, l'homme l'abat et finit par le brûler pour se procurer de la chaleur. On chauffera des locomotives avec du bois, comme cela se fait en Russie. Il en résultera un travail mécanique considérable, qui serait impossible sans la chaleur et la lumière solaire primitivement absorbées par la plante.

En France, on se sert de houille, mais l'origine de cette houille est encore végétale. Le charbon de terre représente le travail des végétaux qui ont couvert la terre pendant plusieurs siècles; c'est le soleil qui leur a permis de vivre et de se développer.

C'est de lui que vient encore cette propriété de brûler, de produire la chaleur et, avec elle, cette énorme quantité de travail que l'on demande dans notre siècle aux machines à vapeur.

J'en ai dit assez pour faire comprendre le rôle bienfaisant et universel du soleil sur le développement de la vie à la surface de la terre, et j'ajouterai, sur le développement des industries humaines.

---

---

## LIVRE II

# PHÉNOMÈNES D'INDUCTION

---

Ampère, un des plus grands physiciens du siècle, a fait des travaux remarquables sur l'action que deux fils de cuivre, traversés par des courants électriques, peuvent exercer l'un sur l'autre.

Une de ses découvertes a une grande importance pour le sujet que nous devons traiter ; je vais l'exposer brièvement.

**Solénoïdes.** — Un fil de cuivre est enroulé en hélice sur

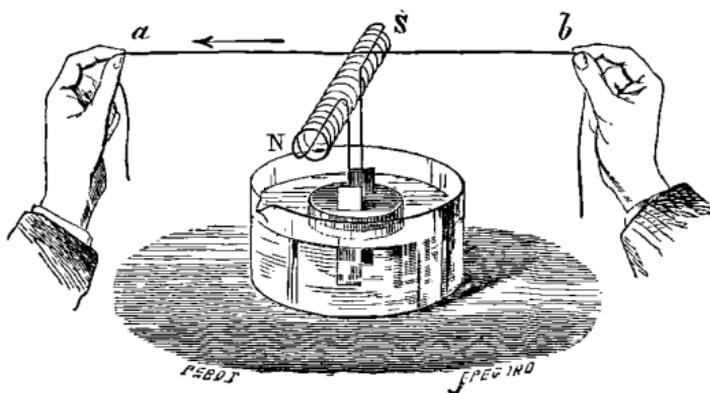


Fig. 254. — Action d'un courant rectiligne sur un solénoïde.

un cylindre, puis ses extrémités NS (*fig. 254*) sont ramenées en ligne droite jusqu'au milieu, recourbées à angle droit et soudées : l'une à une lame de cuivre, l'autre à une lame de zinc amalgamé, verticales, parallèles et engagées dans une plaque de liège. On fait flotter le liège sur de l'eau acidulée, ou, ce qui vaut mieux, sur la dissolution acide du bichromate de potasse qui sert à charger les piles (page 244).

On a ainsi un couple de pile, mobile, dont le courant parcourt le fil en allant du cuivre au zinc.

Le liquide est dans un vase assez large; s'il est en repos, on voit l'hélice s'orienter du nord au sud comme le ferait un aimant, son axe prend exactement la direction de l'aiguille aimantée de la boussole.

En se plaçant en face de l'extrémité dirigée vers le sud, ce que nous appellerons le *pôle sud*, on voit le courant tourner dans l'hélice de gauche à droite, c'est le sens du mouvement des aiguilles d'une montre; ce serait l'inverse, si on se plaçait en face du pôle nord.

Si on retourne l'hélice bout pour bout, elle revient d'elle-même à sa première position, comme le ferait l'aiguille aimantée.

Prenons une seconde hélice mise en communication par ses extrémités avec les pôles d'une pile fixe et approchons



Fig. 255.

l'une de l'autre les deux extrémités  $n, s'$  (fig. 255) des hélices dans lesquelles le courant va dans le même sens.

On voit l'hélice mobile  $n's'$  se porter vers l'autre  $ns$ , il y a attraction; les pôles en présence  $n, s'$  sont de noms contraires. Si on met en présence les pôles de même nom  $n', n''$ , les sens des courants sont différents, l'hélice mobile  $n's'$  s'éloigne de l'hélice fixe  $n''s''$ .

*Les pôles de noms contraires s'attirent, ceux de même nom s'attirent.*

La même expérience réussit si on remplace l'hélice fixe par un aimant, et il n'y a rien à changer à l'énoncé.

Vient-on à placer au-dessus de l'axe de l'hélice  $NS$  (fig. 254) un fil rectiligne  $ab$  traversé par le courant d'une pile fixe, l'hélice se met en croix avec la direction du courant; le pôle

nord de l'hélice se porte à la gauche du courant, définie comme l'a fait Ampère (page 258).

Ces expériences et beaucoup d'autres montrent que l'hélice de cuivre, traversée par un courant électrique, se comporte comme un aimant dont les pôles sont définis par le sens du courant, ainsi que nous l'avons dit plus haut.

Ampère a donné le nom de *solénoïde* à cet aimant électrique.

Il a considéré un aimant d'acier comme assimilable à un solénoïde. En regardant le pôle sud de l'aimant, les courants qu'on y suppose doivent tourner de gauche à droite comme le fait l'aiguille d'une horloge.

Il est bon de remarquer que, si on met une aiguille d'acier dans l'hélice traversée par un courant, elle s'aimante et ses pôles correspondent aux pôles de l'hélice; c'est-à-dire que le pôle nord se trouve du même côté dans celle-ci et dans l'aiguille, comme si les courants de l'hélice avaient développé dans l'acier des courants de mêmes sens.

**Induction.** — *Induction* veut dire *influence*, et les phénomènes dont nous allons parler se rapprochent de l'électrisation par influence, développée dans un corps conducteur, voisin d'une machine électrique. Ils furent découverts, en 1832, par Faraday <sup>1</sup>.

Nous citerons celles de ses expériences que l'on peut regarder comme fondamentales.

**Induction par les courants.** — Deux bobines A, B (fig. 256), sur chacune desquelles s'enroule un fil de cuivre recouvert de soie, peuvent entrer l'une dans l'autre.

La première A, dont le fil est gros et court, communique par des fils conducteurs avec les pôles d'une pile représentée par le couple P. C'est la bobine *inductrice*. La seconde B, bobine *induite*, dont le fil est long et fin, a son circuit fermé par le fil d'un galvanomètre à deux aiguilles G.

*Première expérience.* — La bobine A est introduite rapidement dans la seconde B. L'aiguille du galvanomètre reçoit

1. Faraday, né près de Londres en 1794, mort en 1867

une impulsion qui l'écarte de sa position d'équilibre; elle y revient après quelques oscillations.

Un courant de courte durée a donc traversé le fil du galvanomètre. Le sens de la déviation de l'aiguille nous indique que ce courant a parcouru le fil de la bobine induite B en sens inverse de celui du courant inducteur A.

Il ne se produit rien tant que les deux bobines sont immobiles, l'une dans l'autre.

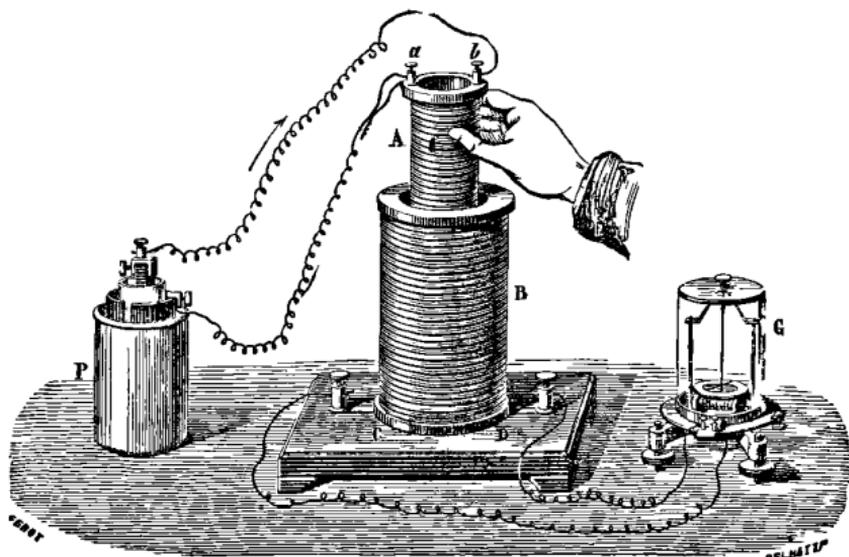


Fig. 256. — Induction produite par un courant.

On retire brusquement la bobine A; l'aiguille du galvanomètre éprouve une déviation dont le sens est inverse de la première, et qui, comme celle-ci, est de courte durée. Le fil de la bobine induite B est, cette fois, traversé par un courant dirigé dans le sens du courant inducteur. Ce que l'on appelle un courant *direct*: le premier courant induit porte la désignation de courant *inverse*.

*Seconde expérience.* — On laisse en place les deux bobines A, B, sans rien changer à la disposition de l'appareil. Mais on introduit dans le circuit de la pile un interrupteur de courant analogue au manipulateur du télégraphe Morse (p. 22).

Au moment où on ferme le circuit et où le courant s'éta-

blit dans la bobine A, il se produit dans la bobine B un courant *inverse* de faible durée, qui donne à l'aiguille une impulsion.

Si on ouvre le circuit de la pile, ce qui fait cesser le courant en A, l'aiguille reçoit une impulsion de sens contraire à la première, ce qui indique la production dans la bobine d'un courant direct.

Toutes les fois que l'intensité du courant inducteur augmente ou diminue, il se produit dans le circuit induit un courant inverse ou direct.

**Induction par les aimants.** — *Troisième expérience.*

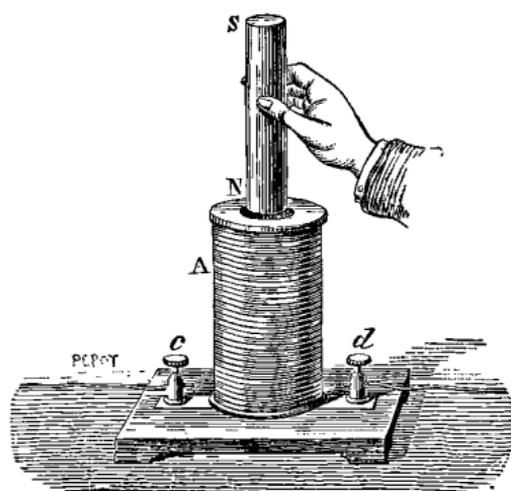


Fig. 257. — Induction produite par un aimant

— La bobine induite A est toujours mise en relation avec le galvanomètre par des fils qui partent des bornes *c, d* (fig. 257). On y introduit un aimant NS; il se produit un courant induit qui fait dévier l'aiguille du galvanomètre.

Une bobine, sur laquelle s'enroulent les nombreuses spires d'un fil conducteur, représente assez bien le fil en hélice d'un solénoïde.

On peut dire que la troisième expérience n'est autre chose que la première, dans laquelle on a remplacé le solénoïde inducteur par un aimant que nous savons lui être assimilable.

Si l'observateur regarde le pôle sud, en dessus, l'aimant remplace une bobine sur laquelle le courant tourne de gauche à droite, comme l'aiguille d'une montre.

Le courant induit est de sens inverse quand on introduit l'aimant dans la bobine; il cesse avec le mouvement de l'aimant; il renaît lorsqu'on le retire rapidement de la bobine, mais il a changé de sens et est devenu *direct*.

Tout cela se déduit du sens des déviations de l'aiguille du galvanomètre.

Si on recommence l'expérience en retournant l'aimant bout pour bout, celui-ci représente une bobine dont le courant tourne de droite à gauche, car l'observateur est en face d'un pôle nord, et alors, les courants induits changent de sens si on les compare aux précédents.

Pour qu'un courant naisse dans la bobine, il suffit que le magnétisme du barreau, laissé à demeure dans la bobine, augmente ou diminue.

C'est ce qui arrive si on approche du pôle supérieur un morceau de fer, ou si on l'en éloigne. Dans le premier cas, le magnétisme du pôle augmente; dans le second, il diminue. De là des courants induits inverse ou direct dans le fil voisin.

#### Quatrième expérience.

— On place dans une bobine B, reliée au galvanomètre, un faisceau de fils de fer E (fig. 258). On en approche le pôle nord d'un aimant; il transforme le faisceau en un autre aimant qui a en F son pôle sud. Il se produit, en même temps, dans la bobine, un courant induit *inverse*, c'est-à-dire dans l'état de la figure, tournant de droite à gauche. Si on éloigne l'aimant, le fer se désaimante, et le courant induit parcourt la bobine de gauche à droite; il est *direct*.

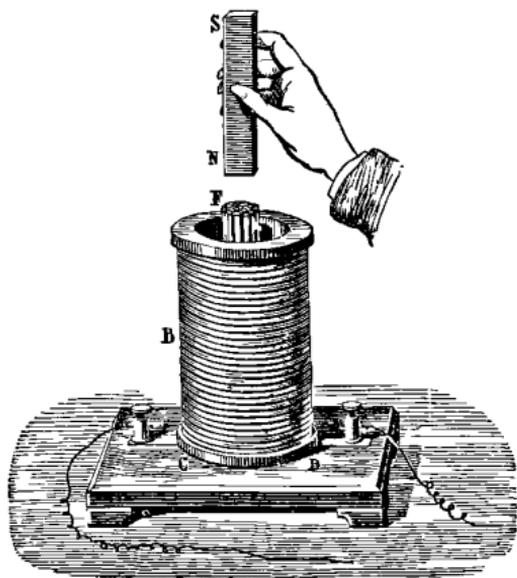


Fig. 258.

Induction produite par l'aimantation du fer.

On observe, dans la seconde expérience, des courants induits beaucoup plus intenses en plaçant dans la bobine inductrice A (fig. 256) un faisceau de fils de fer; le fer est successi-

vement aimanté lorsque le courant passe dans cette bobine; désaimanté, lorsqu'il cesse, il ajoute son action à celle du courant inducteur.

**Extra-courant.** — Si on fait passer le courant de la pile dans une bobine à long fil ou dans celle d'un électro-aimant à noyau de fer, on remarque que l'étincelle qui se produit lors de l'ouverture du circuit est beaucoup plus brillante que si l'on supprime la bobine. Dans certains cas, on éprouve une forte commotion en séparant avec les mains les deux fils conducteurs de la pile.

Lorsque le courant cesse de circuler dans les premières spires de la bobine, il se produit dans les spires voisines qui en sont isolées, un courant induit direct, il renforce l'intensité du courant de la pile.

Ce courant peut vaincre alors la résistance de l'air et produire une étincelle, ou bien traverser les organes du corps humain et agir sur les nerfs; ce qui détermine une commotion.

On a là l'induction d'un circuit sur lui-même, ce qu'on a appelé en France un *extra-courant*, ou en Angleterre la *self-induction*.

En résumé : lorsqu'un circuit fermé est dans le voisinage d'un fil conducteur traversé par un courant, il est le siège d'un courant de courte durée, qui est inverse du courant primaire si celui-ci commence; si les deux circuits se rapprochent; ou encore, si le courant inducteur augmente d'intensité.

Il est direct si les circuits s'éloignent l'un de l'autre; si le courant primaire s'affaiblit ou cesse complètement.

On peut remplacer le courant primaire par un aimant qui s'approche ou par un barreau de fer qui s'aimante. Il y a alors courant induit inverse. Le courant est direct si l'aimant s'éloigne ou si le fer se désaimante.

Les mots *inverse* et *direct* se rapportent à la direction d'un courant qui, circulant autour de l'acier ou du fer, placerait les pôles nord et sud dans la position qu'ils occupent réellement dans les barreaux qui servent à l'expérience.

**Appareils d'induction.** — Nous sortirions de notre

programme si nous voulions décrire en détail les appareils d'induction fondés sur les expériences de Faraday et qui jouent un si grand rôle dans l'industrie électrique moderne. Et comment n'en pas parler ?

Bornons-nous à la description succincte de deux d'entre eux.

**Bobine de Ruhmkorff.** — On ne peut obtenir que de bien faibles étincelles avec une pile d'une vingtaine d'éléments; son courant n'a pas assez de tension.

L'appareil d'induction construit par Ruhmkorff permet de transformer le courant d'un ou deux couples en un courant induit capable de donner des étincelles d'un centimètre et

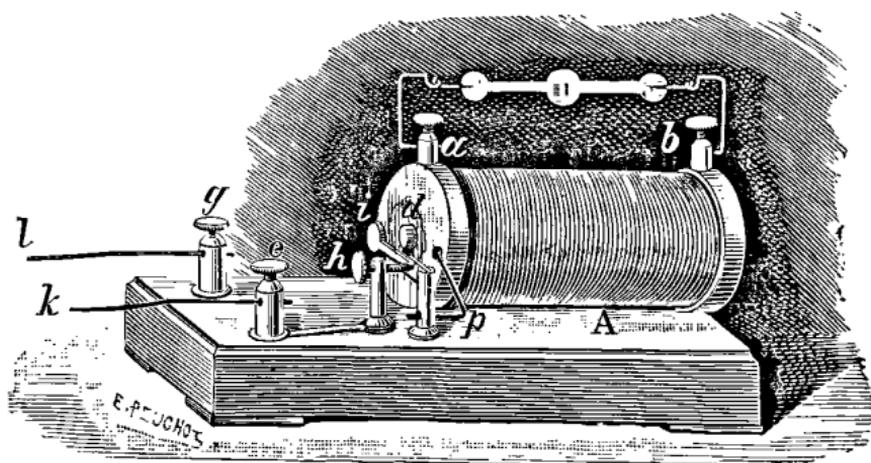


Fig. 259. — Bobine de Ruhmkorff.

plus. Les très grands modèles donnent des étincelles ayant une longueur d'un mètre. Cet appareil se trouve dans le commerce sous de très petites dimensions. Nous choisirons un de ces modèles qui peut trouver sa place dans une école primaire.

Deux bobines horizontales entrent l'une dans l'autre. L'une est intérieure, son fil est gros et court, c'est la bobine inductrice; l'autre extérieure A est couverte d'un fil très fin et très long; c'est la bobine induite (*fig. 259*). Les spires de cette bobine sont isolées avec soin les unes des autres, et pour cela le fil de cuivre est recouvert de fils de soie imprégnée d'un vernis isolant.

Les fils aboutissent à deux viroles  $a$ ,  $b$ , isolées par des disques de verre et qu'on peut appeler les *pôles* de la bobine.

L'axe de la bobine inductrice est occupé par un faisceau de fils de fer  $d$  destinés à augmenter l'intensité du courant induit et à mettre en jeu l'*interrupteur* qui doit ouvrir et fermer rapidement le circuit de la pile.

Cet interrupteur est semblable à celui des sonneries électriques.

Un disque de fer  $i$ , porté par un ressort d'acier, est placé vis-à-vis du faisceau  $d$ . Il s'appuie, à l'état de repos, sur une vis  $h$ , reliée à la borne  $e$ , qui reçoit le conducteur positif  $k$  de la pile. Le fil inducteur  $p$  communique d'un côté avec la lame d'acier qui soutient le disque  $i$ , de l'autre avec la borne  $g$ , à laquelle s'attache le conducteur négatif  $l$  de la pile.

A l'état de repos, le courant passe dans la borne  $e$  et la vis  $h$ ; de là dans le disque de fer  $i$ , le fil inducteur  $p$ , et il retourne à la pile par la borne  $g$  et le conducteur  $l$ .

Un courant induit *inverse* se forme dans la bobine A. Il n'a pas assez de tension pour produire une étincelle entre les fils métalliques fixés aux pôles  $a$ ,  $b$ . En même temps, le noyau de fer  $d$  s'aimante et il attire le disque  $i$ , ce qui l'éloigne de la vis  $h$  et fait cesser le courant inducteur.

Un nouveau courant, *direct*, parcourt la bobine A et une étincelle jaillit entre les pôles  $a$ ,  $b$ .

Le fer  $d$  se désaimante et l'élasticité du ressort ramène le disque  $i$  au contact de la vis  $h$ ; le courant se rétablit.

Les mêmes phénomènes se reproduisent, le ressort et le disque  $i$  oscillent continuellement et les étincelles se succèdent entre les fils polaires. Si on les supprime et si on réunit les pôles avec les deux mains humides, on ressent de violentes secousses, inoffensives avec les petites bobines, bientôt dangereuses avec de plus grandes<sup>1</sup>.

Les étincelles de ces bobines peuvent enflammer une allumette phosphorée, un mélange d'hydrogène et d'oxygène.

1. Dans les grandes bobines, on a placé dans le socle en bois qui les supporte un condensateur à larges surfaces. Cette disposition donne à l'appareil une plus grande puissance.

On obtient de jolis effets de lumière en plaçant entre les fils polaires de petits tubes de Geissler vides d'air (*fig. 260*).

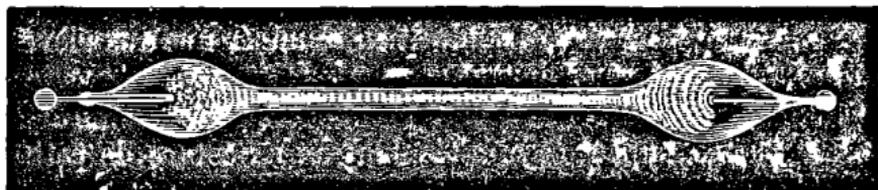


Fig. 260.

L'étincelle se change en une lueur rosée qui remplit l'intérieur des tubes et qui devient violacée autour du fil négatif.

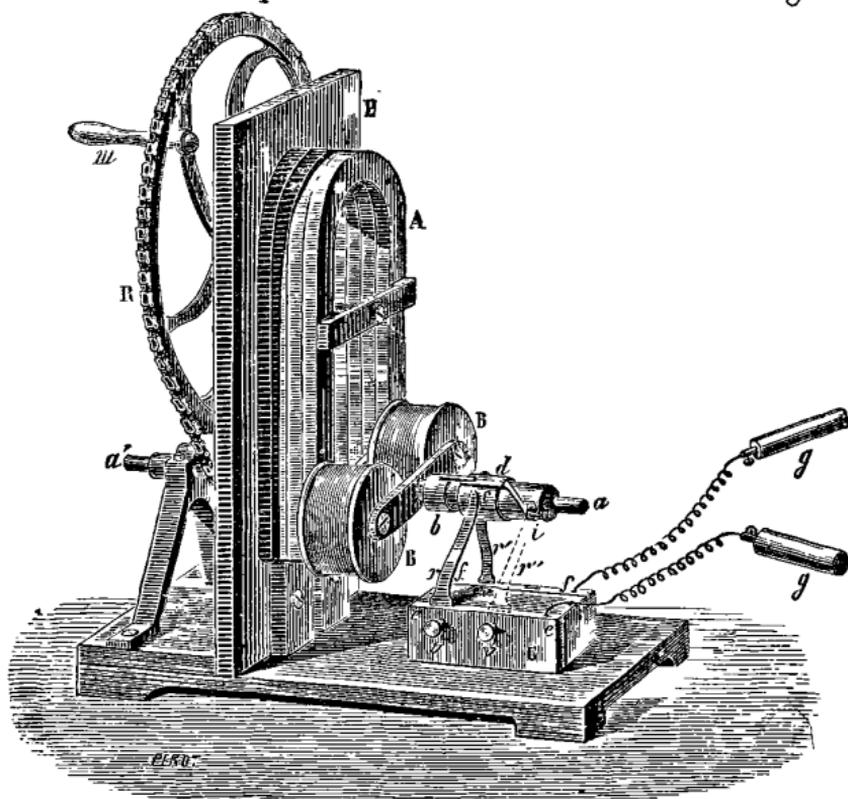


Fig. 261. — Machine de Clarke.

**Machine magnéto-électrique.** — Ces machines servent maintenant à produire les courants électriques très

puissants que l'industrie utilise pour l'éclairage des villes ou pour réaliser des effets chimiques, tels que la dorure ou l'argenture des métaux.

Pour bien les décrire, il faudrait en montrer une aux élèves et la faire fonctionner devant eux.

Pour leur en donner une idée, je choisirai une machine déjà vieille, démodée peut-être, mais dont on rencontre de petits modèles dans le commerce.

Je veux parler de la machine de Clarke.

Il s'agit de créer un courant électrique en utilisant l'action d'un aimant sur un circuit fermé.

Ce circuit est composé de deux bobines à noyau de fer doux BB (*fig.* 261) sur lequel s'enroule un fil de cuivre recouvert de soie. L'enroulement se fait de droite à gauche pour l'une, de gauche à droite pour l'autre, comme dans un électro-aimant, et les deux noyaux de fer sont vissés sur une plaque de fer. Un axe de bronze *aa* horizontal traverse cette plaque. Il repose sur des coussinets et porte une poulie placée au-dessous d'une roue verticale R que l'on fait tourner à l'aide d'une manivelle *m*. Une chaîne sans fin passe sur la roue et la poulie et communique à cette dernière un mouvement de rotation rapide qui entraîne l'axe et les deux bobines B.

Elles tournent devant un fort aimant en fer à cheval, maintenu vertical. Ses pôles sont sur une ligne horizontale ; ils aimantent le fer des bobines lorsque les centres des noyaux sont sur la même horizontale, très voisins des pôles. La désaimantation est complète lorsque la rotation amène ces centres sur une ligne verticale : chacun d'eux se trouvant alors à égale distance des pôles de l'aimant.

**Théorie.** — Essayons d'appliquer à cette machine les principes d'induction que nous avons énoncés.

Plaçons, pour plus de clarté, les surfaces polaires de l'aimant dans le plan de la figure (*fig.* 262), ce qui suppose l'aimant horizontal et ce qui ne change rien à l'explication sommaire que nous allons donner. Une seule bobine *a*, dont le fil a ses deux bouts réunis et forme un circuit fermé, est,

au début, voisine du pôle nord N de l'aimant. Celui-ci agit comme un solénoïde parcouru par un courant  $m$  qui se dirige de la droite à la gauche d'un observateur qui regarde la figure. Le noyau de fer est aimanté et son pôle nord est tourné du côté de l'observateur. Il n'y a pas de courant dans la bobine, si elle est immobile. Faisons-la tourner du côté de la flèche.

Le fer de la bobine se désaimante en s'éloignant du pôle ; le fil de la bobine est traversé par un courant induit direct, tournant de droite à gauche (*première position*). La bobine arrive dans la *deuxième* position, la désaimantation du fer est alors complète, le courant induit cesse.

Dans la *troisième* position, le fer s'aimante de nouveau en s'approchant du pôle

sud S, aimantation de sens inverse de la première, qui amène le pôle sud du noyau en face de l'observateur.

Cette aimantation nouvelle fait naître dans la bobine un courant *inverse* du courant inducteur  $n$ , c'est-à-dire dirigé, comme le premier, de droite à gauche. Il a sa plus grande intensité dans la *quatrième* position qui correspond à l'aimantation la plus forte.

La bobine s'éloigne du pôle sud, arrive à la *cinquième* position.

Il y a désaimantation du fer, production d'un courant *direct* qui, cette fois, va de gauche à droite. Il cesse dans la position (6) et renaît, toujours de gauche à droite, lorsque la bobine va de cette position au pôle nord N.

Ce que nous disons pour une bobine se répéterait pour

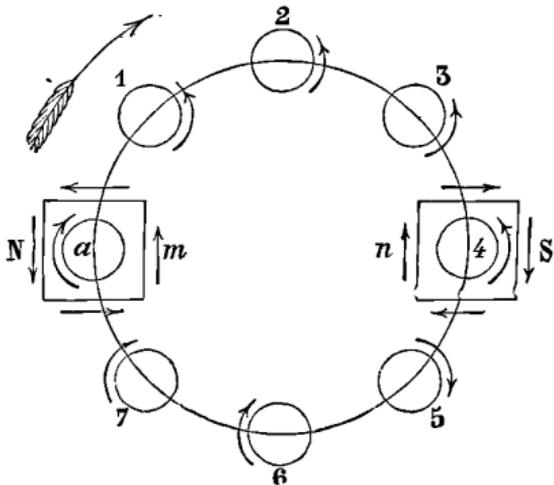


Fig. 262.

l'autre; on voit facilement qu'au même moment les deux bobines sont dans des dispositions diamétralement opposées et les courants qui les parcourent sont de sens inverse l'un par rapport à l'autre. Si les fils des deux bobines ont été également enroulés en sens inverse, les deux bouts extérieurs sont, à la fois, le point de départ des courants induits ou leur point d'arrivée.

En résumé : pendant un tour complet, chaque bobine est traversée par deux courants de sens inverse, ce qu'on appelle deux courants *alternatifs*. L'inversion se fait chaque fois qu'une bobine passe devant l'un des pôles de l'aimant. Ces courants disparaissent lorsque les bobines sont à égale distance des pôles.

Les courants induits n'existent que dans un circuit fermé.

On fait aboutir à l'axe métallique *aa* (*fig. 261*) les deux bouts intérieurs des fils des bobines. Un anneau métallique *b* est soudé aux bouts extérieurs des mêmes fils; il fait corps avec l'axe, mais il en est séparé par un anneau d'ivoire, corps isolant. L'axe *a*, la bague *b*, voilà les deux pôles de la machine.

Deux ressorts d'acier *rr'*, ou deux balais flexibles de fils de laiton, sont implantés dans une pièce fixe *C*; ils appuient l'un sur une lame de cuivre *c* qui est en communication permanente avec l'axe *a*, l'autre avec une seconde pièce *d*, isolée de la première communiquant avec l'anneau *b*. Des fils conducteurs *f*, *e* ferment, en se réunissant, le circuit des deux bobines et permettent d'utiliser au dehors les courants induits qui les traversent.

Ils sont, sur la figure, terminés par des cylindres *g* que l'on tient avec les mains humides. On ressent alors des commotions désagréables lorsque la machine est en action.

Les courants d'induction produisent les mêmes effets que le courant d'une pile.

C'est aux machines d'induction que l'on s'adresse maintenant pour produire de grands effets de chaleur et de lumière.

La machine de Clarke, construite sur de très grandes dimensions, mise en action par une machine à vapeur, a

servi tout d'abord à l'éclairage électrique des phares. Ses courants alternatifs maintenaient incandescentes les baguettes de charbon de l'arc voltaïque (page 256).

On s'en est servi également dans les ateliers de dorure et d'argenture galvanique, mais en ayant soin de redresser les courants à l'aide d'une disposition spéciale pour rendre constant le sens du courant, qui produit la décomposition des sels d'or et d'argent.

**Commutateur.** — L'axe  $aa'$  est entouré d'une bague d'ivoire sur laquelle sont fixés deux demi-anneaux métallique  $c$ ,  $d$  séparés par un petit espace libre. L'un  $d$  communique avec l'axe, l'autre  $c$  est relié à l'anneau  $b$  par une lame métallique. Les ressorts  $r$ ,  $r'$  s'appuient sur ces demi-anneaux. Dans la position de la figure, le ressort  $r$  reçoit l'électricité de l'axe et  $r'$  reçoit celle de l'anneau  $b$ . Si la première est positive, le ressort  $r$  est le pôle positif de la machine.

Il deviendra pôle négatif lorsque la rotation fera passer les bobines devant les pôles de l'aimant. Mais alors, l'axe ayant tourné, le ressort  $r$  ne s'appuiera plus sur l'anneau  $c$ , mais bien sur la lame  $d$  qui reçoit alors l'électricité positive. Ce ressort sera donc toujours le point de départ du courant positif dans le circuit extérieur et le sens de ce courant sera invariable.

**Machine dynamo-électrique.** — Les machines magnéto-électriques ont été délaissées lorsqu'il s'est agi de produire industriellement des courants électriques.

Elles ont été remplacées par des machines imaginées par M. Gramme, qui ont sur la machine de Clarke l'avantage de produire directement des courants continus de même sens. Dans les petits modèles de laboratoire, les courants résultent encore de l'influence que des aimants d'acier exercent sur des bobines mobiles. En remplaçant ces aimants par des électro-aimants, on a augmenté, dans une forte proportion, la puissance des machines qui ont reçu le nom de machines dynamo-électriques ou simplement de *dynamos*.

Leur description, et surtout leur théorie, ne seraient pas ici à leur place; mais ce sont elles qui, mises en action par

une machine à vapeur, par une machine à gaz ou par la roue hydraulique d'un moulin, fournissent l'électricité nécessaire pour l'éclairage d'une ville.

Nous donnons la figure d'une dynamo employée dans l'industrie.

Quatre forts électro-aimants *a, b, c, d* (fig. 263) sont montés sur un bâtis en fer *ef*. Ils sont réunis, deux à deux, par deux armatures de fer *h, h'*, creusées en forme de demi-cylindre. L'armature inférieure *h* constitue un pôle nord, l'armature supérieure *h'* un pôle sud. Un anneau de fer tourne autour d'un axe horizontal *i*. Il est recouvert d'un grand

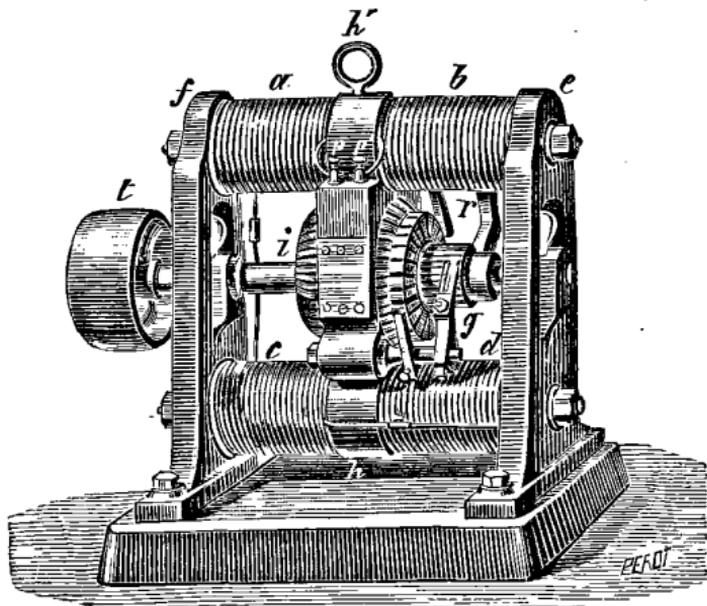


Fig. 263.

nombre de bobines qui l'enveloppent de toutes parts. Le fil enroulé sur une bobine est réuni par une de ses extrémités avec le fil de la bobine précédente, et par l'autre extrémité avec celui de la bobine suivante. De petites tiges de cuivre partent de chaque point de réunion, et enchâssées, d'autre part, dans une roue en ébonite portée par l'axe de rotation *i*, de façon à être isolées les unes des autres, elles forment le collecteur *g*.

Deux balais, formés avec des fils de laiton, s'appuient simultanément sur deux de ces tiges métalliques diamétralement opposées.

Ils recueillent les courants produits par la rotation de l'anneau, et les transmettent à deux bornes  $p, p'$  isolées l'une de l'autre. Ce sont les pôles de la machine : l'un positif, l'autre négatif.

Les électro-aimants n'agissent qu'autant qu'ils sont traversés par un courant électrique.

C'est la machine qui le fournit. On fait aboutir aux bornes  $p, p'$  les extrémités du fil qui passe successivement dans les quatre électros. Le courant d'induction se partage ainsi entre le fil des électros et le circuit extérieur à la machine; c'est dans ce dernier qu'on utilise l'électricité produite.

Le fer des électros, n'étant jamais parfaitement pur, reste toujours un peu aimanté, en sorte qu'il suffit de faire tourner l'anneau pour engendrer dans les bobines un courant induit. Son intensité, faible d'abord, augmente progressivement parce que les électros qui le reçoivent en partie deviennent des aimants de plus en plus énergiques.

Dans un même circuit de résistance constante, l'intensité du courant augmente avec la rapidité du mouvement de rotation, c'est-à-dire avec le nombre de tours que fait l'anneau en une minute. Ce nombre est toujours considérable et varie de 500 à 2000.

On a recours à une machine à vapeur pour réaliser de tels mouvements de rotation.

**Loi d'Ohm.** — Dans ces machines, comme dans les piles, ce qui détermine la production d'un courant dans le fil extérieur qui aboutit aux bornes polaires, c'est la différence de tensions ou potentiels de ces deux pôles. Elle constitue la *force électromotrice* de l'appareil.

L'intensité du courant mesuré à l'aide d'un galvanomètre ou d'un voltamètre dépend de la *résistance* du circuit total, en y comprenant celle de la machine ou de la pile.

Un physicien allemand, Ohm, a établi la relation qui

existe entre la force électromotrice  $E$ , la résistance du circuit  $R$ , l'intensité du courant  $I$ .

La force électromotrice est proportionnelle au produit de l'intensité par la résistance. Elle lui est égale, si on choisit convenablement les unités qui servent à mesurer ces trois quantités.

$$\text{Alors} \qquad \qquad \qquad E = IR.$$

**Loi de Joule.** — Joule, physicien anglais, a énoncé la loi suivante.

Si un courant d'intensité  $I$  parcourt pendant l'unité de temps un fil de résistance  $R$ , il y développe une quantité de chaleur  $Q$  proportionnelle au produit du carré de l'intensité par la résistance.

Si on représente par  $J$  l'équivalent mécanique de la chaleur, on a la relation

$$JQ = I^2R,$$

ou remplaçant  $IR$  par  $E$   $JQ = IE$ .

$JQ$  est l'expression du travail que pourrait réaliser la chaleur produite par l'électricité pendant l'unité de temps, c'est la *puissance dynamique* du courant. Elle est proportionnelle au carré de l'intensité du courant.

**Unités électriques.** — Les électriciens ont choisi un certain nombre d'unités qu'il peut être utile de connaître.

Leurs noms rappellent ceux des grands électriciens du siècle.

L'unité de résistance, ou l'*ohm*, est la résistance d'une colonne de mercure qui a une longueur de 106 centimètres et une section d'un millimètre carré. La température doit être celle de la glace fondante.

On appelle *megohm* une résistance d'un million d'ohms.

L'unité d'intensité est l'*ampère* ou la quantité d'électricité qui décompose en une seconde 0<sup>ms</sup>,093 d'eau. Il faut 96 ampères pour décomposer *neuf* milligrammes d'eau en une seconde.

Cette quantité d'électricité est prise pour unité et s'ap-

pelle un *coulomb*<sup>1</sup>; c'est celle qui décompose 0<sup>ms</sup>,095 d'eau, quelle que soit la durée de la décomposition.

Un courant d'un ampère débite un coulomb par seconde.

L'unité de force électromotrice se déduit, par la loi d'Ohm, des deux précédentes; elle porte le nom de *volt*, abréviation de Volta.

Un volt produit un courant d'un ampère dans un circuit dont la résistance totale est un ohm.

Un couple de Daniell a une force électromotrice peu supérieure à un volt.

La force électromotrice d'un couple Leclanché est 1,46 volts; celle d'un couple de Bunsen, 1,94 volts; celle d'une pile au bichromate, 2 volts.

L'unité de *puissance mécanique* est le *watt*<sup>2</sup>. C'est le travail produit en une seconde par un courant d'un ampère fourni par une machine dont la force électromotrice est un *volt*.

9,81 watts équivalent à un kilogrammètre par seconde.

L'unité de *capacité* est le *farad*<sup>3</sup>; c'est la capacité électrique d'une sphère métallique qui, recevant comme charge un *coulomb*, aurait pour tension un *volt*.

**Téléphone.** — Le téléphone, imaginé en 1876, par Bell, est une des applications les plus remarquables des courants d'induction.

Un disque *d* (*fig.* 264), taillé dans une feuille très mince de tôle de fer, forme le fond d'un entonnoir *e*. Un barreau aimanté *ab*, dont l'axe est perpendiculaire au disque, est placé au-dessous de celui-ci, à une très petite distance. Une petite bobine *c*, recouverte d'un fil de cuivre très fin et isolé, entoure l'extrémité de l'aimant. On voit en *p*, *n* les extrémités du fil de la bobine.

On a deux appareils identiques placés dans deux stations éloignées. Des fils conducteurs, analogues aux fils télégra-

1. Coulomb, né à Angoulême en 1736, mort en 1806.

2. Watt, né en Ecosse en 1736, mort en 1819.

3. Faraday, né en 1794, mort en 1867. On lui doit la découverte des phénomènes d'induction.

phiques, réunissent les extrémités  $p$ ,  $n$  des deux appareils.

Une personne parle devant l'embouchure  $e$  d'un des téléphones, en ayant soin de bien articuler; une seconde personne place son oreille à l'embouchure du second téléphone et entend distinctement les paroles prononcées par la première.

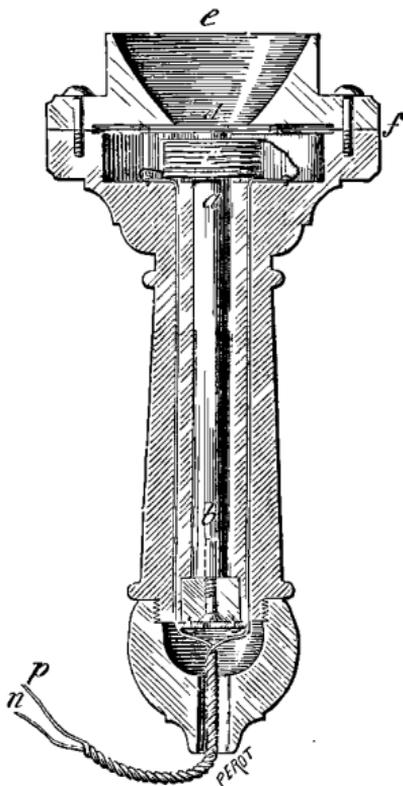


Fig. 264.

Comment l'électricité intervient-elle dans cette curieuse transmission de la parole?

La membrane métallique du premier téléphone vibre sous l'influence directe de la voix. Elle fait des oscillations qui la rapprochent ou l'éloignent de l'aimant. Le magnétisme du pôle voisin se trouve accru ou diminué, et il se développe, dans le fil de la bobine, des courants inverses ou directs qui sont transmis à la bobine du second téléphone par les fils conducteurs qui unissent les deux bobines. Ils augmentent ou affaiblissent le magnétisme

du pôle de l'aimant qu'elle entoure.

La feuille de fer voisine, plus fortement attirée, se porte vers le pôle ou bien son élasticité l'en écarte. Elle répète à distance les mouvements de la première; elle vibre à l'unisson de celle-ci et, par suite, à l'unisson de la voix; elle ébranle l'air et le nerf de l'oreille de la personne qui écoute, comme le ferait la voix, et cette personne entend les paroles qu'on lui adresse.

**Microphone.** — M. Hughes a imaginé une disposition qui sert à transmettre la parole et qui remplace le premier téléphone, celui devant lequel on parle.

Sur une planchette *h* (fig. 265) se trouvent fixés deux morceaux de charbon conducteurs *b*, *c*, creusés en cône et entre lesquels se place une baguette du même charbon, taillée en pointe à ses deux bouts et se mouvant librement. Le conducteur d'une pile *p* aboutit en *e* à la tige métallique qui se rend au charbon *b*. L'autre *c* est relié, par un conducteur *f*, à un téléphone éloigné *t*; un second fil conducteur ramène le courant du téléphone à la pile.

La planchette *h* est mince et elle vibre facilement quand on parle devant elle; le charbon s'agite et ses points de con-

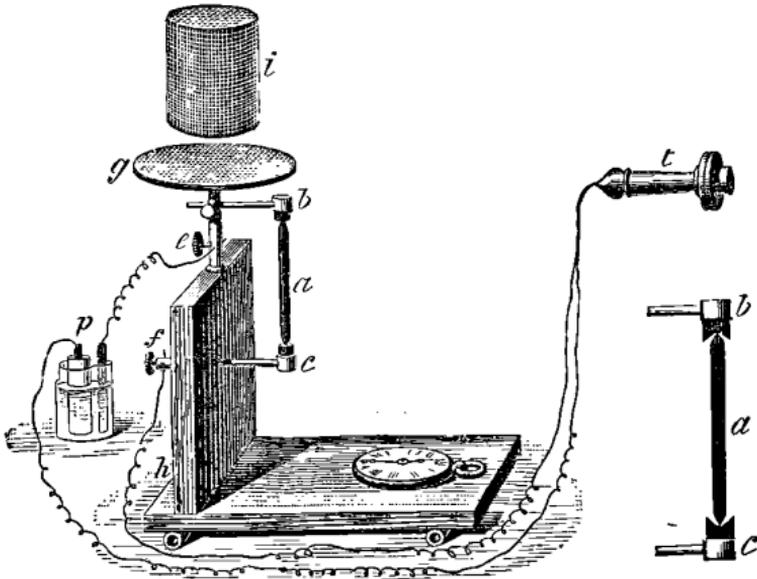


Fig 265.

tact avec les petites coupes *b*, *c* changent de place. Le courant électrique éprouve des résistances variables pour passer d'un charbon à l'autre; son intensité subit des variations correspondantes. Le magnétisme du barreau du téléphone s'accroît ou diminue, et la membrane de fer qui l'avoiisine est alternativement rapprochée ou éloignée du pôle de l'aimant. Dans ces mouvements, elle vibre et reproduit exactement les vibrations de la voix.

Le tic-tac d'une montre placée sous le support du micro-

phone résonne comme des coups de marteau. On entend même le bruit d'une mouche enfermée dans une cage placée sur le plateau *g*.

Un microphone est placé dans une salle de concert; une personne écoute à l'aide d'un téléphone placé à une très grande distance de cette salle et relié au microphone; elle entend avec une netteté merveilleuse la voix des chanteurs, les instruments de l'orchestre. D'ordinaire, elle applique contre chacune de ses oreilles deux téléphones communiquant avec le microphone.

Des téléphones sont installés dans les grandes villes de France. On peut correspondre par téléphone de Paris à Bruxelles, à Londres, à Marseille. C'est un mode de correspondance qui se développe avec une grande rapidité.

---

---

## LIVRE III

# INSTRUMENTS D'OPTIQUE

---

Avant d'aborder la description des instruments d'optique, il est nécessaire de revoir les propriétés des lentilles que nous avons établies par l'expérience (page 75).

**Images données par les lentilles. Foyer.** — Il résulte de nos expériences que tous les rayons parallèles à l'axe principal d'une lentille, qui tombent dans le voisinage de cet axe, les rayons solaires par exemple, donnent à la sortie de la lentille un cône de rayons réfractés qui vont tous passer par un point de l'axe appelé *foyer principal* de la lentille.

Réciproquement, tout rayon lumineux qui passe par le foyer et rencontre ensuite la lentille, en sort dans une direction parallèle à l'axe.

Le foyer est *réel* dans les lentilles convergentes, les rayons réfractés passent réellement par un point de l'axe situé du côté de la sortie des rayons.

Il est *virtuel* et placé du côté de l'arrivée des rayons, si la lentille est divergente. Ce sont les prolongements géométriques des rayons qui le déterminent.

**Axe secondaire.** — Tout rayon, voisin de l'axe, dirigé vers le centre optique de la lentille, la traverse sans éprouver de déviation sensible ; il est, sous ce rapport, comparable à l'axe principal ; on dit que c'est un *axe secondaire*.

Tous les rayons parallèles à cet axe secondaire ont un foyer réel ou virtuel sur cet axe, et tous ces foyers secondaires sont dans un plan perpendiculaire à l'axe et passant

par le foyer principal. Ce plan est le *plan focal*, limité, bien entendu, par un cercle dont le rayon est assez petit et dont le centre est le foyer principal.

**Construction géométrique de l'image d'un objet.** — De ces deux notions, on peut déduire une construction géométrique simple de l'image d'un point lumineux et, par suite, de l'image d'un objet vu au travers d'une lentille.

Nous donnons à l'objet lumineux la forme d'une ligne droite  $ab$  (fig. 266), perpendiculaire à l'axe et placée en avant de la lentille à une distance plus grande que la distance focale principale, qui est ici  $of$ .

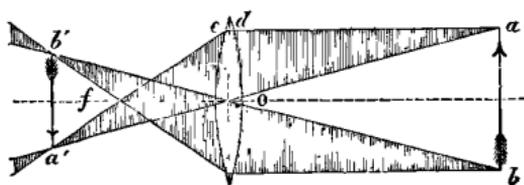


Fig. 266.

Parmi tous les rayons qui s'échappent du point  $a$  dans toutes les directions, il en est un  $ao$  qui est dirigé vers le centre optique  $o$  de la lentille.

Si on réduisait la lentille, dont l'épaisseur est négligeable, à un plan perpendiculaire à l'axe, ce qui est commode, le centre optique serait le point d'intersection de ce plan avec l'axe.

Le rayon  $ao$  est l'axe secondaire du point  $a$  et poursuit, en ligne droite, sa marche à travers la lentille; il sort dans la direction  $a'o$ .

Un autre rayon  $ad$ , parti du point  $a$ , est parallèle à l'axe principal  $of$ . La réfraction le fait passer par le foyer principal  $f$ . Le rayon réfracté  $df$  rencontre en  $a'$  l'axe secondaire. C'est par ce point que passeront tous les rayons réfractés, issus primitivement du point  $a$ . Nous avons indiqué, par des hachures, la forme du faisceau incident parti de  $a$  et du faisceau réfracté correspondant passant par  $a'$ .

Ce point  $a'$  est le *foyer conjugué* du point  $a$ , ce qui veut dire que, si le point lumineux était transporté au point  $a'$ , les rayons lumineux partis de ce point et traversant la lentille iraient, à leur sortie, passer par le point  $a$ .

Le foyer  $a'$  est réel, et un écran de papier placé en ce point serait, au point  $a'$ , illuminé par toute la lumière qui, partie du point  $a$ , traverserait la lentille.

Si on place l'œil au delà de  $a'$ , dans le faisceau ombré qui se prolonge après le croisement des rayons, on voit en  $a'$  une reproduction, une *image* du point  $a$ . On croit voir en  $a'$  le point lumineux  $a$  que l'on peut ne pas apercevoir directement. Nous pouvons substituer cette expression d'*image* à celle de *foyer conjugué*, en leur attribuant le même sens.

Tous les points de la ligne lumineuse  $ab$  ont individuellement leurs images. Ainsi, la construction précédente, appliquée au point  $b$ , donne son image en  $b'$ . Les images des points intermédiaires se trouveront sur la ligne  $a'b'$ . On la verra lumineuse sur un écran de papier; c'est l'*image* de  $ab$ .

La similitude des triangles  $aob$ ,  $a'ob'$  montre que le rapport  $\frac{a'b'}{ab}$  est égal à celui des lignes  $\frac{op'}{op}$ .

*Le rapport des grandeurs de l'image et de l'objet est égal à celui de leurs distances au centre optique.*

Si ces distances sont égales, l'une et l'autre, au double de la distance focale  $of$ , la grandeur de l'image est égale à celle de l'objet.

Si l'objet est placé au delà du double de  $of$ , son image est rapetissée. S'il est entre le double de la distance focale et le foyer, son image est agrandie. Ce qui arriverait si on prenait  $a'b'$  comme objet, son image serait  $ab$ .

Appliquons la construction au cas où la ligne lumineuse  $ab$  (fig. 267) est placée entre le foyer et la lentille.

Les axes secondaires des points  $a$ ,  $b$  sont  $ao$ ,  $bo$ . Les

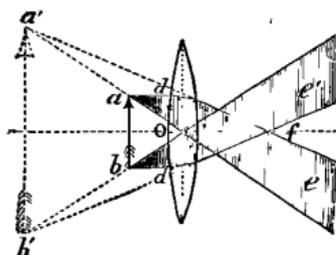


Fig. 267.

rayons  $ad$ ,  $bd'$  parallèles à l'axe passent, après la réfraction, par le foyer; la ligne  $ad$  est plus petite que  $of$ . Les deux rayons  $df$  et  $ao$  prolongés se rencontrent en  $a'$  du côté du point lumineux; le point  $a'$  est l'image virtuelle du point  $a$ , de même  $b'$  est l'image de  $b$ , et la ligne  $a'b'$  représente l'image virtuelle et agrandie de  $ab$ .

On ne la voit dans son ensemble qu'en plaçant l'œil dans la partie commune aux deux faisceaux réfractés  $e$ ,  $e'$ , très près de la lentille.

**Lentilles divergentes.** — Nous mènerons les axes

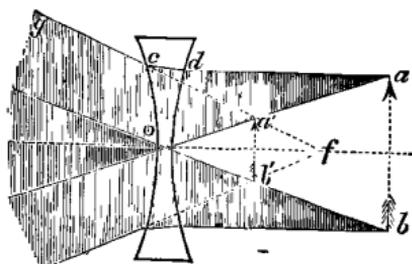


Fig. 263.

secondaires en joignant les extrémités  $a$ ,  $b$  (fig. 268), de la ligne lumineuse au centre optique  $o$  de la lentille. Les rayons parallèles  $ad$ ,  $bd'$  sortent en divergeant; leurs prolongements vont passer par le foyer  $f$ , situé du côté de l'objet.

Ils rencontrent les axes optiques aux points  $a'$ ,  $b'$ . L'image  $a'b'$  est virtuelle et plus petite que l'objet. On ne peut la voir qu'en recevant directement dans l'œil les rayons qui sortent de la lentille<sup>1</sup>.

**Lanterne magique.** — C'est peut-être l'instrument d'optique le plus apprécié de mes jeunes lecteurs, et c'est pourquoi je lui donne la première place.

On se propose de projeter sur un écran, à l'aide d'une lentille, une image réelle et agrandie d'un dessin transparent. C'est le cas traité plus haut (fig. 266), en prenant  $a'b'$  pour l'objet et  $ab$  pour l'image.

Le dessin peint sur verre doit être fortement éclairé pour que son image soit visible dans ses détails, lorsqu'elle couvrira une large surface.

1. La construction des images que nous venons de décrire s'applique intégralement aux images données par les miroirs sphériques, concaves ou convexes. Dans ce cas, les axes secondaires joignent le point lumineux dont on cherche l'image au centre géométrique du miroir.

Une lampe à huile ou à pétrole A (*fig. 269*) est enfermée dans une lanterne métallique MB; celle-ci présente en avant une seule ouverture par laquelle la lumière peut sortir. Cette ouverture est fermée par une lentille convergente *l*; la flamme en occupe le foyer. Les rayons qu'elle envoie sortent de la lentille dans la direction horizontale; ils traversent la lame de verre V, sur laquelle se trouve le dessin, et l'éclairent fortement. Cette lame glisse dans des fentes parallèles pratiquées dans un tuyau conique, fermé en avant par une len-

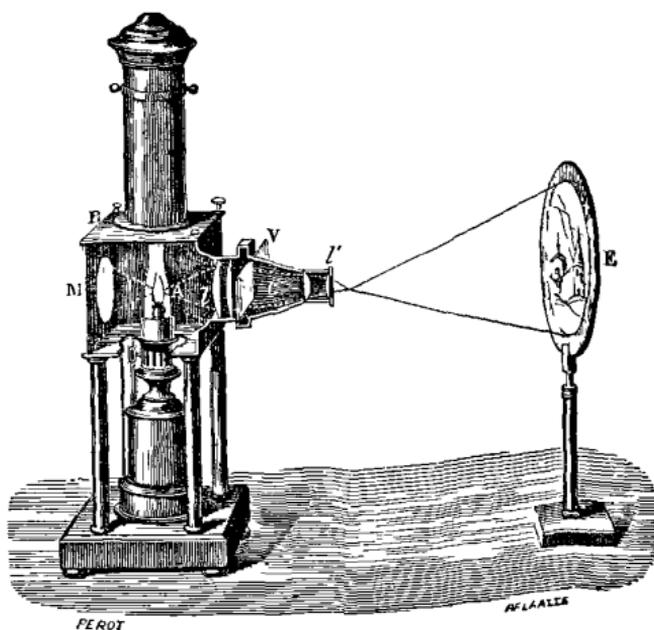


Fig. 269. — Lanterne magique.

tille convergente *l*. Le verre se trouve un peu plus loin que le foyer de cette lentille; son image réelle et agrandie se forme sur l'écran E. La lentille *l* peut avancer ou reculer, ce qui permet d'obtenir sur l'écran l'image la plus nette possible : ce qu'on appelle *mettre au point*. On renverse le dessin pour qu'il apparaisse droit sur l'écran.

**Chambre noire.** — La chambre noire est l'instrument des photographes.

Elle se compose d'une boîte opaque (*fig. 270*), en bois par

exemple, formée de deux parties qui entrent à frottement l'une dans l'autre. On peut, en tirant la partie postérieure, augmenter la longueur de la boîte. On fixe avec une vis D cette partie mobile. Elle est fermée par une glace dépolie *c*. La paroi antérieure de la boîte est percée d'une ouverture circulaire dans laquelle on visse un tuyau A qui renferme une lentille convergente, l'*objectif*. On peut, à l'aide du bouton B.

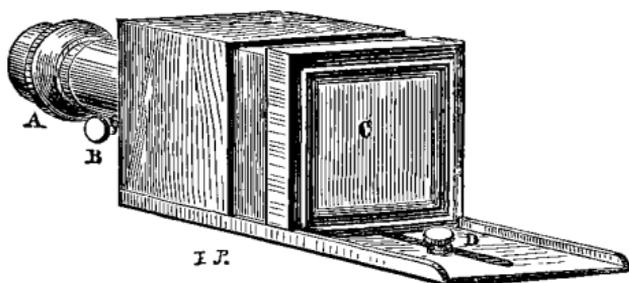


Fig. 270.

déplacer un peu cette lentille dans le sens de l'axe du tuyau ; il est possible d'amener sur la glace *c* l'image réelle et plus petite des objets placés devant l'objectif et de lui donner la plus grande netteté possible. Cette image est renversée.

**Photographie.** — On sait que les papiers de tenture, les rubans pâlisent et se décolorent s'ils sont longtemps exposés au soleil. Le chlorure d'argent, qui est blanc, noircit à la lumière solaire, le bromure, l'iodure d'argent sont également altérés par elle.

Ce sont ces actions chimiques que le photographe utilise. Lorsqu'il a mis au point l'image qui se forme sur la glace de la chambre noire, il enlève cette glace et la remplace par un châssis de bois renfermant une lame de verre recouverte d'une couche très mince d'une substance rapidement altérable à la lumière. Puis il fait apparaître et il fixe l'image qui s'est produite sur le verre, par des procédés que nous ne développerons pas ici.

La photographie est d'origine française. Les premiers essais furent tentés en 1823, par Nicéphore Niépce. Plus tard, en 1839,

## VISION.

Daguerre réussit à fixer les images de la chambre noire sur une plaque d'argent. La photographie sur papier, inventée en Angleterre, par Talbot, ne se développa qu'à partir de 1848.

Deux physiciens français, E. Becquerel en 1849, et Lippmann en 1892, sont parvenus à reproduire une image photographique du spectre solaire avec toutes ses couleurs.

**Vision.** — Nous devons faire remarquer que l'œil de l'homme renferme tous les éléments d'une chambre noire. Les membranes qui le limitent sont opaques, à l'exception de la partie antérieure qui est transparente. La prunelle est seule percée d'un petit trou, la *pupille*, qui laisse passer la lumière.

Une véritable lentille convergente, le *cristallin*, se trouve derrière la pupille, et l'écran sur lequel doit se projeter l'image des objets extérieurs est la *rétine*, membrane nerveuse qui s'étale au fond de l'œil. Le reste de la cavité oculaire est tapissé d'une membrane noire qui éteint tout reflet. Elle est remplie par un corps transparent qui a la consistance d'une gelée.

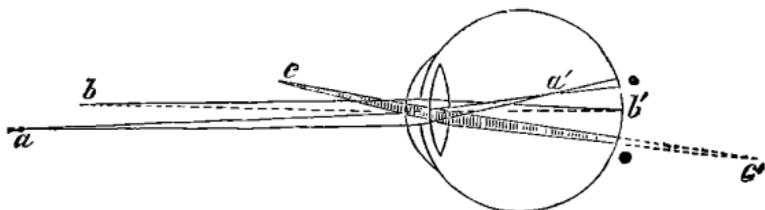


Fig. 271.

Soit un point lumineux *b* (fig. 271) placé devant l'œil. Il envoie sur la pupille un étroit faisceau de lumière qui tombe sur le cristallin. Les rayons réfractés par cette lentille forment un second faisceau conique dont le sommet *b'* est placé sur la rétine. Il y a donc un seul point de cette rétine impressionné par la lumière, et le filet nerveux qui lui correspond transporte cette impression au cerveau; nous voyons ainsi le point lumineux.

Si ce point fait partie d'un objet, d'une flamme, il se forme

sur la rétine une très petite image de cette flamme, réelle et renversée, et le cerveau reçoit l'impression de la lumière par un certain nombre de filets nerveux correspondant aux points éclairés de la rétine. Comment ces impressions se transforment-elles en sensations visuelles? C'est ce que tout le monde ignore.

Si un point  $a$  est placé devant l'œil beaucoup plus loin que le point  $b$ , son image se fait en  $a'$  en avant de la rétine, et le faisceau réfracté, continuant sa route, trace sur celle-ci un petit cercle qu'il impressionne. Les points voisins de l'objet produisent d'autres cercles qui recouvrent en partie le premier; la vision est confuse. Il en est de même, si le point lumineux  $c$  est placé plus près de l'œil que le point  $b$ . Son image ne peut se former dans l'œil; elle se ferait en  $c'$  bien au delà de la rétine et la vision redevient confuse.

Il y a donc, pour chaque personne, une distance à laquelle il faut placer les objets pour qu'ils soient vus nettement. C'est à cette distance que l'on place la page d'un livre pour la lire.

C'est la distance de la *bonne vue* ou de la *vision distincte*.

Elle est en moyenne de 35 centimètres, mais elle varie d'une personne à l'autre. Les myopes mettent le livre à une distance moindre, les vieillards l'éloignent davantage. Les premiers ont l'œil trop convergent; ils corrigent ce défaut en regardant les objets au travers de lentilles divergentes convenablement choisies.

Les lunettes des vieillards sont des lentilles convexes qui augmentent la convergence des rayons trop faiblement déviés par l'œil.

**Loupe.** — Un très petit objet, placé à la distance de la bonne vue, donne sur la rétine une image trop petite pour que les détails en soient nettement perçus.

Il faudrait contempler cet objet dans une image agrandie, placée à la distance de la vision distincte; c'est à cela que sert la *loupe*.

C'est une simple lentille convergente que l'on place très près de l'œil. L'objet que l'on veut examiner est tenu devant

la lentille, en pleine lumière, entre cette lentille et son foyer principal.

Il se forme pour l'œil une image virtuelle et plus grande, droite, que l'on voit nettement si la distance de la lentille et de l'objet est convenable ; on tâtonne, on avance ou on recule un peu l'objet, et on arrive promptement au point qui donne la vision la plus nette.

Nous reproduisons ici une figure déjà donnée (fig. 272) et qui convient à la loupe. La ligne  $ab$  est l'objet ;  $a'b'$  est l'image ;  $op'$  la distance de la bonne vue. L'œil est appliqué contre la loupe, pour recevoir le plus de lumière possible.

Il ne faut pas dire, comme on le fait communément, que la loupe grossit les objets ; elle en donne une image plus grande.

Nous appellerons *grossissement* de la loupe le rapport des longueurs de l'image  $a'b'$  à l'objet  $ab$ . C'est le grossissement *linéaire* ; supposons-le égal à 10.

Prenons pour objet un carré dont le côté  $ab$  soit d'un millimètre ; sa surface sera d'un millimètre carré. L'image sera un autre carré, son côté  $a'b'$  a pour longueur un centimètre, sa surface couvre un centimètre carré ou *cent* millimètres carrés. Le grossissement en surface est alors *cent*. Ainsi énoncé, le grossissement de la loupe pourrait faire illusion.

Le grossissement d'une loupe  $\frac{a'b'}{ab}$  est égal au rapport des lignes  $\frac{op'}{op}$ , et comme  $op'$  est la distance  $d$  de la bonne vue de l'observateur et que  $op$  est sensiblement égal à la distance focale  $f$  de la loupe, on a pour expression du grossissement le rapport  $\frac{d}{f}$ . Il est plus grand pour un œil presbyte que pour un myope. Il est d'autant plus grand, pour le même œil, que

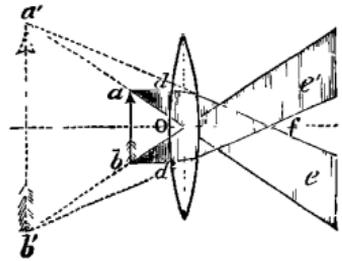


Fig. 272.

la lentille a un foyer plus court, c'est-à-dire que la distance  $of$  est plus petite.

Les horlogers se servent de la loupe pour examiner les rouages d'une montre.

**Microscope simple.** — Lorsqu'on se sert de la loupe pour observer des objets d'histoire naturelle, animaux ou parties d'une plante, on la complique un peu de quelques accessoires qui rendent l'observation plus commode (*fig. 273*).

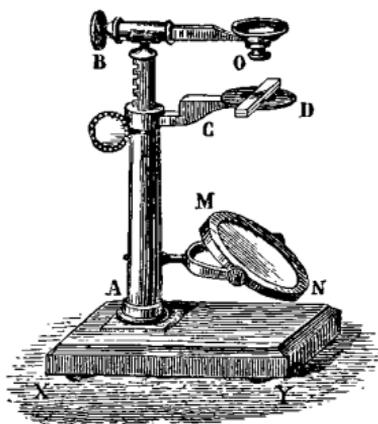


Fig. 273. — Microscope simple.

On suppose l'objet transparent; il repose sur une lame de verre que soutient une plaque métallique *D* percée d'un trou central. La loupe *O* est à l'extrémité d'une tige horizontale; on peut la faire avancer ou reculer

en faisant tourner le bouton *B*. Un miroir *M* réfléchit la lumière des nuées et éclaire l'objet en dessous. On peut faire monter ou descendre la plaque *D*, à l'aide d'un pignon *F* que l'on tourne et qui agit sur une crémaillère logée dans le pied de l'appareil. On met ainsi l'objet au point.

On trouve dans le commerce de petites loupes enchâssées dans une monture en corne, au nombre de deux ou trois. On fait varier le grossissement en les superposant.

**Microscope composé.** — Le grossissement d'une loupe est toujours très limité; car, si on diminue les dimensions de la lentille pour obtenir un fort grossissement, l'œil ne reçoit plus assez de lumière pour bien voir l'image.

Pour obtenir de forts grossissements, il faut avoir recours à un appareil plus compliqué, le *microscope composé*. Il fut inventé, dit-on, en 1590, par le Hollandais Jansen.

En le réduisant à ses éléments essentiels, nous y trouvons deux lentilles convergentes, portées par le même tube métallique et ayant même axe.

La première, voisine de l'objet, ce qui lui a fait donner le nom d'*objectif*, a un très court foyer.

La seconde, voisine de l'œil, l'*oculaire*, a de plus grandes dimensions; c'est une véritable loupe.

Avant de décrire l'ensemble d'un microscope, donnons la marche des rayons lumineux qui, partis des divers points de

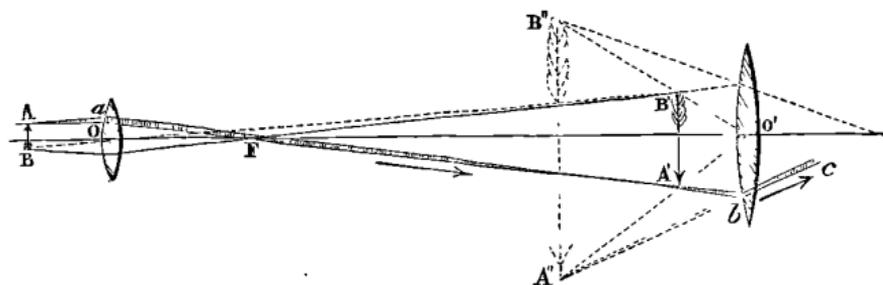


Fig. 274. — Marche d'un rayon dans le microscope.

l'objet AB (*fig.* 274), parviennent à l'œil après avoir traversé les deux lentilles : l'objectif O et l'oculaire O'.

L'objet AB est placé un peu au delà du foyer de l'objectif O. Celui-ci en donne une image réelle et agrandie A'B'; elle se forme assez loin de l'objectif; elle est renversée. La construction géométrique que nous avons indiquée en donne la place exacte; nous n'avons tracé que la marche d'un mince faisceau parti du point A et dont les rayons réfractés se croisent en A', pour continuer leur marche jusqu'à l'oculaire. Les rayons partis du point B se croisent au point B'. Cette image A'B' se forme entre l'oculaire et son foyer  $f'$ ; cette lentille est une véritable loupe. Elle change la direction des rayons A'b qu'elle reçoit et leur donne, à la sortie, une direction bc. Si on les prolonge à gauche, ils se rencontrent au point A'' qui est l'image du point A', considéré comme un objet lumineux. De même le point B'' est l'image du point B'.

L'image définitive que voit l'observateur dont l'œil est très voisin de l'oculaire, un peu au delà de O', est virtuelle; elle est renversée par rapport à l'objet AB, elle est plus grande que A'B' et, par suite, beaucoup plus grande que AB;

car, si l'image  $A'B'$  a une longueur 40 fois plus grande que  $AB$ , ce qui porte à 40 le grossissement de l'objectif; si, d'autre part, l'image  $A''B''$  est égale à 5 fois  $A'B'$ , le grossissement de l'oculaire est 5. L'image observée  $A''B''$  sera 200 fois plus grande que l'objet  $AB$ .

Le grossissement du microscope sera 200; c'est le produit des grossissements individuels de l'objectif et de l'oculaire.

Les deux lentilles sont portées par deux tubes de cuivre qui entrent à frottement l'un dans l'autre.

L'extérieur se termine en bas par l'objectif  $b$  (fig. 275).

Le tube intérieur est fermé en  $a$  par l'oculaire.

En tirant ce tube, on fait varier la distance de l'oculaire à l'objectif.

Le tube  $ab$  est porté par un pied; dans certains modèles, ce pied peut tourner autour d'une charnière  $h$ , et on donne ainsi au tube une direction inclinée, ce qui rend l'observation plus commode. La partie mobile du pied porte une plaque  $c$  percée d'un

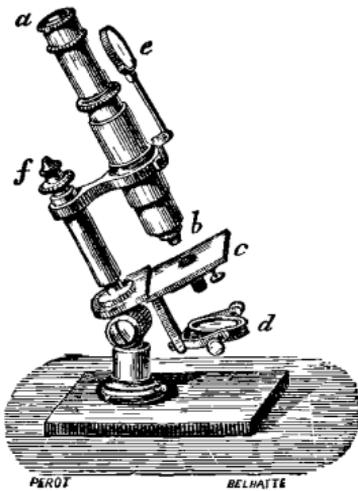


Fig. 275. — Microscope.

trou central. On y dépose, entre deux lames de verre mince, l'objet que l'on veut examiner; elles sont maintenues sur la plate-forme par de petits ressorts qui ne sont pas indiqués sur la figure. Une vis intérieure, dont on voit la tête en  $f$ , permet de rapprocher le tube  $ab$  de la plate-forme, ou de l'en éloigner, ce qui est indispensable pour mettre l'objet au point et pour donner à l'image la plus grande netteté.

L'objet, s'il est transparent, est éclairé en dessous par le petit miroir  $a$  qui reçoit, non pas la lumière solaire, mais la lumière du ciel; la lumière solaire éblouirait l'observateur et causerait promptement de dangereuses maladies de l'œil.

Si l'objet est opaque, on l'éclaire en dessus à l'aide de la lentille convergente  $e$  dont la tige est mobile.

Le tube du microscope est noirci à l'intérieur pour éviter tout reflet de lumière. On y trouve des plaques percées d'un trou central, perpendiculaires à l'axe pour écarter tous les rayons qui tomberaient sur les bords de l'oculaire. On ne conserve que ceux qui la rencontrent dans sa partie centrale; eux seuls donnent une grande netteté aux images.

Enfin, dans les microscopes modernes, l'oculaire est composé de deux lentilles; l'objectif est formé de deux ou trois petites lentilles superposées. Ce qui permet d'obtenir des images nettes avec un fort grossissement et d'augmenter le champ de l'instrument, c'est-à-dire l'étendue de l'espace que l'on peut voir.

On fait varier le grossissement en changeant, soit l'objectif, soit l'oculaire. Seulement, la clarté des images s'affaiblit à mesure que le grossissement augmente.

**Lunette astronomique.** — Le microscope fait voir de très petits objets, la lunette astronomique sert à observer ceux qui sont très éloignés.

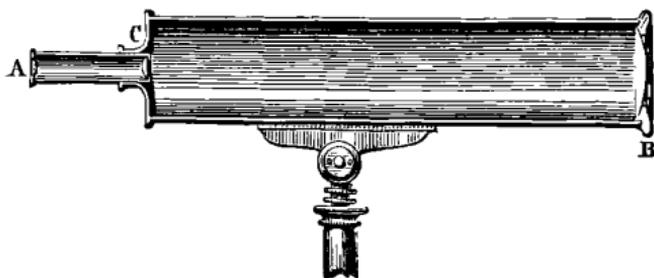


Fig. 276. — Lunette astronomique.

Képler, le grand astronome<sup>1</sup>, indiqua, en 1611, comment on pourrait construire un tel appareil; un autre astronome, le P. Scheiner, réalisa peu après l'idée de Képler.

On trouve encore dans la lunette, simplifiée autant que possible, un objectif et un oculaire qui sont des lentilles convergentes. L'objectif a de plus grandes dimensions et une

1. Képler, né en 1571, mort en 1630.

distance focale plus grande que l'oculaire. La forme des lunettes que l'on tient à la main est bien connue.

Notre figure représente une lunette portée par un pied, autour duquel elle peut tourner dans tous les sens, elle se meut également de haut en bas, dans un plan vertical.

L'objectif B (*fig. 276*) ferme l'entrée du tube principal qui est assez long. L'oculaire A est porté par un tube à tirage qui permet de faire varier la distance des deux lentilles et de mettre la lunette au point. Comme dans le microscope, des plaques percées d'un trou central limitent la largeur du faisceau lumineux qui tombe sur l'oculaire.

**Marche des rayons.** — La marche des rayons lumineux qui traversent la lunette est analogue à celle que nous avons donnée à propos du microscope.

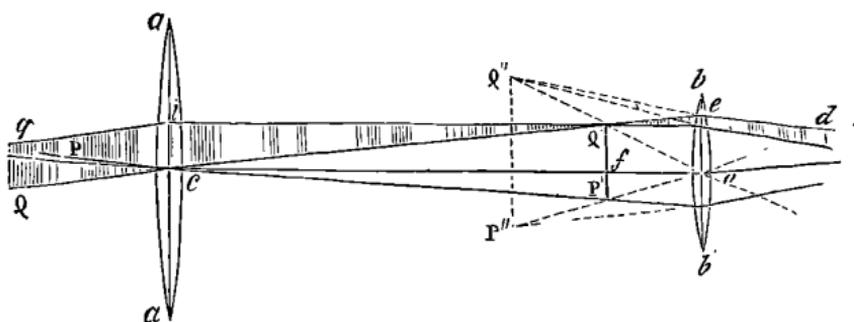


Fig. 277. — Marche du rayon dans la lunette astronomique.

L'objectif est  $aa'$  (*fig. 277*), l'oculaire est  $bb'$ . Ces deux lentilles ont le même axe.

On vise un astre, tel que la pleine lune ; pour simplifier, nous considérerons comme objet le diamètre de la lune situé dans un plan vertical.

Nous supposerons que la ligne  $cQ$  va du centre optique de l'objectif à l'extrémité inférieure du diamètre. Tous les rayons partis de ce point et qui tombent sur la lentille peuvent, par suite de la grande distance qui nous sépare de l'astre, être considérés comme parallèles. Nous représentons par des hachures une coupe  $cgi$  du faisceau incident. Ces rayons, pris à la sortie de la lentille, forment un cône dont le

sommet  $Q'$  est situé dans le plan focal de l'objectif. De même, les rayons partis de l'extrémité supérieure  $P$  du même diamètre ont leur foyer au point  $P'$  situé dans le même plan.  $P'Q'$  est donc une image réelle du diamètre lunaire, et l'astre paraîtra dans le plan focal comme un petit cercle lumineux dont  $P'Q'$  serait le diamètre.

Les rayons qui se croisent en  $Q'$  continuent leur route et arrivent sur l'oculaire dont le foyer est un peu en avant de  $f$ , foyer de l'objectif.

L'oculaire va jouer le rôle d'une loupe à l'aide de laquelle on regarderait l'image  $P'Q'$ .

Les rayons qui se sont croisés en  $Q'$  prennent à la sortie de l'oculaire la direction  $od$ , et, si on les prolonge à gauche, ils iront tous passer par le point  $Q''$ , image virtuelle de  $Q'$ . De même, les rayons qui se croisent en  $P'$  donnent de ce point une image virtuelle placée en  $P''$ .

L'image virtuelle  $P''Q''$ , pour être vue nettement par l'astronome, doit être placée à la distance de sa vision distincte. Cette image est renversée par rapport à l'objet.

**Champ.** — La partie du ciel, visible à la fois dans la lunette, constitue le *champ*.

Le point  $Q$  ne peut être vu que si le faisceau de lumière qu'il envoie vers l'objectif rencontre la partie utile de l'oculaire. Ce faisceau a pour axe la ligne  $QoQ'$ .

Elle doit donc rencontrer l'oculaire et se trouver à l'intérieur d'un cône qui aurait pour base l'oculaire et pour sommet le centre optique de l'objectif. Ce cône a un angle au sommet d'autant plus petit que la lunette est plus grossissante.

**Grossissement.** — On ne peut plus, sans absurdité, comparer les dimensions réelles de l'astre à celles de son image pour mesurer le grossissement de la lunette. On compare les dimensions apparentes, ce qu'on appelle le *diamètre apparent* de l'astre et de l'image.

Soit  $ab$  (*fig.* 278) le diamètre d'un astre,  $oa$  sa distance à l'œil,  $oa$ ,  $ob$ , deux lignes qui joignent l'œil aux extrémités  $a, b$ ; l'angle  $aob$  est le diamètre apparent de l'astre. Il est environ un demi-degré pour la lune et le soleil.

Admettons que cet angle soit très petit ; on peut considérer les deux lignes  $ab$ ,  $a'b'$ , égales et situées aux distances  $oa$  et  $oa'$ , comme deux portions de circonférences décrites du point  $o$  avec les rayons  $oa$ ,  $oa'$ . Ces arcs  $ab$ ,  $a'b'$



Fig. 278.

mesurent les angles  $aob$ ,  $a'ob'$ , et, comme ils ont même longueur, les valeurs de ces angles évaluées en degrés sont représentées par des nombres inverses des rayons  $oa$ ,  $oa'$ .

$$\text{On a, en effet, } \frac{aob}{360} = \frac{ab}{2\pi oa} \text{ et } \frac{a'ob'}{360} = \frac{a'b'}{2\pi oa'}$$

On a donc, puisque  $ab = a'b'$

$$\frac{aob}{a'ob'} = \frac{oa'}{oa}$$

Les diamètres apparents de l'astre sont inversement proportionnels aux distances de l'astre à l'observateur.

Appliquons cela à la lunette. L'angle visuel sous lequel se présente l'astre lorsqu'on le regarde à l'œil nu est  $PcQ$  (*fig. 276*), si l'œil est placé à l'endroit où se trouve l'objectif. S'il se place en  $o$  derrière l'oculaire pour regarder l'image, le diamètre apparent de celle-ci est l'angle  $Q''oP''$ .

Le premier angle est égal à  $P'cQ'$ , qui lui est opposé par le sommet ; le second peut s'écrire  $P'oQ'$ , en sorte que le grossissement est le rapport des diamètres apparents de l'image  $P'Q'$ , vue d'abord du centre optique de l'oculaire et puis du centre optique de l'objectif.

Ce rapport est égal au rapport inverse des distances  $\frac{f_c}{f_o}$ ,

c'est sensiblement le rapport de la distance focale de l'objectif à la distance focale de l'oculaire.

Les fortes lunettes doivent donc être à long foyer et avoir un objectif large pour recevoir beaucoup de lumière.

L'oculaire pourra être alors une loupe puissante à court foyer, et l'instrument aura un fort grossissement.

Les lunettes ne servent pas seulement aux astronomes pour examiner les astres qui composent notre système planétaire. Elles leur sont indispensables pour sonder les cieux et apercevoir les millions d'étoiles qui ne sont pas visibles à l'œil nu.

En outre, à l'aide de lunettes mobiles autour d'un axe qui passe par le centre d'un cercle divisé en degrés, ils déterminent l'alignement d'une étoile, et, par suite, sa position dans le ciel.

**Axe optique de la lunette.** — Mais pour cela il faut qu'il y ait dans la lunette une ligne de visée. Cette ligne passe nécessairement par le centre optique de l'objectif.

Elle passe également par le point de croisement *a* (fig. 279) de deux fils très fins tendus sur un anneau métallique que l'on place dans le plan focal de l'objectif. C'est là que se forme l'image de l'astre. L'observateur voit donc à la fois les fils et l'image de l'astre, lorsqu'il regarde dans l'oculaire. La lunette est visée sur l'astre lorsque son image se forme au point de croisement des fils du *réticule*, c'est le nom que l'on donne à cette partie de la lunette.

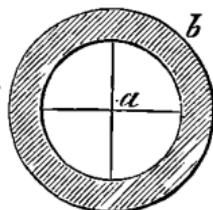


Fig. 279.  
Réticule.

La lunette à réticule sert aux ingénieurs pour lever des plans.

**Lunette terrestre.** — Les objets que l'on regarde dans la lunette astronomique ou la lunette marine, sont vus renversés, ce qui est incommode s'il s'agit d'objets terrestres.

La lunette terrestre qui convient dans ce dernier cas, est un peu plus compliquée.

L'objectif et l'oculaire sont conservés, mais on place entre eux deux nouvelles lentilles qui servent à redresser l'image réelle  $p q$  donnée par l'objectif (fig. 280). Dans cette image  $f$  est le foyer de l'objectif et nous avons figuré les deux faisceaux de rayons réfractés qui se croisent les uns en  $p$ , les autres en  $q$ . Ils rencontrent un peu plus loin une lentille  $c$ , dont le foyer est également en  $f$ , en sorte que  $p q$  est dans le plan focal de la lentille  $c$ .

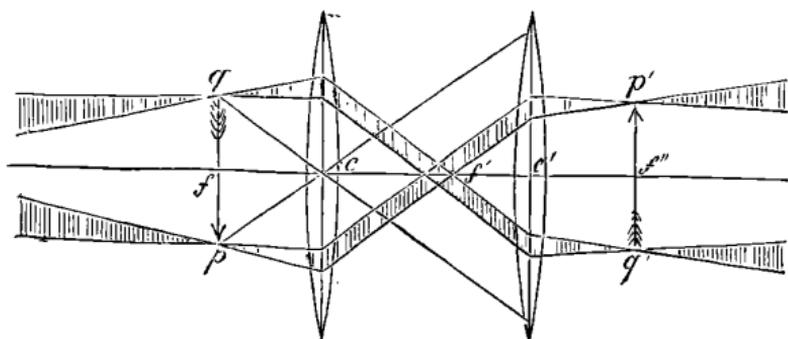


Fig. 280. — Lunette terrestre.

Les deux faisceaux qui passent par  $p$  et  $q$  sortiront de la lentille, respectivement parallèles aux lignes  $pc$ ,  $qc$ . Ces deux faisceaux se croisent en  $f'$ , et rencontrent ensuite une seconde lentille  $c'$ . Comme les rayons de chaque groupe sont parallèles, ils sont dirigés par cette lentille vers deux points  $p'$ ,  $q'$  placés dans son plan focal  $f''$ .

L'image  $p' q'$  est redressée; on l'observe comme à l'ordinaire, à l'aide d'un oculaire.

La lumière incidente se réfléchit chaque fois qu'elle rencontre une surface séparant l'air du verre; ce qui arrive au moins huit fois dans la lunette terrestre la plus simple. Il en résulte une grande perte de lumière. La lunette terrestre ne donne de bons effets que par un temps clair, un ciel lumineux. Sa longueur est toujours assez grande.

**Lunette de Galilée.** — On a fait des lunettes portatives de petites dimensions, en prenant modèle sur celles

qui, les premières, furent dirigées vers les astres par Galilée, au début du dix-septième siècle.

L'objectif  $O$  (*fig. 281*) est encore une lentille convergente, mais l'oculaire  $c'$  est une lentille divergente, biconcave.

Si on vise un objet éloigné, une ligne droite que nous désignerons par  $ab$ , les rayons issus du point  $a$  forment un

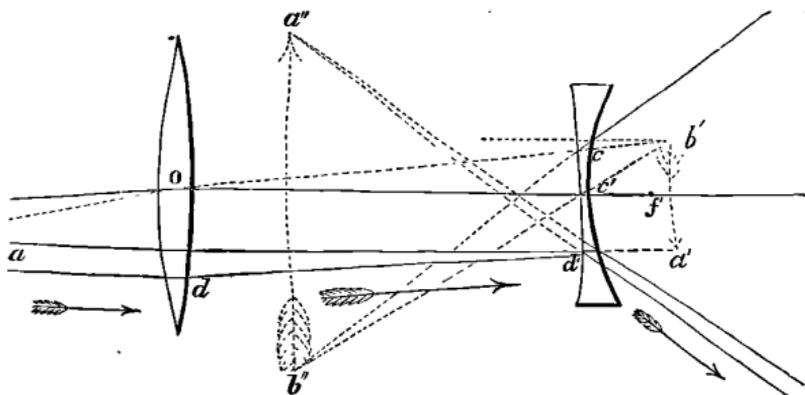


Fig. 281. — Lunette de Galilée. Marche des rayons.

faisceau qui, à sa sortie de la lentille, est dirigé vers un point  $a'$  du plan focal de l'objectif;  $a' b'$  serait l'image réelle de  $ab$ . Elle ne se forme pas, parce que les rayons dirigés vers  $a'$  et  $b'$  rencontrent l'oculaire  $c'$  placé en avant de  $f'$ . Il se produit une nouvelle réfraction. Par exemple, le faisceau  $dd'$  sort de l'oculaire dans la direction de la flèche, et ses rayons, prolongés géométriquement, vont se couper en  $a''$ . Les rayons partis du point  $b$  se croisent en  $b''$ . Le plan focal de l'objectif doit être un peu au delà du foyer  $f'$  de l'oculaire. On a donc en  $a'' b''$  une image de l'objet, virtuelle et droite. Elle est vue sous un angle visuel plus grand que l'objet regardé à l'œil nu. Ainsi, la lunette grossit. Cette image doit être placée à la distance de la vue distincte.

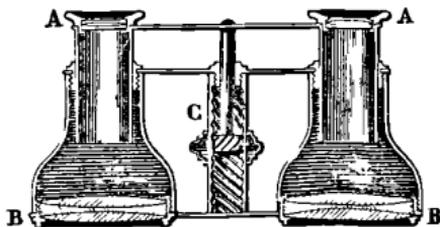


Fig. 282. — Lorgnette.

Ce que nous venons de décrire est la lorgnette de spectacle. Nous en figurons une, coupée par un plan vertical (*fig. 282*).

Elle se compose de deux petites lunettes de Galilée, identiques, fixées à une même monture. Les objectifs sont en B ; les oculaires en A, portés par des tubes mobiles. On fait monter ou descendre ces tubes en agissant sur un anneau *c*. Il fait mouvoir un long écrou qui entraîne une vis intérieure. La vis monte ou descend suivant le sens de la rotation de l'écrou, et les verres A B s'écartent ou se rapprochent. Ici, comme dans les autres lunettes et le microscope, les myopes sont obligés de rapprocher l'oculaire de l'objectif plus que ne le feront les presbytes qui ont la vue longue.

**Télescopes.** — Les astronomes emploient encore des lunettes dans lesquelles la lentille objective est remplacée par un grand miroir concave, qui est encore un appareil convergent.

On les appelle des *télescopes*.

Il est rare que l'on ait à en manier. Je décris l'un d'eux pour offrir aux élèves un moyen de reconnaître s'ils ont bien compris et retenu ce qui se rapporte aux propriétés des miroirs et des lentilles.

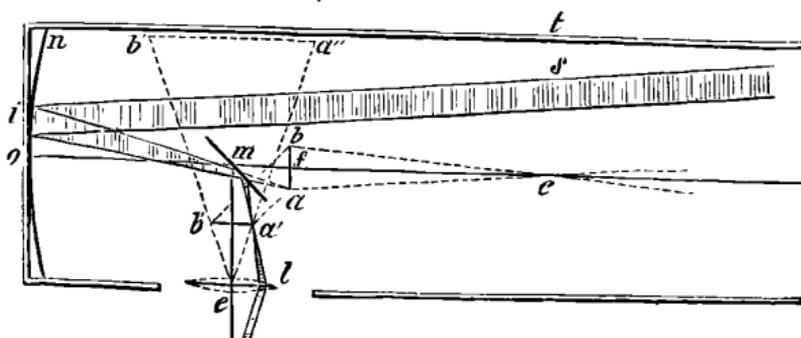


Fig. 283. — Télescope de Newton. Marche des rayons.

Un miroir *n* (fig. 283) placé au fond d'un long tuyau, et dont le centre est *mc*, forme l'*objectif*; il a un assez grand rayon. Il reçoit d'un point A d'un astre un faisceau *si* de rayons parallèles, dont l'axe secondaire est *ac*. Le faisceau réfléchi correspondant est un cône dont le sommet *a*, situé sur cet axe, se trouve dans le plan focal de l'objectif.

Un second point de l'astre, que nous désignerons par B, aurait son image  $b$  dans le même plan focal; et  $ab$  est l'image réelle de la ligne lumineuse AB tracée sur l'astre.

Pour l'observer facilement, on place, en avant du plan focal, un petit miroir plan  $m$  incliné de  $45^\circ$  sur l'axe  $oc$  du grand miroir. Il arrête les rayons réfléchis par celui-ci, et leur fait subir une seconde réflexion.

Les rayons du premier faisceau, dirigés vers le point  $a$ , vont tous passer par le point  $a'$  symétrique de  $a$ , par rapport au miroir  $m$ , ceux du second faisceau, qui aboutissaient en  $b$ , ont leur point de concours en  $b'$  symétrique de  $b$ . Au lieu d'avoir une ligne verticale  $ab$ , on a une image horizontale  $a'b'$  de la ligne AB.

Les faisceaux de rayons, qui se croisent en  $a'$ ,  $b'$ , sont reçus sur une loupe  $e$ , qui est l'oculaire. L'image  $a'b'$  est placée entre la loupe et son foyer. Les rayons, qui traversent la loupe et entrent dans l'œil de l'observateur, lui font voir une image  $a''b''$  de  $a'b'$ ; elle est virtuelle, plus grande et placée à la distance de la vision distincte.

Ce que nous avons dit de la lunette astronomique s'applique au télescope.

Le grand astronome Herschell avait construit un télescope de très grandes dimensions, avec lequel il observa les amas lumineux, qui ont reçu le nom de *nébuleuses*.

Le télescope de lord Ross, plus grand encore, avait une longueur de 17 mètres et un poids de dix tonnes. A la lourde machine, difficile à manier, on préfère maintenant les lunettes astronomiques.

## EXERCICES

### Forces. — Notions générales.

1° On lâche, à un intervalle de trois secondes, deux pierres, qui tombent dans un puits profond. Quelle sera leur distance huit secondes après le départ de la première? Quelles seront alors les vitesses de chacune d'elles?

2° Un boulet tombe du sommet de la tour Eiffel, dont la hauteur

est 300 mètres. Quelle sera sa vitesse acquise en touchant le sol, abstraction faite de la résistance de l'air ?

3° Une locomotive a une vitesse de 20 lieues à l'heure, quelle serait la hauteur de chute d'un corps pesant qui, en touchant le sol, aurait la même vitesse ?

4° Un décimètre cube d'eau pure pèse un kilogramme, à Paris; quel serait son poids au cap Nord. L'accélération  $g$  est 9,81 à Paris, et 9,83 au cap Nord ?

5° Quelle est la masse d'un boulet, qui pèse 20 kilogrammes, dans un lieu où l'accélération  $g$  est 9,78. Si ce boulet, soumis à une force d'intensité constante, prend un mouvement varié, dont l'accélération est de 5 mètres, quelle sera l'intensité de la force ?

6° Un corps, pesant 15 kilogrammes, est soumis à une force constante, dont l'intensité est 25 kilogrammes. On demande de calculer l'espace qu'il parcourt, en une minute, sous l'action de cette force;  $g=9^m,81$ .

7° Deux forces constantes, l'une de 10 kilogrammes, l'autre de 7 kilogrammes, agissent successivement sur le même corps. La première lui fait parcourir 125 mètres en cinq secondes. Quelle est l'accélération de ce mouvement; quelle est la masse du corps; quel serait l'espace parcouru en huit secondes par le corps soumis à la seconde force ?

8° Un corps est animé d'un mouvement uniforme. Il décrit une circonférence dont le rayon est  $0^m,50$ ; il fait 200 tours par minute; quelle est, en mètres, sa vitesse ?

9° Un corps est animé de deux mouvements uniformes. L'un est horizontal, et sa vitesse est 10 mètres; l'autre, vertical, a la même vitesse. Quelle sera la direction du mouvement résultant, rapportée à l'horizontale ? Quelle sera la vitesse résultante ? Quel espace parcourra le mobile en cinq secondes ?

### Composition des forces.

10° Un point matériel se meut sur une ligne inclinée de  $60^\circ$  sur l'horizontale. Il est soumis à une force constante de 15 kilogrammes. Quelles seraient les intensités des deux forces, l'une verticale, l'autre horizontale, qui remplaceraient la force donnée ?

11° Un point matériel est tiré, à la fois, dans le sens horizontal, par une force de 5 kilogrammes, et dans le sens vertical, par une seconde force de 8 kilogrammes. Quelle est la grandeur et la direction de la résultante ?

12° Deux hommes supportent, à l'aide d'un bâton, un panier dont le poids est de 20 kilogrammes. La longueur du bâton est  $1^m,20$ . Où doit-on placer le point de suspension du panier pour que l'un des hommes supporte 12 kilogrammes ?

13° On a placé, aux deux extrémités d'un bâton, deux seaux pesant l'un 5 kilogrammes, et l'autre 7. Le bâton est soutenu par une corde verticale. En quel point devra-t-on placer le point d'attache de la corde pour que le bâton soit horizontal dans sa position d'équilibre, et quelle sera la charge de la corde. La longueur du bâton est de  $0^m,84$  ?

14° Trois poids d'un kilogramme sont suspendus aux sommets

d'un triangle équilatéral. Trouver la grandeur et le point d'application de la résultante de ces trois forces.

15° Une baguette cylindrique est formée de deux parties,  $ab$ ,  $bc$ , soudées bout à bout; l'une des parties,  $ab$ , est en fer, et pèse  $0^{\text{kg}}, 30$ , sa longueur est  $0^{\text{m}}, 60$ ; l'autre,  $bc$ , est en plomb; elle pèse  $0^{\text{kg}}, 700$ , et sa longueur est  $0^{\text{m}}, 20$ . Chercher les distances des centres de gravité de ces deux parties à l'extrémité  $a$ , et la distance de ce point  $a$  au centre de gravité de la baguette entière.

### Travail des forces.

16° Une chute d'eau débite par seconde 2 mètres cubes d'eau. Sa hauteur est 12 mètres. Quel est, en kilogrammètres, le travail de la pesanteur qui fait tomber l'eau? Quelle est, en cheval-vapeur, la puissance dynamique de cette chute?

17° Deux hommes agissent sur le même wagon de chemin de fer. Ils font, l'un et l'autre, un effort de 30 kilogrammes: le premier, en poussant le wagon dans la direction des rails; le second, en tirant le wagon à l'aide d'une corde dont la direction est perpendiculaire aux rails. Evaluer le travail de chacun des deux hommes, lorsque le wagon se sera déplacé de 200 mètres.

18° Deux hommes font mouvoir un wagon sur ses rails en le tirant à l'aide de deux cordes, qui font, de part et d'autre de la voie, un angle de  $45^{\circ}$  avec la direction des rails. L'effort de chacun des deux hommes est de 28 kilogrammes; le déplacement du wagon est 300 mètres; évaluer le travail utile fait par les deux hommes.

19° Un wagon, dont le poids est de 3 tonnes, se meut par inertie sur les rails, avec une vitesse de  $0^{\text{m}}, 70$  par seconde. Quel serait, en kilogrammètres, le travail d'une force qui, tirant en sens inverse du mouvement, parviendrait à arrêter le wagon?

20° Une carrière a été remplie d'eau à la suite d'une inondation. Sa profondeur est de 25 mètres, et on évalue à 100 000 mètres cubes le volume d'eau qu'il faut en retirer pour la mettre à sec. On veut faire l'opération à l'aide d'une machine à vapeur travaillant douze heures par jour pendant vingt jours. Quelle doit être, au minimum, la puissance dynamique de la machine?

21° Une machine à vapeur, sans condensation, a un cylindre à vapeur dont le diamètre est de  $0^{\text{m}}, 40$ , la course du piston est de  $0^{\text{m}}, 60$ , la vapeur a une force élastique, constante, de 6 atmosphères. Calculer, en kilogrammes, la force qui fait mouvoir le piston, et le travail de cette force pour chaque course ascendante ou descendante du piston. Si le volant de la machine fait cinquante tours par minute, quelle est la puissance dynamique de la machine?

22° La chaudière d'une machine à vapeur porte une soupape dont la surface est de 5 centimètres carrés, la pression intérieure doit être portée à 8 atmosphères; un levier presse la soupape; il tourne autour d'une de ses extrémités, et porte à l'autre un poids. La distance du centre de la soupape au point fixe est de  $0^{\text{m}}, 12$ , et celle du poids au même point est  $0^{\text{m}}, 42$ . Quelle doit être la valeur du poids, évaluée en kilogrammes?

**Machines usuelles.**

23° On fait descendre un tonneau, dont le poids est de 600 kilogrammes, sur un plan incliné dont la hauteur est de 2 mètres et la longueur de 7 mètres. Deux cordes, fixées par l'une de leurs extrémités à la partie supérieure du plan, s'enroulent autour du tonneau, à la manière de la corde d'une poulie mobile, et chaque extrémité libre est tenue par un homme. Les deux brins de la corde sont parallèles au plan incliné. Calculer l'effort que doit faire chacun des deux hommes pour maintenir le tonneau en équilibre sur le plan.

24° Un treuil est installé en haut d'un plan incliné, dont la hauteur est 2 mètres et la longueur 10 mètres. La corde du treuil, parallèle à ce plan, est attachée à un chariot, qui roule sur le plan, et dont la charge est de 2 tonnes. Le rayon du treuil est de 0<sup>m</sup>,25. Deux hommes le font tourner en agissant normalement sur des leviers, qui ont 1<sup>m</sup>,07 de longueur. Trouver l'effort de chaque homme dans le cas d'équilibre.

25° Dans la chèvre des charpentiers, la corde d'un treuil passe sur une poulie fixe, placée en haut de l'appareil, et soutient, à son extrémité libre, une poutre de fer. Le rayon du treuil est 0<sup>m</sup>,12, deux hommes agissent normalement sur des leviers ayant 1<sup>m</sup>,50 de long, pour retenir la poutre en équilibre. L'effort de chaque homme est de 30 kilogrammes, calculer le poids de la poutre.

26° Dans une grue, le poids à soulever est attaché à la chape d'une poulie mobile, soutenue par un câble. L'une des extrémités de celui-ci est fixée à la partie supérieure de la grue. La corde descend verticalement jusqu'à la poulie mobile, puis elle se relève verticalement pour passer sur une poulie fixe placée également en haut, finalement elle s'enroule sur un treuil que l'on fait tourner à l'aide d'une manivelle; le rayon du treuil est le tiers de celui de la manivelle. L'effort de l'homme est de 25 kilogrammes. Quel poids peut-il soulever au maximum ?

27° La vis d'un étau a un pas de 0<sup>m</sup>,008. L'ouvrier la fait tourner en agissant normalement sur une barre de fer, dont la longueur est de 0<sup>m</sup>,40 ; il exerce un effort de 20 kilogrammes, évaluer la pression que subit le morceau de fer placé entre les mâchoires de l'étau.

28° Un bloc de pierre, dont le volume est 1 mètre cube et le poids spécifique 2,8, est soulevé à l'aide d'un palan composé de deux poulies fixes et deux mobiles. L'une des deux extrémités de la corde du palan est fixe, l'autre s'enroule sur un treuil dont le rayon est 0<sup>m</sup>,18. Des hommes agissent normalement sur des leviers, dont la longueur est de 1<sup>m</sup>,50, et chacun d'eux fait un effort de 25 kilogrammes. Combien faudra-t-il au moins d'hommes pour maintenir le bloc en équilibre lorsqu'il sera soulevé ?

**Instruments d'optique.**

29° Un miroir concave a 1 mètre de rayon. Une ligne lumineuse perpendiculaire à l'axe principal, et reposant par son extrémité

inférieure, sur son axe, est placée à une distance du miroir, comptée sur l'axe, et égale à  $1^m,40$ . Sa longueur est de  $0^m,05$ . Trouver, par une construction graphique, faite à l'échelle d'un dixième, la position de l'image de cette ligne ; évaluer approximativement la grandeur de cette image. La construction doit être faite avec soin, à l'aide de la règle et du compas.

30° Même question en prenant une lentille convergente, dont la distance focale soit de  $0^m,40$ , et en plaçant la ligne lumineuse, de longueur  $0^m,05$ , à une distance du centre optique de la lentille de  $0^m,60$ .

31° Une ligne lumineuse ayant une longueur de  $0^m,01$  est placée, comme la précédente, sur l'axe principal d'une lentille convergente, dont la distance focale est  $0^m,05$ . La distance de la ligne ou centre optique est  $0^m,03$ . Trouver, par une construction graphique, la position et la grandeur de l'image.

32° Un petit insecte est observé à l'aide d'un grossissement de 100. La planète Jupiter est vue, dans une lunette astronomique, avec le même grossissement. Quelle est la signification qu'il faut donner au mot grossissement dans ces deux cas ?

33° Quels sont les principaux phénomènes étudiés en physique, qui nous fournissent la chaleur utilisable dans nos industries ?

34° Quelles sont les sources artificielles de lumière que nous pouvons utiliser pour l'éclairage ?

35° Enumérer les différents modes de production d'électricité, qui nous permettent de réaliser des effets utilisables de chaleur ou de lumière.

# TABLE DES MATIÈRES

## COURS DE PREMIÈRE ANNÉE

### LIVRE PREMIER

#### Chaleur.

|   |    |   |    |
|---|----|---|----|
| <b>CHAPITRE PREMIER</b>                                   |    | Changement de volume.....                   | 26 |
| <b>DILATATION. — TEMPÉRATURE</b>                          |    | Cristallisation.....                        | 27 |
| Dilatation des corps gazeux...                            | 2  | Dissolution. — Mélanges réfrigérants.....   | 28 |
| Dilatation des liquides.....                              | 3  | <b>CHAPITRE IV</b>                          |    |
| Dilatation des solides.....                               | 3  | <b>CONDUCTIBILITÉ</b>                       |    |
| Applications.....   | 5  | Phénomènes généraux. — Solides.....         | 30 |
| Température.....  | 5  | Lampe de Davy.....                          | 33 |
| Thermomètre.....  | 6  | Conductibilité des liquides et des gaz..... | 35 |
| Construction d'un thermomètre.                            | 7  | Echauffement des liquides et des gaz.....   | 35 |
| Détermination du zéro, — du centième degré.....           | 9  | <b>CHAPITRE V</b>                           |    |
| Mesure de la température de l'air.....                    | 11 | <b>CHALEUR RAYONNANTE</b>                   |    |
| Thermomètre à <i>maxima</i> et à <i>minima</i> .....      | 12 | Transparence pour la chaleur..              | 37 |
| Calcul de la dilatation d'un corps.....                   | 13 | Réflexion et absorption.....                | 38 |
| Dilatation de l'eau.....                                  | 15 | Rayonnement.....                            | 40 |
| Calcul de la dilatation d'un gaz.                         | 18 | Equilibre de température.....               | 42 |
| <b>CHAPITRE II</b>  |    | <b>CHAPITRE VI</b>                          |    |
| <b>MESURE DES QUANTITÉS DE CHALEUR</b>                    |    | <b>SOURCES DE CHALEUR</b>                   |    |
| Calculs relatifs aux quantités de chaleur. — Calorie..... | 18 | Chaleur solaire.....                        | 43 |
| Chaleur spécifique et calculs qui s'y rapportent.....     | 20 | Chaleur terrestre.....                      | 45 |
| <b>CHAPITRE III</b>                                       |    | Actions mécaniques. — Frottement.....       | 45 |
| <b>CHANGEMENT D'ÉTAT DES CORPS</b>                        |    | Percussion. — Combustion...                 | 46 |
| Lois de la fusion.....                                    | 22 | Exercices.....                              | 48 |
| Solidification. — Son retard..                            | 25 |   |    |

## LIVRE II

## La lumière.

|   |  |    |
|---|--|----|
| CHAPITRE PREMIER                                      | Réflexion totale.....                                    | 71 |
|   | Prisme. — Marche des rayons.                             | 73 |
|   | Réflexion totale dans le prisme.                         | 7' |
| RÉFLEXION   |  |    |
| Transparence.....                                     | 50   |    |
| Rayon lumineux. — Marche rectiligne de la lumière.... | 51   |    |
| Vitesse de la lumière. — Ombre.                       | 52   |    |
| Pénombre. — Intensité de la lumière.....              | 53   |    |
| Lois de la réflexion.....                             | 54   |    |
| Miroir plan.....                                      | 56   |    |
| Image d'un point.....                                 | 57   |    |
| Image d'un objet. — Marche des rayons.....            | 58   |    |
| Spectres de théâtre.....                              | 59   |    |
| Diffusion.....  | 60   |    |
| CHAPITRE II   |  |    |
| MIROIRS COURBES                                       |  |    |
| Miroirs concaves.....                                 | 61   |    |
| Foyer principal.....                                  | 62   |    |
| Image d'un objet lumineux. — Réelle. — Virtuelle..... | 64   |    |
| Miroirs convexes. — Foyer. — Images.....              | 66   |    |
| CHAPITRE III  |  |    |
| RÉFRACTION  |  |    |
| Phénomènes généraux.....                              | 68   |    |
| Lois de la réfraction.....                            | 70   |    |
|   | CHAPITRE IV  |    |
|   | LENTILLES  |    |
|   | Lentilles.....   | 75 |
|   | Lentilles convergentes. — Foyer.....                     | 76 |
|   | Marche des rayons dans une lentille.....                 | 78 |
|   | Image d'un objet. — Réelle. — Virtuelle.....             | 79 |
|   | Phares.....  | 81 |
|   | Lentilles divergentes. — Foyer. — Marche des rayons..... | 81 |
|   | Images virtuelles.....                                   | 82 |
|   | CHAPITRE V   |    |
|   | COMPOSITION DE LA LUMIÈRE BLANCHE                        |    |
|   | Décomposition, par le prisme, de la lumière solaire..... | 83 |
|   | Spectre solaire.....                                     | 84 |
|   | Couleurs des corps.....                                  | 85 |
|   | Recomposition de la lumière blanche.....                 | 86 |
|   | Arc-en-ciel.....   | 89 |
|   | Exercices.....   | 90 |

## LIVRE III

|   |  |     |
|---|--|-----|
| CHAPITRE PREMIER                          | Vibration d'une cloche, d'un diapason..... | 94  |
|   | Propagation du son.....                    | 95  |
| DU SON                                    | Mode de propagation du son dans l'air..... | 96  |
| Elasticité. — Vibrations d'une verge..... | Ondes liquides.....                        | 98  |
| Production du son. — Corps sonore.....    | Vitesse du son. — Réflexions du son.....   | 99  |
|   | Echo.....                                  | 100 |

|  |     |   |     |
|--|-----|---|-----|
| <b>CHAPITRE II</b>                     |     | Constitution d'un aimant.....             | 105 |
| <b>MAGNÉTISME</b>                      |     | Aimantation.....                          | 106 |
| Aimants naturels. — Pôles....          | 101 | Faisceaux magnétiques.....                | 107 |
| Aiguille aimantée.....                 | 102 | Aimantation par l'action de la terre..... | 108 |
| Action réciproque de deux aimants..... | 103 | Déclinaison de l'aiguille aimantée.....   | 108 |
| Aimantation du fer.....                | 103 | Boussole. — Boussole marine.              | 110 |
| Aimantation de l'acier.....            | 105 | Exercices.....                            | 112 |

## COURS DE SECONDE ANNÉE

### LIVRE PREMIER

#### Pesanteur.

|                                  |     |                                 |     |
|----------------------------------|-----|---------------------------------|-----|
| <b>CHAPITRE PREMIER</b>          |     | Tourniquet hydraulique.....     | 132 |
| <b>NOTIONS GÉNÉRALES</b>         |     | Vases communicants.....         | 132 |
| Etat des corps. — Solide. —      |     | Jet d'eau.....                  | 133 |
| Liquide. — Gazeux.....           | 113 | Puits. — Niveau d'eau.....      | 134 |
| Pesanteur. — Inertie.....        | 114 | Liquides superposés.....        | 135 |
| Verticale. — Fil à plomb. —      |     | Transmission de pressions....   | 135 |
| Horizontale.....                 | 115 | Presse hydraulique.....         | 136 |
| Direction des verticales.....    | 116 | Principe d'Archimède.....       | 137 |
| Chute des corps. — Espaces       |     | Ludion. — Corps flottants....   | 139 |
| parcourus. — Poids.....          | 117 | Poids spécifiques.....          | 140 |
| Balance.....                     | 118 | Mesure des poids spécifiques    |     |
| Pendule.....                     | 120 | des solides.....                | 141 |
| Application du pendule aux       |     | Poids spécifiques des liquides. | 142 |
| horloges.....                    | 121 | Aréomètres.....                 | 143 |
| Centre de gravité.....           | 122 | Usages des poids spécifiques.   |     |
|                                  |     | — Poids d'un corps.....         | 144 |
|                                  |     | Calcul du volume.....           | 145 |
|                                  |     | Equilibre de divers liquides    |     |
|                                  |     | dans des vases communi-         |     |
|                                  |     | quants.....                     | 145 |
|                                  |     | Capillarité.....                | 147 |
| <b>CHAPITRE II</b>               |     | <b>CHAPITRE III</b>             |     |
| <b>PROPRIÉTÉS DES LIQUIDES</b>   |     | <b>PROPRIÉTÉS DES GAZ</b>       |     |
| Surface d'une eau tranquille. —  |     | Poids de l'air.....             | 147 |
| Pression.....                    | 124 | Compressibilité. — Dilatabilité |     |
| Pression exercée par un liquide. | 125 | de l'air.....                   | 148 |
| Pression sur le fond d'un vase.  | 126 | Pression atmosphérique.....     | 149 |
| Pression sur une tranche ho-     |     |                                 |     |
| rizontale.....                   | 128 |                                 |     |
| Pression exercée de bas en haut. | 129 |                                 |     |
| Pressions latérales.....         | 130 |                                 |     |
| Recul d'un vase.....             | 131 |                                 |     |

|   |     |  |     |
|---|-----|--|-----|
| Tête-vin. — Expérience de Torricelli.....       | 151 | Manomètre à air comprimé...                | 163 |
| Expériences de Pascal.....                      | 153 | Manomètre métallique.....                  | 164 |
| Baromètre.....                                  | 154 | <b>CHAPITRE IV</b>                         |     |
| Baromètre métallique.....                       | 155 | <b>POMPES</b>                              |     |
| Usages du baromètre.....                        | 156 | Pompe à air.....                           | 165 |
| Loi de Mariotte.....                            | 156 | Machine pneumatique.....                   | 167 |
| Pressions supérieures à l'atmosphère.....       | 157 | Pompe de compression.....                  | 170 |
| Pressions inférieures à l'atmosphère.....       | 159 | Pompe à liquide, aspirante....             | 171 |
| Poids spécifiques des gaz.....                  | 159 | Pompe aspirante et foulante..              | 172 |
| Calculs relatifs à la loi de Mariotte.....      | 160 | Pompe à incendie.....                      | 173 |
| Echauffement d'un gaz de volume invariable..... | 161 | Siphon.....                                | 174 |
| Manomètre à air libre.....                      | 162 | Principe d'Archimède appliqué aux gaz..... | 175 |
|   |     | Montgolfières. — Aérostats...              | 176 |
|   |     | Résumés et exercices.....                  | 177 |

---

## LIVRE II

### Chaleur.

#### CHAPITRE PREMIER

##### VAPORISATION

|   |     |
|---|-----|
| Force élastique des vapeurs...                      | 183 |
| Vapeurs saturantes.....                             | 185 |
| Vapeurs non saturantes.....                         | 186 |
| Condensation. — Mélange des gaz et des vapeurs..... | 187 |

#### CHAPITRE II

##### FORMATION DES VAPEURS

|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| Evaporation. — Ebullition....   | 190 |
| Marmite de Papin.....           | 192 |
| Chaleur de vaporisation.....    | 193 |
| Froid produit par vaporisation. | 194 |
| Distillation.....               | 195 |

#### CHAPITRE III

##### MACHINES A VAPEUR

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| Chaudières.....               | 196 |
| Cylindre à vapeur.....        | 198 |
| Tiroir.....                   | 199 |
| Condenseur.....               | 200 |
| Machine à action directe..... | 201 |
| Locomotive.....               | 203 |

#### CHAPITRE IV

##### VAPEUR DANS L'ATMOSPHERE

|   |     |
|---|-----|
| Poids de vapeur saturant un mètre cube..... | 205 |
| Hygroscope.....                             | 206 |
| Brouillard.....                             | 207 |
| Nuages. — Pluie.....                        | 208 |
| Verglas.....                                | 209 |
| Neige. — Grêle. — Rosée....                 | 210 |
| Gelée blanche.....                          | 211 |
| Résumé et exercices.....                    | 212 |

## LIVRE III

## Électricité.

## CHAPITRE PREMIER

## PHÉNOMÈNES GÉNÉRAUX

|  |     |
|--|-----|
| Production d'électricité par frottement..... | 215 |
| Corps bons et mauvais conducteurs.....       | 216 |
| Corps isolants.....                          | 217 |
| Deux états électriques.....                  | 217 |
| Développement des deux électricités.....     | 219 |
| Distribution de l'électricité.....           | 220 |
| Déperdition. — Pouvoir des pointes.....      | 221 |
| Tourniquet électrique.....                   | 222 |

## CHAPITRE II

## ÉLECTRISATION PAR INFLUENCE

|                                    |     |
|------------------------------------|-----|
| Influence.....                     | 222 |
| Electroscope à feuilles d'or... .. | 225 |
| Electrophore.....                  | 227 |
| Machine électrique.....            | 228 |

## CHAPITRE III

## EFFETS DE L'ÉLECTRICITÉ

|   |     |
|---|-----|
| Mouvement des corps légers..                  | 229 |
| Carillon. — Danse des pantins.                | 230 |
| Étincelles. — Tube étincelant.                | 231 |
| Tube de Geissler. — Pistolet de Volta.....    | 232 |
| Tension électrique. — Bouteille de Leyde..... | 233 |
| Décharges brusques; — successives.....        | 235 |
| Batterie électrique.....                      | 237 |
| Fusion des métaux.....                        | 238 |
| Electricité atmosphérique.....                | 238 |
| Paratonnerre.....                             | 239 |

## CHAPITRE IV

## PILES ÉLECTRIQUES

|   |     |
|---|-----|
| Expériences de Galvani; — de Volta.....         | 241 |
| Pile de Volta. — Pile à couronne de tasses..... | 242 |
| Pile au bichromate de potasse.                  | 244 |
| Piles Leclanché. — Daniell...                   | 246 |
| Pile de Bunsen.....                             | 248 |

## CHAPITRE V

## EFFETS DES COURANTS ÉLECTRIQUES

|   |     |
|---|-----|
| Effets chimiques. — Voltamètre.                   | 249 |
| Décomposition des oxydes et des sels.....         | 250 |
| Galvanoplastie.....                               | 251 |
| Argenture et dorure.....                          | 253 |
| Actions physiologiques. — Chaleur. — Lumière..... | 254 |
| Résistances.....                                  | 255 |
| Chaleur. — Eclairage électrique.....              | 256 |

## CHAPITRE VI

## ACTIONS MAGNÉTIQUES

|   |     |
|---|-----|
| Expérience d'Ørsted. — Règle d'Ampère.....      | 257 |
| Aiguilles astatiques.....                       | 258 |
| Multiplicateur. — Galvanomètre.....             | 259 |
| Aimantation par les courants..                  | 260 |
| Electro-aimants.....                            | 261 |
| Télégraphie électrique. — Télégraphe Morse..... | 263 |
| Manipulateur. — Alphabet conventionnel.....     | 265 |
| Fils télégraphiques.....                        | 266 |
| Sonnerie électrique.....                        | 267 |
| Résumés et exercices.....                       | 268 |

## COURS DE TROISIÈME ANNÉE

## LIVRE PREMIER

## Notions sur les forces.

|   |     |  |     |
|---|-----|--|-----|
| <b>CHAPITRE PREMIER</b>   |     | Loi du parallélogramme des forces.....                     | 294 |
| <b>DU MOUVEMENT</b>   |     | Détermination graphique de la résultante de deux forces... | 295 |
| Principe d'inertie.....   | 270 | Composition de deux forces rectangulaires.....             | 296 |
| Force.....  | 271 | Décomposition d'une force en deux autres.....              | 297 |
| Mouvement.....  | 272 | Composition de plusieurs forces concourantes.....          | 297 |
| Trajectoire.....  | 273 | Forces appliquées à un corps solide.....                   | 297 |
| Mouvement uniforme.....   | 274 | Théorème de Varignon.....                                  | 298 |
| Mouvement varié. — Vitesse..  | 274 | Composition de deux forces parallèles de même sens.....    | 299 |
| Lois de la chute des corps....                                      | 276 | Décomposition d'une force en deux autres parallèles....    | 301 |
| Lois des espaces; — des vitesses.....                               | 277 | Composition de deux forces parallèles de sens opposés....  | 302 |
| Machine d'Atwood.....   | 278 | Couple de forces parallèles....                            | 303 |
| Force de la pesanteur. — Intensité.....                             | 281 | Composition de plusieurs forces parallèles.....            | 304 |
| Proportionnalité des forces et des accélérations.....               | 282 | Centre de gravité.....                                     | 304 |
| Masse.....  | 283 | Conditions d'équilibre stable d'un corps solide.....       | 306 |
| <b>CHAPITRE II</b>  |     | Equilibre instable; — indifférent.....                     | 307 |
| <b>MESURE DES FORCES</b>  |     | <b>CHAPITRE IV</b>   |     |
| Unité de force.....   | 285 | <b>TRAVAIL DES FORCES</b>                                  |     |
| Principe de la réaction.....  | 286 | Définition du travail d'une force.                         | 309 |
| Pesons et dynamomètres.....   | 286 | Energie.....   | 312 |
| Mesure d'une force motrice....                                      | 288 | Force vive.....  | 313 |
| <b>CHAPITRE III</b>   |     | Puissance dynamique. — Cheval-vapeur.....                  | 315 |
| <b>COMPOSITION DES MOUVEMENTS ET DES FORCES</b>                     |     | <b>CHAPITRE V</b>  |     |
| Composition de deux mouvements rectilignes, uniformes.              | 290 | <b>MACHINES SIMPLES</b>                                    |     |
| Composition de deux mouvements rectilignes uniformément variés..... | 291 | Considérations générales.....                              | 315 |
| Représentation des forces.....                                      | 292 | Plan incliné.....  | 317 |
| Composition de deux forces appliquées au même point....             | 293 |  |     |

# TABLE SYNTHÉTIQUE DES MATIÈRES

|  |         |  |     |
|--|---------|--|-----|
| NOTIONS SUR LA FORCE . . . . .   |         | Transformation du travail en<br>chaleur et réciproque.....                           | 335 |
| Phénomènes généraux. — Etat<br>des corps.....                              | 413     | Conductibilité des corps pour<br>la chaleur.....                                     | 30  |
| Notions générales sur les mou-<br>vements.....                             | 278     | Chaleur rayonnante.....  | 37  |
| Etude générale de la pesan-<br>teur.....                                   | 414     | DU SON   |     |
| Lois de la chute des corps....   | 276     | Etude élémentaire du son et<br>des corps sonores.....                                | 92  |
| Mesure des forces.....   | 285     | DE LA LUMIÈRE  |     |
| Composition des mouvements<br>et des forces.....                           | 290     | Phénomènes généraux. — Pro-<br>pagation. — Réflexion.....                            | 50  |
| Travail des forces.....  | 309     | Miroirs courbes.....   | 61  |
| Machines simples.....  | 315     | Réfraction.....  | 68  |
| Pesée des corps-balances..   | 418-322 | Lentilles.....   | 75  |
| <i>Propriétés des liquides.</i> —  |         | Composition de la lumière<br>blanche.....  | 83  |
| Pressions. — Principe d'Ar-<br>chimède.....                                | 424     | Instruments d'optique.....   | 363 |
| Poids spécifiques.....   | 440     | ÉLECTRICITÉ  |     |
| <i>Propriétés des gaz.</i> — Baro-<br>mètre. — Manomètre.....              | 447     | Phénomènes généraux. — Elec-<br>tricité développée par frotte-<br>ment.....          | 215 |
| Loi de Mariotte.....   | 456     | Électrisation développée par in-<br>fluence.....                                     | 222 |
| Pompes à air et à liquides....   | 465     | Effets de l'électricité. — Elec-<br>tricité atmosphérique.....                       | 229 |
| CHALEUR  |         | Piles électriques.....   | 241 |
| <i>Dilatation.</i> — Thermomètres.   | 2       | Effets des courants électriques.   | 249 |
| <i>Changement d'état des corps.</i><br>— Fusion.....                       | 22      | Magnétisme. — Propriétés gé-<br>nérales des aimants.....                             | 101 |
| <i>Vaporisation.</i> — Propriétés<br>des vapeurs.....                      | 183     | Action de la terre sur les ai-<br>mants.....   | 108 |
| Formation des vapeurs. —<br>Ébullition.....                                | 190     | Action d'un courant électrique<br>sur une aiguille aimantée. —<br>Galvanomètres..... | 257 |
| Machines à vapeur.....   | 196     | Aimantation de l'acier par un<br>aimant.....   | 405 |
| <i>Phénomènes météorologi-<br/>ques.</i> — Pluie. — Neige. —<br>Rosée..... | 205     |  |     |
| <i>Mesure des quantités de cha-<br/>leur</i> .....                         | 48      |  |     |
| Chaleurs spécifiques. — Calorie.   | 44      |  |     |
| Chaleur de vaporisation.....   | 193     |  |     |
| Sources de chaleur.....  | 43      |  |     |

|  |     |   |     |
|--|-----|---|-----|
| Aimantation de l'acier par l'action de la terre.....   | 108 | Machines magnéto-électrique et dynamo-électrique..... | 355 |
| Aimantation de l'acier par un courant électrique ..... | 260 | Résistance. — Intensité. — Force électro-motrice..... | 255 |
| Electro-aimant. — Télégraphie électrique.....          | 261 | Lois d'Ohm et de Joule.....                           | 357 |
| Phénomènes d'induction.....                            | 342 | Unités électriques.....                               | 358 |
| Bobine de Ruhmkorff.....                               | 349 | Eclairage électrique.....                             | 256 |
|  |     | Téléphone et microphone.....                          | 359 |



|   |     |   |     |
|---|-----|---|-----|
| Levier.....   | 318 | Cabestan.....                                   | 331 |
| Leviers du premier, du second,<br>du troisième genre..... | 321 | Machines composées.....                         | 331 |
| Balances.....   | 322 | Vis.....  | 332 |
| Balance romaine. — Balance<br>de Roberval.....            | 323 | Rendement.....                                  | 335 |
| Balance-bascule.....                                      | 324 | Transformation du travail en<br>chaleur.....    | 335 |
| Poulie fixe.....  | 326 | Expérience de Joule.....                        | 337 |
| Poulie mobile. — Palan.....                               | 327 | Equivalent mécanique de la<br>chaleur.....      | 338 |
| Treuil.....   | 328 | Transformation de la chaleur<br>en travail..... | 339 |
| Rôle des machines.....                                    | 329 |   |     |
| Treuil des carrières.....                                 | 330 |   |     |

---

## LIVRE II

### Induction.

|  |     |   |     |
|--|-----|---|-----|
| Solénoïdes.....                              | 342 | Machine dynamo-électrique de<br>Gramme..... | 355 |
| Induction par les courants....               | 344 | Loi d'Ohm.....                              | 357 |
| Induction par les aimants.....               | 346 | Loi de Joule.....                           | 358 |
| Extra-courant.....                           | 348 | Unités électriques.....                     | 358 |
| Bobine de Ruhmkorff.....                     | 349 | Téléphone.....                              | 359 |
| Machine magnéto-électrique de<br>Clarke..... | 351 | Microphone.....                             | 360 |

---

## LIVRE III

### Instruments d'optique.

|   |     |                               |     |
|---|-----|-------------------------------|-----|
| Images données par les len-<br>tilles. — Foyer. — Axe prin-<br>cipal..... | 363 | Loupe.....                    | 370 |
| Construction géométrique de<br>l'image d'un objet.....                    | 364 | Microscope simple.....        | 372 |
| Lentilles divergentes.....  | 366 | Microscope composé.....       | 372 |
| Lanterne magique.....   | 366 | Lunette astronomique.....     | 375 |
| Chambre noire.....  | 367 | Champ. — Grossissement.....   | 377 |
| Photographie.....   | 368 | Axe optique de la lunette.... | 379 |
| Vision.....   | 369 | Lunette terrestre.....        | 379 |
|   |     | Lunette de Galilée.....       | 380 |
|   |     | Télescopes.....               | 382 |
|   |     | Exercices.....                | 383 |

MÉTHODE MARIE. — *Envoi francs au reçu du prix en un mandat-poste*

**ENSEIGNEMENT PRIMAIRE SUPÉRIEUR**  
Programmes officiels de 1893

**ÉLÉMENTS DE CHIMIE**

PAR M. I. FUGOL

AGÈGE DES SCIENCES PH. SIQUES, PROFESSEUR AU LYCÉE SAINT-LOUIS

Ouvrage orné de 111 gravures intercalées dans le texte

ONZIÈME ÉDITION. — 1 vol. in-18 jésus, cart. . . . 2 fr. 50 c

**COURS COMPLET D'HISTOIRE NATURELLE**

PAR M. AUG. DAGUILLON

MAÎTRE DE CONFÉRENCES À LA FACULTÉ DES SCIENCES DE PARIS

Première année. Ouvrage orné de 496 gravures intercalées dans le  
texte. 10<sup>e</sup> édition. 4 vol. de 266 pages, in-18 jésus, cart. 2 fr.

Deuxième année. Ouvrage orné de 333 gravures intercalées dans  
le texte. 6<sup>e</sup> édition. 4 vol. de 438 pages, in-18 jésus, cart. 3 fr.

Troisième année. Ouvrage orné de 306 gravures intercalées dans  
le texte et d'une carte géologique de la France. 3<sup>e</sup> édition. 1 vol. in-18  
jésus, cart. 3 fr.

**COURS DE SCIENCES MATHÉMATIQUES**

PAR M. H. ANDOYER

PROFESSEUR À LA FACULTÉ DES SCIENCES DE PARIS

Cours d'arithmétique. 3<sup>e</sup> édition. 1 vol. in-12, cart. 3 fr.

Cours de géométrie, orné de figures intercalées dans le texte.  
5<sup>e</sup> édition. 1 vol. in-12, cart. 3 fr. 50 c.

Cours d'algèbre. 2<sup>e</sup> édition. 1 vol. in-12, cart. 3 fr.

**TRAITÉ DE COMPTABILITÉ COMMERCIALE**

*des notions générales sur l'économie politique  
de ses rapports avec le commerce, de ses principes commerciaux  
et un résumé complet de la législation commerciale*

PAR M. E. ANETIER

CHIEF DU CONTRÔLE GÉNÉRAL DE LA BANQUE DE FRANCE À STRASBOURG

TROISIÈME ÉDITION. — 1 vol. in-18 jésus, relié en deux tomes, 4 fr.

**COURS ÉLÉMENTAIRE D'AGRICULTURE**

PAR M. V. BARILLOT

AGRICULTEUR EN CHEF DU DÉPARTEMENTAL D'AGRICULTURE DE LYON

Ouvrage orné de 225 gravures intercalées dans le texte

DEUXIÈME ÉDITION. — 2 volumes de 32 pages, in-12, cart. 2 fr.