







LEÇONS  
DE  
PHYSIQUE

(ACOUSTIQUE, OPTIQUE, ÉLECTRICITÉ ET MAGNÉTISME)

A L'USAGE

DES ÉLÈVES DE SECONDE MODERNE

des Aspirants aux Baccalauréats d'ordre scientifique  
et des Candidats aux Écoles du Gouvernement

PAR

J. BASIN

PROFESSEUR AGRÉGÉ AU LYCÉE DE LILLE

---

QUATRIÈME ÉDITION

---

PARIS

LIBRAIRIE NONY & C<sup>ie</sup>  
63, BOULEVARD SAINT-GERMAIN, 63

1902

(Tous droits réservés)





# LEÇONS DE PHYSIQUE

Les LEÇONS DE PHYSIQUE de M. Basin comprennent :

**TOME I : Pesanteur, Chaleur** (4<sup>e</sup> édition). — Programme de *Troisième moderne*. — Un vol. gr. in-12, br. 2 fr. 50; relié toile. 3 fr. »

**TOME II : Acoustique, Optique, Electricité et Magnétisme** (4<sup>e</sup> édition). — Programme de *Seconde moderne*. — Un vol. grand in-12, broché, 3 fr.; relié toile . . . . . 3 fr. 50

**TOME III : Compléments.** — Programme de *Première-Sciences*. — Un vol. gr. in-12.

1<sup>er</sup> Fascicule . . . . . 2 fr. 75

2<sup>e</sup> Fascicule : *Électricité* . . . . . (Sous presse.)

## DU MÊME AUTEUR

**LEÇONS DE CHIMIE** à l'usage des élèves de l'enseignement secondaire moderne et des aspirants au Baccalauréat avec des *Compléments* pour les candidats aux Écoles et les élèves des écoles industrielles. — Un fort vol. gr. in-12, br. 8 fr.; relié toile . . . . . 8 fr. 50

On vend séparément :

**TOME I : Métalloïdes** (6<sup>e</sup> édition), programme de *Troisième moderne*. — Vol. in-12, br. 2 fr. 50; relié toile. . . . . 3 fr. »

**TOME II : Métaux** (6<sup>e</sup> édition), programme de *Seconde moderne*. — Vol. in-12, br. 2 fr.; relié toile . . . . . 2 fr. 50

**TOME III : Chimie générale, Chimie organique. — Analyse chimique** (4<sup>e</sup> édition), programme de *Première-Sciences*. — Vol. in-12, br. 3 fr. 50; relié toile . . . . . 4 fr. »

LEÇONS  
DE  
PHYSIQUE

(ACOUSTIQUE, OPTIQUE, ÉLECTRICITÉ ET MAGNÉTISME)

A L'USAGE

DES ÉLÈVES DE SECONDE MODERNE

des Aspirants aux Baccalauréats d'ordre scientifique  
et des Candidats aux Écoles du Gouvernement

PAR

J. BASIN

PROFESSEUR AGRÉGÉ AU LYCÉE DE LILLE

---

QUATRIÈME ÉDITION

---

PARIS  
LIBRAIRIE NONY & C<sup>ie</sup>  
63, BOULEVARD SAINT-GERMAIN, 63

—  
1902

(Tous droits réservés)



# CLASSE DE SECONDE MODERNE

*Programme du 15 juin 1891*

---

## **Électricité statique.**

Électrisation par le frottement. — Énoncé de la loi des attractions et des répulsions électriques. — Notions sur la distribution de l'électricité à la surface des corps conducteurs. — Effets des pointes.

Électrisation par influence. — Électroscopes. — Electro-phore. — Machine électrique.

Condensation. — Bouteille de Leyde. — Batteries.

Foudre. — Paratonnerres.

## **Magnétisme.**

Aimants naturels et artificiels. — Pôles. — Aiguille aimantée. Définition de la déclinaison et de l'inclinaison.

Boussoles usuelles.

Aimantation par simple touche.

## **Électricité dynamique.**

Pile de Volta. — Effets chimiques du courant.

Piles à courant constant.

Effets calorifiques et lumineux.

Action du courant sur l'aiguille aimantée. — Galvanomètre.

Action des courants sur les courants. — Solénoïde.

Aimantation par les courants. — Electro-aimants.

Notions élémentaires sur l'induction électrique.

## **Acoustique.**

Production du son. — Sa propagation dans l'air ; sa vitesse.

Réflexion. — Écho. — Résonances.

Qualités du son. — Intensité. — Hauteur. — Mesure du nombre de vibrations.

55682

17 (2) 10

## Optique.

Propagation rectiligne de la lumière. — Ombre ; pénombre.  
— Comparaison des intensités de deux sources lumineuses.

Lois de la réflexion. — Propriétés des miroirs plans et des miroirs sphériques.

Lois de la réfraction. — Prisme. — Réflexion totale. —  
Chambre claire.

Lentilles.

Décomposition et recomposition de la lumière. — Spectre solaire.

Microscope solaire. — Loupe. — Microscope. — Lunette astronomique. — Lunette de Galilée. — Télescope de Newton.

Chaleur rayonnante (étude expérimentale).

---

Les élèves de l'enseignement moderne pouvant n'être pas familiarisés avec les lettres grecques, nous reproduisons ici celles dont il a été fait usage dans ce livre, et nous indiquons en regard leur prononciation.

$\alpha$  alpha.

$\Delta$  delta (majuscule).

$\delta$  delta (minuscule).

$\theta$  thêta.

$\lambda$  lambda.

$\mu$  mu.

$\pi$  pi.

$\omega$  ôméga.



# CLASSE DE SECONDE MODERNE

*Programme du 15 juin 1891*

---

## **Électricité statique.**

Électrisation par le frottement. — Énoncé de la loi des attractions et des répulsions électriques. — Notions sur la distribution de l'électricité à la surface des corps conducteurs. — Effets des pointes.

Électrisation par influence. — Électroscopes. — Electro-phore. — Machine électrique.

Condensation. — Bouteille de Leyde. — Batteries.

Foudre. — Paratonnerres.

## **Magnétisme.**

Aimants naturels et artificiels. — Pôles. — Aiguille aimantée. Définition de la déclinaison et de l'inclinaison.

Boussoles usuelles.

Aimantation par simple touche.

## **Électricité dynamique.**

Pile de Volta. — Effets chimiques du courant.

Piles à courant constant.

Effets calorifiques et lumineux.

Action du courant sur l'aiguille aimantée. — Galvanomètre.

Action des courants sur les courants. — Solénoïde.

Aimantation par les courants. — Electro-aimants.

Notions élémentaires sur l'induction électrique.

## **Acoustique.**

Production du son. — Sa propagation dans l'air ; sa vitesse.

Réflexion. — Écho. — Résonances.

Qualités du son. — Intensité. — Hauteur. — Mesure du nombre de vibrations.

## Optique.

- Propagation rectiligne de la lumière. — Ombre ; pénombre.  
— Comparaison des intensités de deux sources lumineuses.
- Lois de la réflexion. — Propriétés des miroirs plans et des miroirs sphériques.
- Lois de la réfraction. — Prisme. — Réflexion totale. —  
Chambre claire.
- Lentilles.
- Décomposition et recomposition de la lumière. — Spectre solaire.
- Microscope solaire. — Loupe. — Microscope. — Lunette astronomique. — Lunette de Galilée. — Télescope de Newton.
- Chaleur rayonnante (étude expérimentale).

---

Les élèves de l'enseignement moderne pouvant n'être pas familiarisés avec les lettres grecques, nous reproduisons ici celles dont il a été fait usage dans ce livre, et nous indiquons en regard leur prononciation.

$\alpha$ alpha.		$\lambda$ lambda.
$\Delta$ delta (majuscule).		$\mu$ mu.
$\delta$ delta (minuscule).		$\pi$ pi.
$\theta$ thêta.		$\omega$ ôméga.

# LEÇONS DE PHYSIQUE

(ACOUSTIQUE, OPTIQUE, ÉLECTRICITÉ, MAGNÉTISME)

---

## ACOUSTIQUE

(PREMIÈRES NOTIONS)

---

### CHAPITRE I

#### ORIGINE ET PROPAGATION DU SON

---

**1. Définitions.** — Le nerf qui se ramifie dans les différentes parties de l'oreille interne, le *nerf acoustique*, est un nerf de sensibilité spéciale, incapable de transmettre au cerveau d'autres sensations que des *sensations sonores*. La cause habituelle de ces sensations est le *son*, et on donne le nom de *corps sonore* à tout corps qui rend ou peut rendre un son.

Les sons se distinguent en sons proprement dits ou *sons musicaux* et en *bruits*. Les sons musicaux nous font éprouver des sensations continues et mélodieuses, susceptibles d'être comparées entre elles. Les bruits, au contraire, ne produisent que des impressions plus ou moins vagues, et il paraît difficile au premier abord de les classer dans l'échelle musicale; les uns sont brusques, pour ainsi dire instantanés, comme le choc d'un marteau sur une enclume,

sur une pierre; les autres paraissent des mélanges confus de sons discordants, comme le roulement du tonnerre, le bruit produit par une chute d'eau.

En réalité, il n'y a pas de différence nettement tranchée entre les sons musicaux et les bruits, et il est possible, en général, de comparer entre eux les bruits de même nature. Si l'on prend, par exemple, sept petites planchettes de bois dur dont les longueurs auront été convenablement réglées, et qu'on les laisse tomber successivement suivant l'ordre de leurs longueurs décroissantes, on obtient une série de bruits donnant à l'oreille la sensation de la gamme naturelle.

## 2. Premières notions sur le mouvement vibratoire. —

Lorsqu'un corps élastique est soumis à une action mécanique, comme un choc, une friction, etc., la déformation qu'il éprouve ne persiste pas, et les molécules déplacées tendent à reprendre leur position d'équilibre; elles n'y reviennent toutefois qu'en exécutant de part et d'autre de cette position une succession d'allées et de venues dont

l'ensemble constitue un *mouvement vibratoire*.

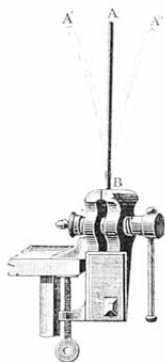


Fig. 1. — Mouvement vibratoire d'une verge d'acier.

Prenons, par exemple, une verge d'acier et fixons-la verticalement dans un étau (*fig. 1*); sa position d'équilibre est AB. Infléchissons cette verge avec le doigt, de manière à l'amener dans la position A'B, et abandonnons-la à elle-même: en vertu de son élasticité, elle tend à revenir à sa position d'équilibre, s'en approche avec une vitesse croissante, la dépasse en vertu de la vitesse acquise et, par un mouvement

qui se ralentit, arrive jusqu'en A''B, qui est sensiblement symétrique de A'B. En A''B, la verge reste au repos

pendant un instant très court pour revenir vers A'B, et ainsi de suite; mais, à cause de la résistance de l'air, elle s'écarte de moins en moins de AB et finit par s'arrêter dans cette position.

L'ensemble d'une allée et d'un retour de la verge se nomme une *vibration complète* ou, simplement, une *vibration*; chacun de ces mouvements constitue une *oscillation* ou *vibration simple*. L'angle que font entre elles deux positions extrêmes A'B et A''B de la verge s'appelle l'*amplitude* du mouvement vibratoire. Si, à l'origine du mouvement, l'amplitude ne dépasse pas une certaine limite, les vibrations de la verge sont *isochrones*, ou, autrement dit, la verge accomplit toujours le même nombre de vibrations pendant le même temps, bien que l'amplitude du mouvement vibratoire diminue progressivement.

**3. Production du son.** — L'expérience montre que tout corps qui produit un son est animé d'un mouvement vibratoire suffisamment rapide pour que l'on ne puisse suivre des yeux les vibrations.

1<sup>o</sup> Revenons à l'expérience précédente (*fig. 1*). Quand la verge d'acier est libre dans la plus grande partie de sa longueur, les vibrations sont relativement lentes et on n'entend aucun son. Si l'on répète plusieurs fois l'expérience en diminuant chaque fois la longueur de la partie vibrante, les vibrations deviennent de plus en plus rapides et l'on cesse bientôt de les distinguer autrement que par une sorte de gonflement de l'extrémité libre. A un moment donné, il y a production d'un son et, à partir de ce moment, le son devient d'autant plus aigu que la longueur de la partie vibrante devient moindre.

2<sup>o</sup> Dans une cloche de verre maintenue dans une posi-

tion légèrement oblique, on fixe avec de la cire un fil

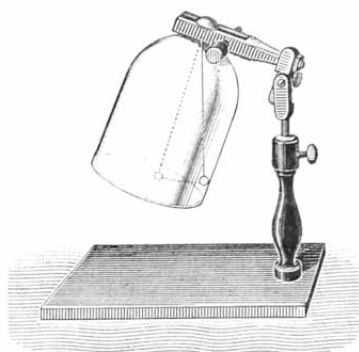


Fig. 2. — Mouvement vibratoire d'une cloche de verre.

soutenant une petite balle métallique (fig. 2), et l'on donne avec la main un coup sec sur les parois de la cloche, de façon qu'elle rende un son : on voit alors la petite balle subir des soubresauts très vifs résultant des chocs qu'elle reçoit.

En posant la main sur les bords de la cloche, on arrête instantanément les vibrations, et la petite balle reprend son immobilité.

Enfin, on met aussi facilement en évidence le mouvement vibratoire rapide d'une corde, d'un diapason, d'une plaque métallique, etc., qui rendent un son. Soit, par exemple, une corde fixée par ses deux bouts et tendue horizontalement

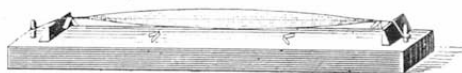


Fig. 3. — Mouvement vibratoire d'une corde.

entre deux chevalets (fig. 3). Si on l'écarte de sa position d'équilibre et qu'on l'abandonne à elle-même, elle y revient par une suite de vibrations très rapides qui la font apparaître comme renflée en son milieu ; en même temps, des petits cavaliers de papier disposés le long de la corde subissent des mouvements très vifs ou sont même renversés.

**4. Définition des qualités du son.** — Le son a trois qualités : l'intensité, la hauteur et le timbre.

L'intensité d'un son est l'énergie avec laquelle il impressionne le nerf acoustique. Toutes choses égales d'ailleurs, l'intensité ne dépend que de l'amplitude du mouvement



vibratoire qui produit le son. On le démontre facilement en se servant d'une corde vibrante (*fig. 3*) ; selon qu'on l'écarte plus ou moins de sa position d'équilibre, elle rend un son plus ou moins intense, tout en donnant toujours la même note musicale. D'une manière générale, quand le mouvement vibratoire d'un corps qui rend un son n'est pas entretenu, l'amplitude décroît progressivement, et l'on constate en même temps que l'intensité du son va en s'affaiblissant.

La hauteur est la qualité qui fait qu'un son est grave ou aigu. On peut la définir aussi : la qualité qui distingue deux sons de même intensité émis par le même corps sonore. La hauteur est la qualité la plus importante du son. Elle dépend de la rapidité des vibrations et elle est d'autant plus grande qu'il se produit un plus grand nombre de vibrations pendant l'unité de temps. Si l'on fait vibrer une corde dont on augmente peu à peu la tension, ses vibrations deviennent de plus en plus rapides et elle rend des sons de plus en plus aigus. On obtient le même résultat en faisant vibrer une verge dont on diminue progressivement la longueur (2).

Le timbre est la qualité qui distingue l'un de l'autre deux sons de même hauteur et de même intensité. C'est par la différence des timbres que l'on distingue, par exemple, une note musicale donnée par un violon de la même note donnée par une flûte avec la même intensité. Les causes du timbre sont assez complexes : nous les étudierons dans le tome III.

#### PROPAGATION DU SON

**5. Milieux qui propagent le son.** — Le son, étant produit par le mouvement vibratoire d'un corps sonore, ne peut

parvenir à l'oreille que par l'intermédiaire d'un corps élastique capable de vibrer comme le corps sonore et de transmettre ainsi le mouvement de proche en proche. D'après cela, le son se propage plus ou moins facilement dans tout milieu élastique (gaz, liquide ou solide), mais *il ne se propage pas dans le vide*. L'expérience vérifie cette

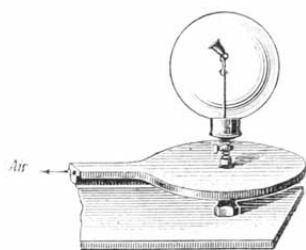


Fig. 4. — Expérience montrant que le son ne se propage pas dans le vide.

dernière conséquence. On se sert d'un ballon de verre à robinet, contenant une petite sonnette suspendue par un cordon de cuir (fig. 4). Tant que le ballon est plein d'air sous la pression ordinaire, il suffit de l'agiter pour entendre la sonnette; mais si l'on a d'abord raréfié suffisamment

l'air qu'il renferme, on n'entend aucun son. Lorsqu'on laisse rentrer peu à peu l'air dans le ballon, l'oreille perçoit de nouveau le son de la clochette, d'abord faiblement, puis avec une intensité de plus en plus grande à mesure que la force élastique de l'air introduit devient plus considérable.

**6. Propagation du son en général.** — L'observation et l'expérience conduisent aux résultats suivants :

1° *Le son ne se propage pas instantanément.* Il s'écoule un certain temps entre la production du son et son audition, et ce temps est d'autant plus long que l'observateur est placé à une plus grande distance du corps sonore. On voit, en effet, la fumée s'échapper de la bouche d'une arme à feu avant d'entendre le bruit de l'explosion, surtout si l'on se trouve à une assez grande distance du tireur ;

l'éclair et le tonnerre se produisent simultanément et cependant on n'entend le tonnerre qu'un certain temps après que l'on a vu l'éclair.

2° *Dans un même milieu et à température égale, la durée de la propagation est la même pour les différents sons.* C'est ainsi que le rythme d'un air, de même que l'ordre dans lequel se succèdent les sons, forts ou faibles, graves ou aigus, qui constituent cet air, ne nous paraissent nullement altérés par l'éloignement.

3° *Le mouvement de propagation du son est uniforme,* c'est-à-dire que le son parcourt des espaces égaux en des temps égaux, quelque petits que soient ces temps. En d'autres termes, si la distance de l'observateur au corps sonore devient 2, 3, 4, . . . fois plus grande, le son met un temps double, triple, quadruple, . . . pour arriver à l'oreille.

L'espace, toujours le même, que parcourt le son en une seconde dans un milieu élastique qui le transmet, s'appelle *la vitesse du son* dans ce milieu.

**7. Propagation du son par les gaz.** — L'air est le milieu qui sert le plus souvent d'intermédiaire pour transmettre les vibrations des corps sonores, mais le son se propage également dans les autres gaz. Si, dans l'expérience du ballon à clochette (5), on introduit dans le ballon vide un gaz quelconque, on obtient le même résultat qu'en y laissant rentrer l'air.

**I. Vitesse du son dans l'air.** — La détermination de la vitesse du son dans l'air repose sur le principe suivant. Soient deux stations A et B situées à une distance déterminée  $d$ . A la station A on produit simultanément, à l'aide d'une arme à feu, un son et un signal lumineux.

Comme la lumière se propage avec une vitesse d'environ  $300\,000^{\text{m}}$  par seconde, on peut admettre que le signal lumineux apparaît au moment même où le coup part à un observateur posté en B ; l'intervalle  $t$  secondes qui sépare le moment où ce dernier voit le signal de celui où il entend le son représente le temps qu'a mis le son pour parcourir la distance  $d$ . Le mouvement du son étant uniforme, sa vitesse de propagation est  $v = \frac{d}{t}$ .

Les expériences anciennes les plus précises sur la vitesse du son ont été exécutées par le Bureau des longitudes en 1822. Les membres du Bureau des longitudes, auxquels s'étaient adjoints Humboldt et Gay-Lussac, se divisèrent en deux groupes : l'un s'établit sur les hauteurs de Villejuif, l'autre sur les hauteurs de Montlhéry. De 5 minutes en 5 minutes un coup de canon était tiré alternativement à chacune des deux stations et les observateurs de l'autre station notaient, avec des chronomètres très précis, le temps qui s'écoulait entre l'apparition de la lumière au moment de l'explosion et l'audition du bruit. La moyenne des temps employés par le son pour aller de Villejuif à Montlhéry, et réciproquement, fut trouvée égale à  $54^{\text{sec}},6$ . Comme la distance entre les deux stations était  $18613^{\text{m}}$ , on obtint  $\frac{18613}{54,6}$  ou  $340^{\text{m}},9$  pour la vitesse du son à la température moyenne des expériences, température qui était d'environ  $16^{\circ}$ .

Ces expériences, de même que toutes les expériences analogues, présentent un certain nombre de causes d'erreur : l'air est plus ou moins agité, la température n'est pas uniforme entre les deux stations, le centre d'ébranlement peut ne pas être à l'embouchure du canon, enfin le temps qui s'écoule entre le moment où une impression naît sur l'oreille et le moment où l'on a conscience de cette impres-

sion au point de la noter sur un chronomètre est variable d'un observateur à l'autre. Ce temps s'appelle l'équation personnelle : il peut atteindre jusqu'à  $\frac{2}{10}$  de seconde. Au lieu de noter 54<sup>m</sup>,6, un observateur notera par exemple 54<sup>m</sup>,4. La différence  $\frac{18613}{54,4} - \frac{18613}{54,6} = 1^m,25$  n'est pas négligeable.

Dans les expériences modernes, on a supprimé l'équation personnelle et atténué le plus possible les autres causes d'erreur. Regnault a opéré successivement à l'air libre et dans des tuyaux de conduite de gaz. L'instant de l'explosion et l'arrivée du son étaient enregistrés automatiquement d'une façon très précise par des procédés électriques. La moyenne de toutes ses expériences a donné pour la vitesse du son 331<sup>m</sup> à 0°. Récemment, MM. Violle et Vautier, en se servant du tambour enregistreur de Marey et en produisant des sons caractérisés par des ébranlements très petits, ont trouvé 330<sup>m</sup>,9 à 0°, ou 33090<sup>cm</sup> suivant le système d'unités adopté en Physique.

INFLUENCE DE LA TEMPÉRATURE. — La vitesse du son dans l'air augmente ou diminue dans le même sens que la température. Newton a trouvé par le calcul qu'elle varie proportionnellement à la racine carrée du binôme de dilatation. D'après cela, la vitesse du son à 0° se déduit de la vitesse  $V$  observée à  $t^\circ$  en appliquant la formule

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

En remplaçant dans cette formule  $\alpha$  par  $\frac{1}{273}$  et en y faisant  $t = 1$ , on trouve que la vitesse du son augmente d'environ 62<sup>cm</sup> par degré centigrade.

INFLUENCE DU VENT ET DE LA FORCE ÉLASTIQUE. — La vitesse de 330<sup>m</sup>,9 à 0° n'est exacte que si le son se propage dans un air calme ; lorsque l'air est agité, la vitesse du son augmente ou diminue suivant que le vent souffle dans le sens même de la propagation du son ou en sens inverse. C'est pour éliminer l'influence du vent que, dans la détermination de la vitesse du son à l'air libre, l'expérience est faite d'une façon alterne aux deux stations. La moyenne des temps employés par le son pour se propager d'une station à l'autre et réciproquement représente sensiblement le temps qui aurait été employé dans un air calme.

Quant à la force élastique de l'air, elle n'a aucune influence sur la vitesse de propagation du son. Regnault a vérifié directement ce principe en comprimant ou raréfiant l'air dans les tuyaux de conduite qui lui servaient à déterminer la vitesse du son.

**II. Vitesse du son dans les divers gaz.** — La vitesse du son dans les divers gaz se détermine indirectement par une méthode fondée sur les lois des vibrations dans les tuyaux sonores. Elle varie en raison inverse de la racine carrée de la densité du gaz.

Vitesse du son dans quelques gaz usuels à 0°.

	Densité	Vitesse
Gaz carbonique . . . . .	1,529	261 <sup>m</sup> ,6
Éthylène . . . . .	0,978	314
Oxygène . . . . .	1,105	317,2
Oxyde de carbone . . . . .	0,957	337,4
Azote . . . . .	0,968	363
Hydrogène . . . . .	0,069	1269,5

**8. Mécanisme de la propagation du son dans l'air.** — Lorsqu'un son se produit dans l'air, les vibrations du corps sonore ébranlent ce milieu élastique et se transmettent de proche en proche par un mécanisme que nous allons étudier.

**I. Propagation dans un milieu limité.** — Prenons pour point de départ l'expérience destinée à montrer comment se transmet le choc entre des corps solides élastiques de masses égales. Sept billes d'ivoire, de même diamètre, sont suspendues par des fils de soie à un support horizontal de manière à être en contact sans se comprimer mutuellement (*fig. 5*). Si l'on écarte la première bille de sa position d'équilibre pour la laisser ensuite retomber librement sur la seconde bille, on constate que la dernière bille seule se déplace sous l'influence du choc ; celle-ci retombe à son tour, et ainsi de suite, de sorte que les



deux billes extrêmes s'écartent alternativement et en sens

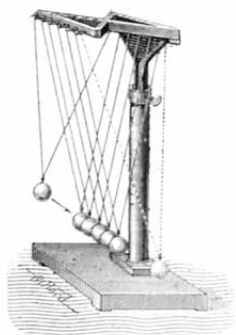


Fig. 5. — Appareil montrant la transmission du choc entre les corps élastiques.

contraire de leur position d'équilibre. Les billes intermédiaires ne se déplacent pas d'une manière apparente ; mais chacune d'elles subit, au moment du choc, une déformation, puis reprend sa forme primitive, en transmettant à la bille suivante la compression qu'elle a éprouvée.

Cette propagation de la compression dans une série de corps élastiques en contact présente une grande analogie avec la propagation d'une compression exercée dans un milieu limité rempli d'air. Soit, en effet,

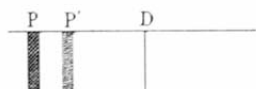


Fig. 6. — Étude de la propagation d'une compression dans un milieu limité rempli d'air.

un tuyau cylindrique que nous supposerons indéfini vers la droite (fig. 6) et à l'entrée duquel une plaque P éprouve des déplacements très petits et très rapides de P en P' et inversement. Quand

la plaque va de P en P', elle pousse l'air devant elle, mais la masse d'air contenue dans le tuyau ne se met pas tout entière en mouvement, car l'air est compressible ; une colonne d'air de longueur très petite, PD par exemple, est amenée à n'avoir plus que la longueur PD et éprouve, par suite, un accroissement de force élastique. Cette première colonne ainsi condensée réagit, en se déplaçant d'une quantité très petite, sur la colonne de même masse qui la suit immédiatement ; cette seconde colonne diminue à son tour de volume, tandis que la première reprend son volume primitif et rentre en repos.

En vertu de l'accroissement de sa force élastique, la deuxième colonne se détend en comprimant l'air de la colonne suivante de même masse, et ainsi de suite; de sorte que la condensation éprouvée par la première colonne d'air sous l'effet du déplacement de la plaque de P en P' se communique successivement et intégralement à toutes les colonnes de même masse dans lesquelles on peut décomposer la masse de l'air qui remplit le tuyau, chaque colonne rentrant en repos après avoir transmis sa condensation à la suivante. — Inversement, quand la plaque revient de P' en P, la colonne d'air qui est à l'origine du tuyau est dilatée par aspiration au lieu d'être condensée par impulsion; sa force élastique étant dès lors plus faible que celle de la seconde colonne, celle-ci se dilate à son tour en ramenant la première au repos et la dilatation se transmet d'une colonne à la suivante dans toute l'étendue du tuyau, comme s'était transmise précédemment la condensation.

Substituons maintenant un mouvement vibratoire au mouvement uniforme de la plaque précédente et prenons comme corps vibrant une verge élastique dont l'extrémité

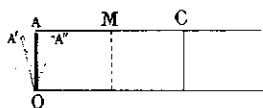


Fig. 7. — Étude de la propagation d'un mouvement vibratoire dans un milieu limité rempli d'air.

se trouve vis-à-vis du tuyau et dans la position A'O (fig. 7). Cette verge, en oscillant de A'O en A''O et inversement, communique à la colonne d'air en contact avec elle une succession d'impulsions et d'aspirations qui se transmettent de colonne en colonne dans le tuyau avec la vitesse

de propagation du son. Seulement, comme la vitesse de la verge dans chaque demi-vibration est d'abord croissante, puis décroissante (2), la condensation ou la dilata-

tion qui en résultent sont d'abord croissantes puis décroissantes dans toute l'étendue d'une même colonne d'air. Au début de la première oscillation, la vitesse de la verge est très petite et la condensation qui en résulte pour l'air est très faible; à cette condensation succèdent des condensations de plus en plus fortes; elles atteignent un maximum lorsque la verge est en AO, puis diminuent d'une manière continue jusqu'à ce que la position A'O soit atteinte. A ce moment l'impulsion initiale est arrivée en C, par exemple, et, dans la partie A'C, l'air éprouve des condensations qui sont croissantes de C en M, décroissantes de M en A'. — Quand la verge revient de A'O à son point de départ, les dilatations se succèdent en suivant les mêmes lois que les condensations précédentes et leur propagation s'effectue toujours avec la vitesse de propagation du son. — En résumé, après une vibration, c'est-à-dire quand la verge a accompli deux oscillations contraires et symétriques, la

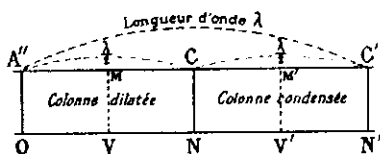


Fig. 8. — Etat de l'air du tuyau après deux oscillations du corps vibrant.

longueur A'C' (fig. 8) de la partie ébranlée est double de celle qui était ébranlée après la première oscillation et elle correspond à une colonne

d'air condensée suivie d'une colonne d'air dilatée; après deux vibrations, elle est quadruple, et ainsi de suite, les colonnes d'air qui se succèdent étant toujours alternativement condensées et dilatées.

La longueur occupée par les deux colonnes d'air condensée et dilatée pour une vibration, ou, en d'autres termes, la distance A'C' à laquelle le mouvement se propage pendant la durée d'une vibration se nomme *longueur*

d'ondulation ou longueur d'onde; on la représente par  $\lambda$ . Une longueur d'onde se compose d'une *demi-onde condensée* C'C et d'une *demi-onde dilatée* CA". Dans les tranches d'air C'N', CN situées à la jonction de deux demi-ondes consécutives, la vitesse d'ébranlement est nulle mais la variation de la force élastique est maxima; ce sont des *nœuds* de vibration. Au contraire, dans les tranches telles que M'V', MV, la vitesse d'ébranlement est maxima et la force élastique est égale à la pression atmosphérique; ce sont des *ventres* de vibration. En M'V', MV l'oreille serait impressionnée; en C'N', CN, elle ne le serait pas. L'impression physiologique ne dépend donc pas des inégalités de force élastique, mais des vitesses des tranches d'air et par suite de l'amplitude du mouvement vibratoire.

REMARQUES. — 1° On représente ordinairement les états variables de la condensation et de la dilatation de l'air par une

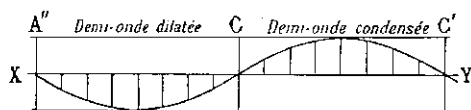


Fig. 9. — Représentation graphique des condensations et dilatations produites par un mouvement vibratoire dans un milieu limité.

courbe. Sur une droite XY dirigée suivant l'axe du tuyau (fig. 9), on élève des perpendiculaires proportionnelles chacune à l'ava-

leur de la condensation ou de la dilatation dans chaque tranche, ces perpendiculaires étant par convention au-dessus de XY quand elles correspondent à des condensations et au-dessous de cette même droite quand elles correspondent à des dilatations. Si l'on joint les extrémités de ces perpendiculaires, on obtient une courbe continue formée d'arcs égaux, situés alternativement au-dessus et au-dessous de XY. La longueur totale de deux arcs consécutifs est égale à  $\lambda$ , et celle d'un seul arc à  $\frac{\lambda}{2}$ . Enfin on voit à l'inspection de la courbe que dans deux tranches d'air perpendiculaires à XY et distantes l'une de l'autre d'une longueur d'onde ou, en général, d'un nombre entier de longueurs d'onde, les vi-

tesses d'ébranlement sont égales et de même sens au même moment : ces tranches sont dans la *même phase* de leur mouvement vibratoire. Au contraire, dans deux tranches séparées par un intervalle égal à une demi-longueur d'onde ou à un nombre impair de  $\frac{\lambda}{2}$ , les vitesses d'ébranlement sont encore égales mais elles sont de sens contraire : ces tranches sont dans des *phases opposées* de leur mouvement vibratoire.

2° La longueur d'onde dépend essentiellement de la hauteur du son produit à l'ouverture du tuyau. En effet, après une vibration complète de la verge, le mouvement vibratoire est parvenu à une distance  $\lambda$ ; après deux vibrations il est parvenu à une distance  $2\lambda$ ; et après  $n$  vibrations à une distance  $n\lambda$ . Si  $n$  représente le nombre de vibrations accomplies par la verge pendant  $t''$ , on aura évidemment  $n\lambda = Vt''$ ,  $V$  représentant la vitesse du son. On en tire

$$\lambda = \frac{V}{n}.$$

Comme exemple, si la verge fait 500<sup>vb</sup> par seconde, la longueur d'onde correspondant au son qu'elle produit est  $\frac{340}{500} = 68^{\text{cm}}$ .

II. Propagation dans un milieu indéfini. — Considérons maintenant un mouvement vibratoire se produisant

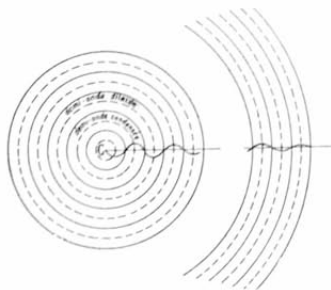


Fig. 10. — Propagation du son dans un milieu indéfini.

dans un milieu homogène qui n'est limité dans aucune direction, comme l'atmosphère, et soit C le centre d'où émanent les vibrations (fig. 10). Il constitue un centre d'ébranlement autour duquel se produisent dans tous les sens des condensations et des dilatactions analogues à celles que

nous avons étudiées dans une seule direction, et le son

se propagera par une série d'ondes sphériques alternativement condensées et dilatées, séparées par des intervalles de repos. Seulement, tandis que dans un tuyau cylindrique l'intensité du son reste sensiblement la même à toute distance, les ondes successives ayant même masse, le son émis dans un milieu indéfini s'affaiblit rapidement quand la distance augmente, car il se répartit successivement sur des sphères concentriques de rayons croissants, et il se transmet ainsi à des masses d'air de plus en plus grandes.

REMARQUE. — On peut encore se rendre compte du mécanisme de la propagation du son dans un milieu indéfini en observant ce qui se passe quand une pierre tombe dans une nappe d'eau tranquille : on voit naître une série de cercles concentriques alternativement surélevés et affaissés qui s'étendent lentement. Ces cercles représentent assez bien la succession des demi-ondes condensées et dilatées dans l'air. Ici encore il n'y a pas transport du fluide : un corps léger, tel qu'un bouchon, posé en un point de la nappe d'eau, reste toujours sensiblement à la même place ; il ne fait qu'éprouver un petit mouvement de va-et-vient, en se soulevant et s'enfonçant alternativement suivant la nature des ondes qui viennent l'ébranler. Il faut remarquer toutefois quelques différences entre ce phénomène et celui qui se produit dans l'air autour d'un corps sonore : les ondes aqueuses sont circulaires au lieu d'être sphériques comme les ondes sonores ; de plus, tandis que les vibrations d'un corps sonore sont longitudinales, c'est-à-dire dirigées suivant les rayons de l'onde, les mouvements de va-et-vient de chacun des points d'ébranlement à la surface de l'eau sont transversaux, c'est-à-dire perpendiculaires au rayon de l'onde.

**9. Propagation du son par les liquides.** — Les liquides transmettent le son mieux que les gaz. Un plongeur entend très distinctement un son produit dans l'eau, et cela même à une assez grande distance. La vitesse du son dans l'eau a été déterminée directement par Colladon et Sturm en 1827,

par moyen d'expériences faites sur le lac de Genève. Ils ont trouvé  $1435^m$  par seconde, c'est-à-dire une vitesse environ 4 fois  $1/2$  plus grande que celle du son dans l'air.

La figure 44 représente la disposition adoptée dans les expériences de Colladon et Sturm. Deux bateaux étaient amarrés

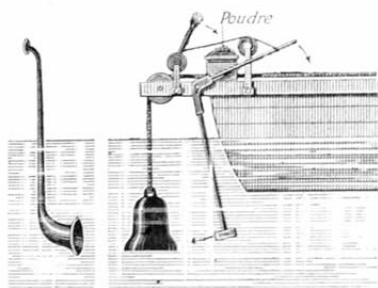


Fig. 44. — Détermination de la vitesse du son dans l'eau. (Disposition schématique)

à une distance connue l'un de l'autre ( $13487^m$ ). Le premier portait à l'avant une cloche plongeant dans l'eau du lac, et un levier coudé, muni à sa base d'un battant, était disposé de façon que, au moment où ce dernier frappait la cloche, une mèche allumée fixée au levier vint enflammer un petit tas de

poudre. Un observateur, placé dans le deuxième bateau, écoutait le son à l'aide d'un cornet acoustique dont le pavillon, immergé dans le lac, était fermé par une membrane tendue pour empêcher l'eau d'entrer. L'intervalle entre l'apparition de la lumière et l'audition du son fut trouvé égal à  $9^s,4$ , ce qui donna pour la vitesse cherchée  $1435^m$  à la température d'environ  $8^o$ .

**10. Propagation du son par les solides.** — Les solides transmettent le son plus facilement encore que les liquides. Tout le monde sait qu'en plaçant l'oreille contre terre on peut entendre à de grandes distances le roulement d'un train ou d'une voiture, les décharges d'artillerie, etc. Si l'on gratte très légèrement l'extrémité d'une table avec une plume ou une épingle, l'oreille appuyée contre l'autre extrémité perçoit très distinctement ce bruit.

Biot a déterminé directement la vitesse du son dans la fonte en se servant d'un assemblage de tuyaux qui formaient une longueur totale de  $951^m,25$ . A une extrémité on produi-

sait un son par le choc d'un marteau sur un timbre ; à l'autre extrémité, on entendait successivement deux sons pour chaque coup de marteau, le premier transmis par le métal et le second par l'air. Comme ces deux sons étaient séparés par un intervalle de temps égal à 2",5, on avait, en désignant par  $\alpha$  et  $V$  les vitesses du son dans la fonte et dans l'air,

$$\frac{951,25}{V} - \frac{951,25}{\alpha} = 2",5,$$

d'où l'on trouva  $\alpha = 10,5 V$ , c'est-à-dire que la vitesse du son dans la fonte est 10 fois 1/2 plus grande que la vitesse dans l'air.

La fonte est la seule substance solide sur laquelle on ait fait des observations directes. Pour les autres solides, on a eu recours à des procédés indirects. Wertheim, en appliquant des formules relatives aux vibrations des verges, a trouvé qu'en prenant pour unité la vitesse du son dans l'air, la vitesse du son dans le plomb est représentée environ par 4 ; elle est représentée par 8 dans l'argent, par 15 dans le fer, par 10 à 13 dans le bois de chêne, par 12 à 17 dans le bois de sapin. La vitesse du son présente d'ailleurs dans un même corps des variations assez notables, dues aux différences qu'il peut offrir dans son état physique.

APPLICATIONS. — La facilité avec laquelle les solides transmettent le son est utilisée dans les audiphones et dans les téléphones à ficelle.

Les *audiphones* sont destinés à faciliter l'audition aux personnes qui ont l'ouïe dure. Les plus simples consistent en une sorte d'écran taillé dans du carton mince de manière qu'un de ses bords soit rectiligne et l'autre convexe. Si l'on applique ce dernier contre la mâchoire supérieure, le bord rectiligne étant tenu à la main, les sons émis devant l'audiphone se transmettent au nerf acoustique par le carton et par les os de la tête et sont perçus distinctement.

Le *téléphone à ficelle*, si répandu comme jouet d'enfant, se compose de deux godets métalliques en forme de tronc de cône, fermés chacun par une membrane de parchemin bien



tendue. Les centres des deux membranes sont reliés par une ficelle, ou mieux par une corde de soie. Ce petit appareil permet de converser à voix basse en plein air à quelque distance.

**11. Réflexion du son.** — Lorsqu'un son rencontre dans sa propagation un obstacle rigide, il revient sur lui-même en se propageant de nouveau en sens inverse; de telle sorte qu'un observateur placé en avant de l'obstacle entend, outre le son primitif, un son identique qui semble émaner d'un second centre sonore placé de l'autre côté de l'obstacle: on dit alors que le son s'est *réfléchi* sur l'obstacle.

Soit un centre de vibration  $C$  produisant un son dans un milieu indéfini (*fig. 12*); il donne naissance à des ondes sonores sphériques concentriques (8). Si ces ondes viennent rencontrer un plan rigide  $PP'$ , les vitesses d'ébranlement changent de signe au contact du plan et il se produit ainsi une série d'ondes réfléchies qui cheminent en sens contraire des ondes directes et se comportent comme si elles émanaient du centre virtuel  $C'$ , symétrique de  $C$

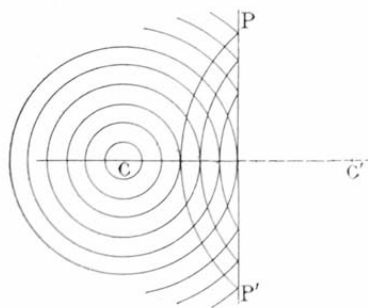


Fig. 12. — Réflexion du son.

par rapport à  $PP'$ : le centre  $C'$  est appelé *l'image sonore* du centre  $C$  qui donne le son direct.

Le phénomène de la réflexion du son est tout à fait analogue aux phénomènes de la réflexion de la lumière et de la chaleur, de sorte que les surfaces courbes qui concentrent la lumière et la chaleur par réflexion concentrent aussi le son. Pour le vérifier, on se sert de deux miroirs concaves placés en regard l'un de l'autre à plusieurs

mètres de distance, de façon que leurs axes coïncident (fig. 13). Un son faible, tel que le tic-tac d'une montre,

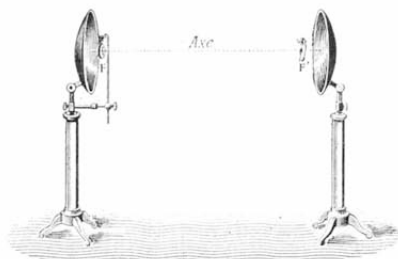


Fig. 13. — Vérification de la réflexion du son.

quand il est produit devant l'un des miroirs en un point spécial  $F$  appelé *foyer*, est entendu très distinctement au foyer  $F'$  de l'autre miroir ; mais il cesse d'être perçu dès que l'oreille s'écarte de ce foyer  $F'$ . Le son a été ainsi concentré en  $F'$  comme le serait la lumière émise par un corps lumineux, une bougie par exemple, placée en  $F$ . La concentration du son par réflexion par les surfaces courbes peut être constatée également sous les voûtes des ponts de pierre, des cryptes d'église, etc. Au Conservatoire des arts et métiers, il existe une salle à voûte elliptique : deux personnes placées aux foyers de l'ellipse et tournées vers le mur, peuvent entretenir une conversation à voix basse sans être entendues par les personnes qui se trouvent dans l'intervalle.

**Échos.** — On donne le nom d'écho au phénomène de la répétition d'un son par suite de sa réflexion sur un obstacle.

Le son réfléchi est toujours en retard sur le son direct ; cela tient à ce qu'il doit parcourir un chemin plus long pour arriver à un point quelconque. D'un autre côté, le nerf acoustique ne peut être impressionné par deux sensations sonores *brèves* consécutives que si elles sont séparées par un intervalle d'au moins  $\frac{1}{40}$  de seconde. Pendant

ce temps, le son parcourt  $\frac{340}{10}$  ou  $34^m$ . Cela posé, si un observateur produit un son bref, comme un choc par exemple, à plus de  $17^m$  d'une surface réfléchissante, il y aura écho, car le chemin parcouru par le son réfléchi sera supérieur à  $34^m$  et la sensation du son direct sera éteinte quand le son réfléchi parviendra à son tour à l'oreille de l'observateur.

Si la distance à la surface réfléchissante est inférieure à  $17^m$ , le son direct et le son réfléchi tendront à se confondre, et le premier se trouvera simplement renforcé : on dit qu'il y a *résonance*.

REMARQUES. — 1° Pour les syllabes, la distance de  $17^m$  est insuffisante pour que l'écho soit perçu nettement. En effet, il faut au minimum  $\frac{1}{5}$  de seconde pour articuler une syllabe et comme, pendant ce temps, le son parcourt  $68^m$ , on n'obtiendra l'écho d'une syllabe (*écho monosyllabique*), que si la distance du son à l'obstacle réfléchissant est au moins de  $34^m$ . Si l'on parle à haute voix devant un obstacle distant de deux fois  $34^m$ , l'écho répètera deux syllabes successives (*écho dissyllabique*), et ainsi de suite. Enfin lorsqu'un son est produit entre deux obstacles placés en regard l'un de l'autre, il subit une série de réflexions successives qui donnent naissance à des *échos multiples*, se succédant avec une intensité décroissante. Ce phénomène s'observe fréquemment dans les pays de montagnes.

2° Le phénomène de la résonance est avantageux dans les salles de dimensions restreintes, car les sons réfléchis par les murs reviennent à l'oreille au bout d'un temps très court et se confondent sensiblement avec les sons directs correspondants, de sorte que la voix acquiert une ampleur qu'elle n'aurait pas à l'air libre. En revanche, les résonances sont généralement nuisibles dans les salles de grandes dimensions : l'impression produite sur le nerf acoustique se trouve prolongée par la réflexion sans profit pour l'intensité du son, et les échos qui succèdent aux sons émis peuvent même arriver à épiétrer, pour l'auditeur, sur les sons suivants. On affai-

blit les résonances en disposant le long des murs des tentures, des draperies ; ces corps réfléchissent mal le son et rendent les salles vastes moins retentissantes. Dans les théâtres, les églises, etc., les mauvais effets produits par la résonance sont atténués par les colonnes, les balustrades, les parties saillantes.

## RÉSUMÉ DU CHAPITRE I

Lorsqu'un corps élastique est écarté de sa position d'équilibre, il y revient en exécutant de part et d'autre de cette position une série d'oscillations rapides dont l'ensemble constitue un mouvement vibratoire. On appelle *vibration* le passage d'une position d'écart à la position symétrique et le retour à la position initiale : l'*amplitude* est l'angle que font les deux positions extrêmes.

Tout corps qui rend un son est animé d'un mouvement vibratoire ; on le démontre en ébranlant une verge fixée dans un étau, une cloche munie d'une petite balle, une corde fixée à ses deux extrémités.

On distingue dans un son l'*intensité*, la *hauteur* et le *timbre*. L'intensité dépend, toutes choses égales d'ailleurs, de l'amplitude du mouvement vibratoire. La hauteur ne dépend que du nombre de vibrations exécutées pendant l'unité de temps. Le timbre distingue l'un de l'autre deux sons de même hauteur et de même intensité.

Le son ne se propage pas dans le vide ; il se propage dans tout milieu élastique, et son mouvement de propagation est uniforme. La *vitesse* du son dans un milieu élastique est l'espace qu'il parcourt en une seconde dans ce milieu.

Pour déterminer la vitesse du son dans l'air, on note, d'une station B, l'intervalle qui sépare un signal lumineux et un son produits simultanément à une station A et on divise la distance AB par le temps noté. On admet aujourd'hui environ 331<sup>m</sup> pour la vitesse du son à 0°.

Lorsqu'un corps émet un son dans l'air, il communique à l'air le mouvement vibratoire dont il est animé. Autour du corps sonore se produisent une série de condensations et de dilatations qui se succèdent alternativement et se transmettent avec la vitesse de propagation du son.

Les liquides transmettent les sons mieux que les gaz. La vitesse du son dans l'eau est d'environ 1435<sup>m</sup>. Dans les solides, la vitesse du son est encore plus grande.

Le son se réfléchit quand il rencontre un obstacle : les ondes sonores reviennent sur elles-mêmes et se propagent de nouveau en paraissant émaner d'un centre situé au-delà de l'obstacle et symétrique du centre sonore. Le phénomène de la réflexion du son est analogue au phénomène de la réflexion de la lumière ; aussi les sur-

faces courbes qui concentrent la lumière concentrent-elles aussi le son. On le démontre avec deux miroirs courbes conjugués.

Le son réfléchi est toujours en retard sur le son direct : si l'intervalle qui sépare la perception de ces deux sons est très court ( $\frac{1}{10}$  de seconde pour les sons brefs), les deux sons se superposent partiellement et il y a renforcement du son direct ou *résonance* ; dans le cas contraire, les deux sons sont distincts et il y a *écho*.

### EXERCICES SUR LE CHAPITRE I

1. Il s'est écoulé 5<sup>ms</sup> entre l'instant où l'on a vu la fumée s'échapper d'une arme à feu et celui où l'on a entendu le bruit de l'explosion. La température est de 15°. A quelle distance se trouve-t-on du tireur ? On sait que la vitesse du son à 0° est 330<sup>m</sup>,9.

2. Un projectile lancé de haut en bas par une arme à feu vient frapper le sol au bout de 10<sup>ms</sup>. Au même instant, un observateur placé près de l'endroit où touche le projectile entend la détonation. Quelle est la vitesse du projectile au sortir de l'arme ? On donne :  $g = 981^{\text{cm}}$ , et la vitesse de propagation du son dans l'air à la température de l'expérience égale à 34000<sup>cm</sup>.

3. On a lâché une pierre à l'orifice d'un puits à un instant donné et le bruit de sa chute dans l'eau n'a été entendu que 4<sup>ms</sup> après cet instant. Quelle est la profondeur du puits ? Accélération due à la pesanteur : 981<sup>cm</sup> ; vitesse du son : 34000<sup>cm</sup> à la température de l'expérience.

4. Deux observateurs, placés à 110<sup>m</sup> l'un de l'autre, sont devant un mur situé à 53<sup>m</sup> de chacun d'eux. Le premier émet un son qui arrive au second d'abord directement, puis par réflexion sur le mur. Calculer le temps écoulé entre l'audition du premier son et celle du second. Vitesse du son : 340<sup>m</sup> par seconde.

## CHAPITRE II

### ÉTUDE DE L'INTENSITÉ ET DE LA HAUTEUR D'UN SON

12. *Variations de l'intensité d'un son.* — L'intensité d'un son ne dépend, comme nous l'avons vu, que de l'amplitude du mouvement vibratoire correspondant, toutes

choses égales d'ailleurs; elle augmente ou diminue avec cette amplitude (4). Pour une amplitude déterminée, l'intensité varie avec diverses circonstances, dont les plus importantes sont la distance au corps sonore et le voisinage d'autres corps sonores.

**Variation avec la distance.** — *Dans un milieu homogène indéfini, l'intensité varie en raison inverse du carré de la distance au corps sonore.* Ainsi une surface déterminée, comme l'oreille d'un observateur, placée successivement à des distances 1, 2, 3, 4, ... d'un corps sonore, reçoit des quantités d'énergie vibratoire qui sont entre elles comme

$$1, \frac{1}{4}, \frac{1}{9}, \frac{1}{16}, \dots$$

Cette loi peut être établie facilement par le raisonnement. Pour cela, on fait correspondre à l'impression physiologique une grandeur qui varie comme l'impression physiologique elle-même. Or cette impression ne dépend que des vitesses des molécules gazeuses. On est donc amené à prendre pour intensité du son l'énergie vibratoire reçue par une surface de 1<sup>er</sup> pendant une seconde, cette surface étant normale à la direction de la propagation.

Cela posé, considérons un mouvement vibratoire d'amplitude très faible. On peut admettre dans ce cas que l'énergie vibratoire transmise à l'air se répartit d'une manière *uniforme* sur des sphères concentriques de rayons croissants. Appelons  $e$  la quantité d'énergie vibratoire reçue par chaque centimètre carré d'une sphère de rayon  $d$ ,  $e'$  la quantité reçue par chaque centimètre carré d'une sphère de rayon  $2d$ , concentrique à la précédente. Les quantités totales d'énergie reçues par les deux sphères sont respectivement  $e \times 4\pi d^2$  et  $e' \times 4\pi \times 4d^2$ . Comme ces quantités sont égales, on a

$$e \times 4\pi d^2 = e' \times 16\pi d^2,$$

d'où 
$$\frac{e'}{e} = \frac{4\pi d^2}{16\pi d^2} = \frac{1}{4}.$$

Dans un milieu limité, comme un tuyau cylindrique, l'énergie vibratoire se communique à des masses égales

dans les tranches d'air successives et l'affaiblissement du son est beaucoup moins grand que dans un milieu indéfini. L'intensité du son resterait même constante à toute distance si l'énergie vibratoire ne se communiquait pas en partie aux parois qui limitent le milieu.

**Variation avec le voisinage de corps sonores.** — Lorsqu'un corps sonore émet un son dans le voisinage d'un autre corps sonore, l'intensité du son est plus ou moins augmentée; on dit alors qu'il est *renforcé*. Ce renforcement est dû à ce que les deux corps sonores vibrent à l'unisson. Le son rendu par un diapason en vibration est très faible si l'instrument est tenu directement à la main; il est renforcé et peut être entendu à une distance plus ou moins grande si le pied qui soutient le diapason est appuyé sur une table ou mieux sur une boîte pleine d'air. La même remarque peut être faite avec une corde tendue successivement à l'air libre et au-dessus d'une plaque de bois mince (table d'harmonie) ou d'une caisse sonore. De là l'emploi des tables et des caisses d'harmonie dans les instruments à cordes.

En général, une cavité pleine d'air renforce un grand nombre de sons, surtout si ses dimensions sont un peu considérables; mais tous ces sons ne sont pas également renforcés, et certains sons de hauteur déterminée sont toujours plus renforcés que les autres. Pour certaines formes de la cavité, comme la forme sphérique, il n'y a plus qu'un son renforcé, et l'enveloppe qui limite la cavité prend le nom spécial de *résonateur*. Nous reviendrons plus tard sur les résonateurs.

**Applications.** — Comme applications de ce qui précède, nous étudierons les tubes acoustiques, les porte-voix, les cornets acoustiques et les stéthoscopes.

Les *tubes acoustiques*, employés principalement dans

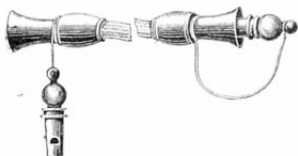


Fig. 14. — Tube acoustique.

les administrations et les maisons de commerce pour transmettre les ordres à distance, reposent sur la conservation de l'intensité du son dans les tuyaux. Ce sont des tubes cylindriques en caoutchouc (fig. 14), terminés à chacune de leurs extrémités par une embouchure évasée, en os ou en ivoire. Un sifflet qui s'emboîte dans chaque embouchure sert d'avertisseur. Quand on veut se servir d'un tube acoustique, on enlève le sifflet du même côté et on souffle fortement dans le tube de manière à faire résonner le sifflet placé à l'autre extrémité. Cet appel ayant été entendu, celui qui écoute enlève à son tour le sifflet et applique l'embouchure à son oreille, tandis que celui qui parle place sa bouche contre l'autre embouchure.

Les *porte-voix*, dont on se sert pour transmettre la voix à distance, sont des tubes en fer-blanc verni, légèrement coniques, se terminant d'un côté par un large évasement appelé pavillon, et à l'autre extrémité par une embouchure de forme spéciale dans laquelle on parle (fig. 15). Ils sont surtout usités dans la marine. — La colonne d'air qui remplit le porte-voix vibre à l'unisson du son émis dans l'embouchure, et le renforcement ainsi produit remédie à l'affaiblissement que le son éprouve quand la distance augmente.



Fig. 15. — Porte-voix.

Les porte-voix ordinaires ont 4<sup>m</sup> de long et peuvent faire entendre les sons à plusieurs kilomètres, surtout les sons articulés.

Les *cornets acoustiques* sont destinés à suppléer au dé-



faut de sensibilité de l'oreille en renforçant les sons. On leur donne des formes très diverses, dont la plus simple est celle d'un porte-voix renversé (*fig. 16*). Pour s'en servir, on introduit l'extrémité étroite dans l'oreille et on dirige le pavillon vers le point d'où viennent les sons que l'on veut entendre.



Fig. 16. — Cornet acoustique.

Les effets produits par les cornets acoustiques sont dus à plusieurs causes. La surface du pavillon étant plus grande que l'ouverture qui s'engage dans l'oreille, les ondes sonores qui pénètrent dans l'instrument se transmettent à des tranches d'air de plus en plus petites et le son acquiert ainsi une intensité croissante. De plus, la colonne d'air que contient le cornet vibre à l'unisson du son et le renforce. Ce renforcement ne se produit pas également pour tous les sons : au milieu d'un bruit confus, un certain son, dont la hauteur dépend des dimensions du cornet, est plus renforcé que les autres et les domine fortement.

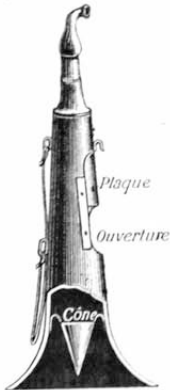


Fig. 17. — Acoustèle de Daguin.



Fig. 18. — Stéthoscope amplificateur du Dr Boudet.

intérieure des ondes sonores sur sa base. — Cet appareil permet d'entendre de très loin la parole et les plus faibles bruits.

Enfin, on peut rattacher aux cornets acoustiques les stéthos-

*scopes*, les *phonendoscopes*, etc., petits instruments très employés en médecine pour étudier les mouvements du cœur, les bruits de la respiration, des muscles, etc. Ils ont des dispositions très variées. Les stéthoscopes les plus simples consistent en un tuyau de bois ou d'ébonite dont une extrémité est disposée de manière à pouvoir s'adapter à l'oreille et dont l'autre, plus ou moins évasée, s'applique sur les parties à ausculter. Dans le stéthoscope amplificateur du Dr Boudet (*fig. 18*), les vibrations à étudier sont recueillies par un bouton explorateur et amplifiées par une membrane mince d'ébonite M qui les transmet à l'oreille par l'intermédiaire de l'air contenu dans l'appareil. Ce stéthoscope est tellement sensible qu'il permet d'entendre le bruit des muscles à l'état de contraction avec l'audition bi-auriculaire.

#### DÉTERMINATION DE LA HAUTEUR D'UN SON

**13. Principe des méthodes employées.** — Nous avons vu que la hauteur d'un son dépend du nombre de vibrations exécutées pendant une seconde par le corps sonore. Plus les vibrations sont rapides, plus le son est *aigu*. Deux méthodes permettent de compter le nombre de vibrations correspondant à un son donné : ce sont la méthode graphique et la méthode acoustique.

La *méthode graphique* est la plus simple et la plus précise. Le corps sonore, armé d'une pointe, inscrit lui-même ses vibrations sur un cylindre tournant recouvert de noir de fumée.

La *méthode acoustique* est une méthode indirecte fondée sur l'emploi des *sirènes*. Les sirènes sont de petits appareils auxquels on peut faire rendre des sons variables et qui permettent de calculer dans chaque cas le nombre des vibrations exécutées pendant un temps déterminé. D'après cela, si l'on met une sirène à l'unisson avec le son à étudier, elle fera connaître directement le nombre de vibrations accomplies par le son.

**14. Méthode graphique.** — On applique la méthode graphique à l'aide du vibroscope de Duhamel ou des cylindres enregistreurs.

**Vibroscope de Duhamel.** — Il se compose d'un cylindre

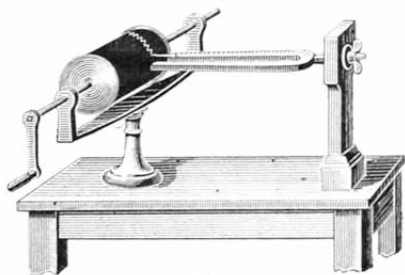


Fig. 19. — Vibroscope de Duhamel.

horizontal que l'on peut faire tourner autour de son axe à l'aide d'une manivelle (fig. 19). La partie antérieure de l'axe est filetée et s'engage dans un écrou fixe, ce qui permet au cylindre

de se déplacer dans le sens de l'axe en même temps qu'il tourne autour de cet axe.

**INSCRIPTION DES VIBRATIONS D'UN DIAPASON.** — Soit d'abord à enregistrer les vibrations d'un diapason. On recouvre le cylindre d'une feuille de papier et on le fait tourner au-dessus d'une flamme alimentée par de l'essence de térébenthine. Le papier s'enduit d'une couche mince et non adhérente de noir de fumée. On ramène alors le cylindre à l'une des extrémités de sa course. — Le diapason qui doit inscrire ses vibrations a été muni sur l'une de ses branches, à l'aide d'un peu de cire, d'un *style* léger, tel qu'un poil de brosse ou une pointe fine en laiton très mince. On dispose ce diapason de telle sorte que le style appuie légèrement sur la surface du cylindre.

Supposons maintenant que le cylindre tourne et se déplace dans le sens de son axe sans que le diapason vibre ; le style enlève le noir de fumée suivant une hélice. Mais si l'on frotte l'une des branches du diapason avec un

archet de manière à le faire vibrer parallèlement à l'axe du cylindre, l'hélice tracée est *sinueuse* et chaque sinuosité correspond à une vibration complète.

MESURE DU NOMBRE DES VIBRATIONS. — Si la vitesse de rotation du cylindre était constante et connue, il suffirait de compter les sinuosités correspondant à un tour du cylindre, par exemple, pour en déduire le nombre de vibrations par seconde. Comme il n'en est pas ainsi, il faut, si l'on veut obtenir la hauteur d'un son, comparer le mouvement vibratoire qui correspond à ce son avec un mouvement vibratoire connu. Pour cela, on fait vibrer simultanément devant le cylindre le corps sonore à étudier (diapason, verge, lame élastique, etc.) et un diapason dont le nombre de vibrations par seconde est connu, tous deux munis d'un style. Les deux styles tracent sur le cylindre deux hélices sinueuses parallèles. L'expérience terminée,

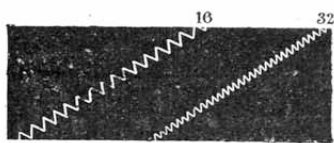


Fig. 20. — Comparaison des sinuosités correspondant à deux sons de hauteur différente.

on déroule la feuille de papier (*fig. 20*), puis on compte les sinuosités des deux hélices tracées dans le même temps. Supposons que le diapason de comparaison soit le diapason normal, qui donne  $435^{\text{vib}}$  complètes par seconde. Si le corps sonore étudié a inscrit  $120^{\text{vib}}$ , par exemple, dans la largeur de la feuille déroulée, largeur qui correspond à un tour complet du cylindre, et le diapason 90, le nombre de vibrations complètes exécutées en une seconde par le corps sonore sera égal à  $435 \times \frac{120}{90}$ , soit 580.

Cylindres enregistreurs. — Bien que le vibroscope de Duhamel soit, en réalité, un cylindre enregistreur, on donne

plus spécialement ce nom aux cylindres mus par un mouvement d'horlogerie (*fig. 21*) et destinés aux recherches de précision. Ces cylindres n'ont pas de mouvement dans le sens de l'axe, ce qui oblige à déplacer les appareils inscripteurs après chaque tour, si l'observation doit porter sur

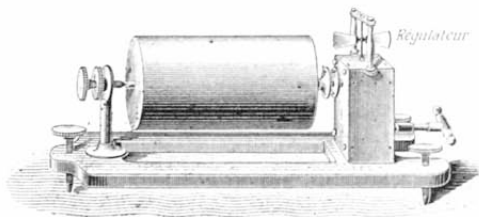


Fig. 21. — Cylindre enregistreur de Verdin.

plusieurs tours. Ils sont très employés dans les recherches médicales et physiologiques (étude des battements du poulx, des mouvements du cœur, des contractions des muscles, etc.).

Pour déterminer la hauteur d'un son avec un cylindre enregistreur, on fait vibrer le corps sonore muni d'un style devant le cylindre et on compte les sinuosités comprises dans un tour du cylindre. Supposons que l'on en compte 120 et que le cylindre fasse deux tours par seconde; le nombre de vibrations complètes exécutées en une seconde par le corps étudié est 240.

**15. Applications de la méthode graphique.** — L'enregistrement des vibrations des corps sonores a trouvé des applications très intéressantes dans les phonographes et les graphophones.

**Phonographes.** — Le phonographe est un appareil qui permet d'inscrire les vibrations de la voix et d'utiliser ensuite le tracé obtenu pour reproduire les vibrations inscrites. Il a été imaginé en 1878 par l'ingénieur américain Edison.

La figure 22 représente le phonographe primitif. Il se compose d'un cylindre horizontal auquel on peut communiquer à la fois un mouvement de rotation et un mou-

vement de translation dans le sens de l'axe, comme dans

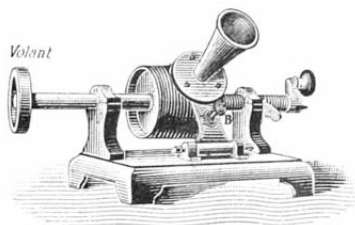


Fig. 22. — Phonographe primitif d'Edison.

avant du cylindre se trouve un

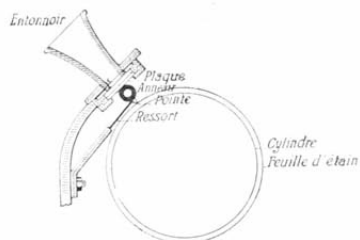


Fig. 23. — Coupe transversale schématique du phonographe primitif.

entonnnoir, dont l'extrémité rétrécie est fermée par une plaque très mince d'acier trempé. Cette plaque vibre quand on parle dans l'entonnnoir, et elle transmet ses vibrations, par l'intermédiaire d'un anneau de caoutchouc, à une petite pointe d'acier supportée par un ressort flexible (fig. 23).

Pour se servir du phonographe, on dispose l'entonnnoir de manière que la pointe d'acier rase la feuille d'étain en un point où celle-ci recouvre la rainure, puis on parle à haute voix dans l'entonnnoir, en ayant soin de faire tourner en même temps le cylindre d'un mouvement aussi uniforme que possible. La pointe d'acier, mise en mouvement par la plaque vibrante, appuie plus ou moins sur la feuille d'étain tout le long de la rainure ; elle forme sur cette feuille une sorte de gaufrage, c'est-à-dire une série de petites dépressions dont la profondeur dépend de

le vibroscope de Duhamel (14). Le cylindre présente sur sa surface une rainure en forme d'hélice, de même pas que la vis taillée sur l'axe ; il est recouvert d'une feuille mince de papier d'étain. Enfin en avant du cylindre se trouve un

l'amplitude des vibrations correspondantes. — Quand la phrase est terminée, on relève l'appareil vibrant à l'aide du bouton B et on tourne la manivelle en sens inverse jusqu'à ce qu'on ait ramené le cylindre à sa position initiale. L'entonnoir étant alors rapproché du cylindre et la pointe disposée comme au début de l'expérience, on remet le cylindre en mouvement avec la même vitesse que pendant l'inscription, autant que possible. La pointe d'acier suit les dépressions et les saillies de la feuille d'étain; elle rend par conséquent à la plaque vibrante toutes les impulsions qu'elle en avait reçues. La plaque ébranle l'air à son tour, de sorte que la phrase prononcée devant l'entonnoir se trouve reproduite, quoique d'une façon affaiblie et avec un timbre un peu différent.

Le phonographe primitif n'est plus usité que comme phonographe de démonstration. Il est très difficile d'imprimer au cylindre une vitesse de rotation constante, et cela malgré la présence d'un lourd volant à l'extrémité de l'axe. Or si la vitesse pendant la reproduction n'est pas la même que pendant l'inscription, le rapport des hauteurs des sons se trouve plus ou moins altéré. Pour une phrase qui a été parlée, l'inconvénient est peu grave; le ton de reproduction est plus élevé quand la vitesse de rotation est augmentée; il est plus bas quand cette vitesse est diminuée. Mais si la phrase a été chantée, ces variations dans la hauteur des sons successifs peuvent produire à l'oreille des sensations désagréables.

PHONOGRAPHE ACTUELS. — Dans les phonographes actuels, les vibrations s'inscrivent sur des manchons faits d'une cire fort dure et pouvant s'emboîter très exactement sur un cylindre de cuivre qui reçoit un mouvement de rotation uniforme d'un moteur.

La figure 24 représente le phonographe modèle 1897, construit par la C<sup>ie</sup> américaine du phonographe Edison. L'appareil est composé de deux parties. À gauche est un *moteur électrique*, à droite le *phonographe* proprement dit. Le moteur est enfermé dans la boîte de bois qui sert de socle à l'appareil; on voit sur le dessus de la boîte les organes de transmission,

le régulateur de vitesse, et enfin une vis V qui permet de régler la vitesse à volonté. L'axe du cylindre CC' sur lequel est enfilé le manchon M porte sur son prolongement un filet de

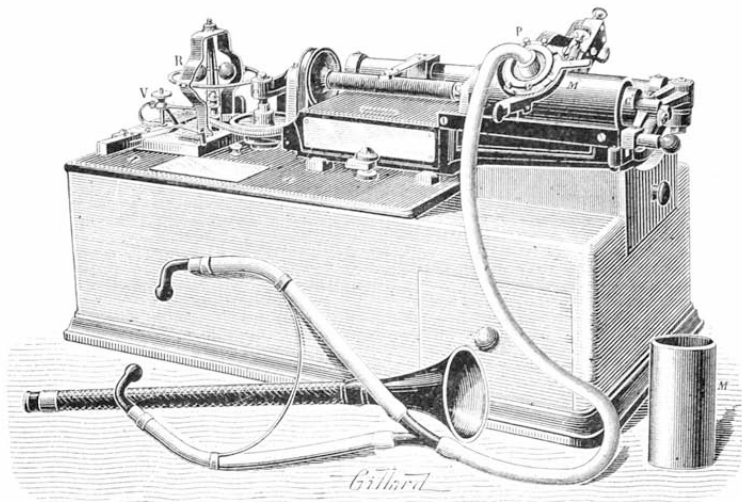


Fig. 24. — Phonographe modèle 1897 de la C<sup>e</sup> américaine Edison.

vis dont le pas est de  $\frac{1}{4}$  de millimètre. A l'extrémité de cette vis se trouve la poulie qui reçoit le mouvement du moteur et le communique au cylindre par l'intermédiaire d'une courroie.

Dans la pièce P se trouve encadrée une plaque de cristal très mince (*diaphragme*), au centre de laquelle sont adaptées deux pointes en saphir blanc. L'une de ces pointes est à tête tranchante pour l'enregistrement des sons : c'est le *style enregistreur*, l'autre est une pointe mousse destinée à leur reproduction : c'est le *style reproducteur* (fig. 25). Ces deux pointes pivotent sur un poids mobile qui les force à suivre exactement toutes les sinuosités des trous du manchon ; elles sont saisies de

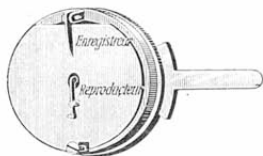


Fig. 25. — Diaphragme automatique du phonographe.

telle façon au diaphragme qu'une seule peut toucher à la fois la surface du manchon.



Pour enregistrer les sons, on adapte un porte-voix sur la pièce P, et on parle d'une voix forte et distincte devant le pavillon.

Sous l'influence des ondes sonores, la plaque vibre ; le style inscripteur étant solidaire de la plaque, sa pointe répète ses vibrations et les grave sur la cire du manchon en rotation. On obtient ainsi un *phonogramme* qui peut être séparé du cylindre de cuivre et conservé indéfiniment.

Pour régénérer les sons inscrits sur le manchon de cire, on amène la tête ronde du style reproducteur en contact avec la surface du manchon, puis on remplace le porte-voix par un tube acoustique à une ou plusieurs branches et on met en marche le moteur électrique avec la même vitesse qu'il avait lors de l'inscription. La tête du style reproducteur pénètre dans les petits trous présentés par la surface du manchon. Comme ce style passe par toutes les positions qu'avait prises le style inscripteur, la membrane reproduit les mêmes vibrations que pendant l'inscription.

Un manchon de cire peut prendre de 600 à 900 mots. Si l'on veut prendre un autre phonogramme avec un manchon qui a déjà servi, on en gratte la surface avec un couteau tranchant, dont une vis micrométrique règle la lame de manière à enlever exactement l'épaisseur voulue.

USAGES DU PHONOGRAPHE. — Le phonographe est une source d'amusements très variés. Toutes les voix peuvent y être rendues ; les tons les plus harmonieux de la musique, le rire, les cris de guerre des sauvages, les babils de perroquets, etc. y sont reproduits distinctement. Il présente en outre une foule d'applications pratiques : il sert de sténographe ; il sert à donner des évidences légales, comme déclarations testamentaires, témoignages, etc., à améliorer l'élocution dans l'enseignement des langues, à enseigner la musique, etc.

**Graphophones.** — Les graphophones sont des appareils analogues aux phonographes, mais de construction beaucoup plus simple, ce qui les rend moins coûteux et permet de s'en servir plus facilement.

La figure 26 représente le graphophone modèle 1897 (*Haut-parleur*) construit par MM. Pathé frères. Le moteur électrique est remplacé par un mouvement d'horlogerie dont on peut régler la vitesse à l'aide d'une vis. Le manchon destiné à recueillir l'inscription est en carton recouvert de cire. Le

système enregistreur (*recorder*) est constitué essentiellement par une plaque vibrante en mica munie en son centre d'un

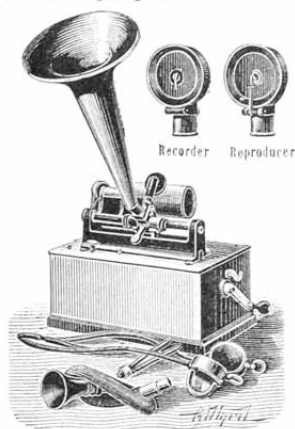


Fig. 26. — Graphophone perfectionné de MM. Pathé frères.

style à tête tranchante. Quand on veut reproduire ce qui a été enregistré, on substitue au recorder un système répéteur (*reproducer*). Ce dernier diffère du recorder en ce que la petite pointe mousse qui doit reposer sur le manchon n'est pas au centre de la plaque vibrante, mais se trouve reportée sur le côté et est reliée au centre par un levier. Au chariot sur lequel on ajoute le recorder ou le reproducteur, suivant les cas, s'ajustent soit le pavillon devant lequel on parle, soit le cornet destiné à faire entendre la parole ou le chant à toute une salle, ou si l'on préfère un tube mince de caoutchouc muni d'écouteurs récepteurs téléphoniques pour audition individuelle.

Les graphophones servent à donner des auditions théâtrales ; ils s'emploient de plus en plus, concurremment avec le téléphone et la machine à écrire, pour la correspondance dans les maisons de commerce, les bureaux, etc.

**16. Méthode acoustique.** — La sirène classique est la sirène imaginée par Cagniard de Latour en 1819 (*fig. 27*).

**Description.** — Elle se compose d'une boîte cylindrique en laiton dont la base inférieure est munie d'un tuyau *porte-vent* que l'on adapte sur une soufflerie. La base supérieure, appelée *table*, est plane et polie ; elle est percée d'ouvertures équidistantes et disposées sur une même circonférence. Au-dessus de la table et à une très petite distance se trouve un disque horizontal mobile autour d'un axe vertical reposant sur le centre de la table. Ce disque porte des ouvertures en nombre égal à celles de la table, et

distribuées exactement de la même manière, en sorte que

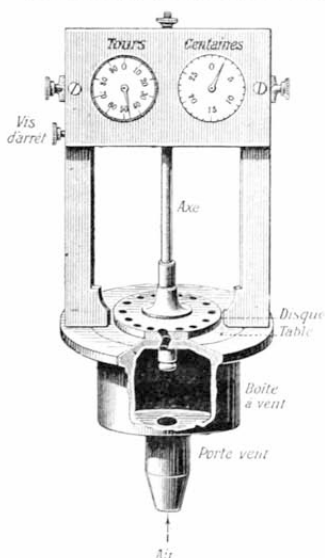


Fig. 27. — Sirène de Cagniard de Latour.

toutes les ouvertures de la table se trouvent bouchées à la fois ou libres à la fois, suivant que la rotation du disque amène sur elles les intervalles pleins qui séparent ses ouvertures ou les ouvertures elles-mêmes. Enfin un compteur placé à la partie supérieure de l'appareil indique le nombre de tours accomplis par le disque.

Le compteur de tours comprend deux petites roues dentées et une vis sans fin portée par l'axe de rotation (fig. 28). La vis engrène avec la roue R, dont la circonférence a 100 dents, et la fait

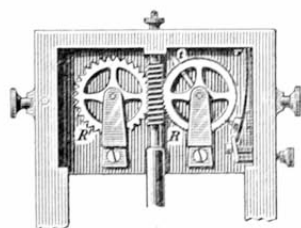


Fig. 28. — Compteur de tours.

avance d'une dent pour chaque tour complet du disque. La roue R porte sur son axe un petit taquet en saillie  $t$ , qui, à chaque tour de la roue, fait avancer d'une dent la roue R'. Deux aiguilles fixées aux axes des roues R et R' se meuvent sur deux cadrans extérieurs et indiquent, l'une, le nombre des tours du disque, l'autre, les centaines de tours. Comme il est utile, quand on se sert de la sirène, de ne compter les tours qu'à un moment donné, la plaque métallique sur laquelle les deux roues sont fixées par leurs axes est munie de deux boutons latéraux qu'il suffit de pousser pour engrener la roue R avec la vis sans fin ou pour la désengrener d'avec cette vis.

**Fonctionnement.** — Les ouvertures de la table et du disque, au lieu d'être percées normalement, sont inclinées à  $45^\circ$  et dans des sens opposés, dans un plan perpendiculaire au rayon (*fig. 29*).

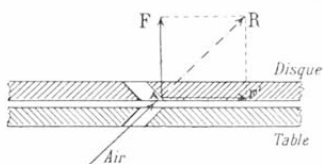


Fig. 29. — Décomposition de la pression exercée par l'air comprimé.

D'après cela, quand toutes les ouvertures sont en coïncidence, l'air comprimé qui pénètre dans la boîte et se précipite par une ouverture de la table vient frapper à angle droit la paroi de l'ouverture superposée. La pression qui en résulte peut se décomposer en deux : une composante verticale  $AF$ , qui tend à soulever le disque et reste sans effet, et une composante horizontale  $AF'$ , tangente à la circonférence que peut décrire une ouverture dans le mouvement du disque. Celui-ci tourne donc sous l'effet des composantes horizontales et de même direction qui se produisent aux diverses ouvertures.

Comme ces composantes se reproduisent chaque fois que les ouvertures sont en coïncidence, la vitesse de rotation, pour une force élastique donnée de l'air venant de la soufflerie, augmente d'abord; mais les frottements tendant sans cesse à la diminuer, elle finit par devenir constante. Il en est ainsi quand l'accroissement de vitesse provenant du courant d'air est compensé exactement par la résistance due aux frottements. Si la force élastique de l'air venant de la soufflerie augmente progressivement, les impulsions communiquées aux ouvertures du disque deviennent de plus en plus fortes et la vitesse constante que finit par prendre le disque est d'autant plus grande que cette force élastique est plus considérable.

Voyons maintenant comment se produisent les sons dans la sirène. Au moment où une ouverture de la table coïn-

cide avec une ouverture du disque, l'air venant de la soufflerie traverse l'ouverture du disque et refoule l'air extérieur ; mais par suite de la rotation du disque, le plein qui se trouve entre deux ouvertures consécutives supprimant presque aussitôt le passage de l'air, l'air extérieur qui a été comprimé reprend son volume primitif. Cette compression et cette dilatation successives de l'air extérieur constituent une vibration complète.

Supposons d'abord qu'il n'y ait qu'une seule ouverture dans la table et 20 dans le disque. Pendant un tour du disque, l'ouverture de la table sera 20 fois libre et 20 fois bouchée, et il se produira 20 vibrations complètes de l'air extérieur. Supposons maintenant, comme cela a lieu en réalité, que la table porte 20 ouvertures comme le disque. Le courant d'air traversera ces 20 ouvertures à la fois, ce qui imprimera à l'air extérieur des compressions plus fortes et augmentera par suite notablement l'intensité du son, mais la hauteur n'aura pas changé et il n'y aura toujours que 20 vibrations complètes de l'air extérieur pour chaque tour du disque. Lorsque le disque a une vitesse suffisante, les vibrations donnent naissance à un son dont la hauteur augmente avec la vitesse de rotation. La sirène est donc capable de rendre des sons qui montent par nuances insensibles depuis le plus grave jusqu'au plus aigu.

**Mesure du nombre des vibrations d'un son.** — Pour déterminer la hauteur d'un son avec la sirène, on lance l'air de la soufflerie (\*) par le tuyau porte-vent (fig. 30) et

---

(\*) La soufflerie sert à insuffler de l'air comprimé dans la sirène et dans les tuyaux sonores. Elle se compose essentiellement d'un soufflet qui fonctionne à l'aide d'une pédale. L'air est refoulé dans un réservoir à parois latérales très flexibles, et passe ensuite dans une

on fait varier la force élastique de l'air jusqu'à ce que le son rendu par la sirène soit de même hauteur que le son à étudier, ce dont on juge à l'oreille. On pousse alors simultanément le bouton d'un chronomètre à secondes et le bouton qui engrène la roue R avec la vis sans fin. Les deux sons ayant été maintenus à l'unisson pendant 20 à

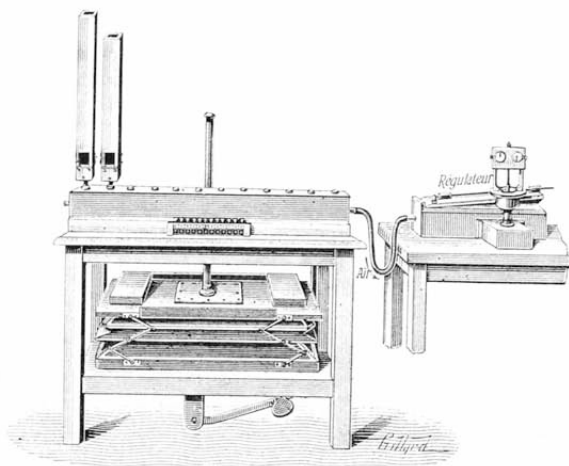


Fig 30. - Adaptation de la sirène à une soufflerie.

30 secondes, on pousse à la fois le bouton du chronomètre et le bouton qui désengrène la roue R d'avec la vis et arrête le fonctionnement du compteur de tours. Soient  $t$  le

---

boite appelée *sommier*. Cette boîte porte une rangée d'ouvertures munies de soupapes à ressort que l'on fait ouvrir en appuyant sur des touches. Un système de boutons à vis permet de baisser plus ou moins les touches et de régler le débit de chaque ouverture. On augmente la vitesse du vent en chargeant de masses plus ou moins fortes la partie supérieure du réservoir. Lorsqu'on veut faire fonctionner une sirène, on fait passer le vent dans un *régulateur* à soufflet avant de le lancer dans la boîte de la sirène; en déplaçant convenablement des masses sur la partie supérieure du régulateur, on fait varier à volonté la force élastique de l'air dans la sirène.

temps, évalué en secondes, donné par le chronomètre pour la durée de l'expérience,  $u$  le nombre de divisions indiquées par l'aiguille du cadran des tours,  $c$  celui indiqué par l'aiguille du cadran des centaines de tours,  $n$  le nombre des ouvertures du disque : le nombre des tours du disque est  $100c + u$ , et le nombre des vibrations complètes  $(100c + u)n$ . Le nombre des vibrations exécutées en une seconde par le corps sonore ou, autrement dit, la hauteur du son sera

$$\frac{(100c + u)n}{t}$$

**Sirènes de précision.** — La petite sirène de Cagniard de Latour est presque abandonnée aujourd'hui. Elle a le grand inconvénient d'exiger un courant d'air de force élastique constante pendant toute la durée de l'expérience, ce que l'on n'obtient pas avec les souffleries ordinaires, malgré l'emploi des régulateurs à soufflet. Il est dès lors difficile de maintenir à l'unisson pendant un temps suffisant le son de la sirène et le son à étudier pour avoir exactement la hauteur de ce dernier.

Dans les sirènes actuelles (sirènes de Bourbouze, d'Helmholtz), la vitesse de rotation du disque est rendue constante par l'emploi de régulateurs électromagnétiques dont nous verrons plus tard le principe. On peut ainsi entretenir assez longtemps un son déterminé sans qu'il s'élève, ce qui atténue l'influence des causes d'erreur communes à toutes les sirènes : incertitude sur le nombre exact de vibrations parce que le mouvement des aiguilles n'indique pas les fractions de tour du disque, perturbation qui se produit dans le mouvement de rotation au moment où l'on engrène, etc.

M. Pellat a établi récemment une sirène dont le principe est différent de celui des sirènes précédentes : les ouvertures sont normales à la table et au disque et le mouvement de ce dernier est produit par un moteur électrique. On peut ainsi maintenir à volonté une vitesse uniforme et déterminée. Dans cette sirène, la hauteur du son est absolument indépendante de la force élastique de l'air envoyé dans le porte-vent, l'intensité seule varié.

REMARQUE. — Si l'on fait arriver un courant d'eau sous

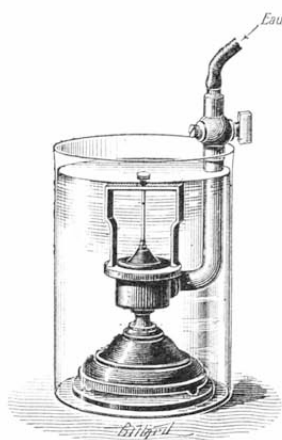


Fig. 31. — Sirène hydraulique.

pression dans la boîte d'une sirène ordinaire complètement plongée dans l'eau, la sirène chante dans l'eau, ce qui lui a fait donner son nom. On constate en même temps qu'elle donne le même son dans l'eau que dans l'air à vitesse égale, ce qui montre que la hauteur d'un son déterminé résulte du nombre de vibrations et ne dépend pas de la nature du corps sonore. Les sirènes avec lesquelles on fait ordinairement ces expériences présentent quelques détails de construction qui les rendent plus résistantes que les sirènes ordinaires; on les appelle des *sirènes hydrauliques* (fig. 31).

**17. Limites des sons perceptibles.** — Un mouvement vibratoire transmis à l'oreille n'entraîne la perception d'un son que s'il est compris entre certaines limites. Les limites généralement admises sont 8 et 23 000 vibrations complètes par seconde; elles varient d'une personne à une autre, surtout la limite des sons aigus. Lorsque le nombre des vibrations est inférieur à 8, l'oreille ne perçoit qu'une sorte de ronflement, sans aucun caractère musical; lorsqu'il est supérieur à 23 000, l'oreille cesse de percevoir aucun son. Il est à remarquer que bien au-dessous de cette dernière limite, l'impression produite sur l'oreille est désagréable, presque douloureuse; aussi les sons les plus aigus employés en musique ne dépassent-ils guère 4 100 vibrations complètes par seconde.

## RÉSUMÉ DU CHAPITRE II

Toutes choses égales d'ailleurs, l'intensité d'un son ne dépend que



de l'amplitude du mouvement vibratoire correspondant ; elle augmente avec cette amplitude. Pour une amplitude déterminée, l'intensité varie en raison inverse du carré de la distance au corps sonore ; elle est plus ou moins augmentée par le voisinage ou le contact d'autres corps sonores. La conservation de l'intensité du son dans les tuyaux trouve son application dans les tubes acoustiques. Les porte-voix et les cornets acoustiques sont des applications du renforcement des sons par les tuyaux.

La hauteur d'un son ne dépendant que du nombre des vibrations exécutées pendant une seconde par le corps sonore, il suffit, pour le déterminer, de compter ce nombre de vibrations. Deux méthodes sont employées pour cela : la méthode graphique et la méthode acoustique.

Dans la *méthode graphique*, le corps sonore, muni d'un style léger, inscrit lui-même ses vibrations sous forme de sinuosités sur un cylindre tournant recouvert de noir de fumée. Habituellement un diapason dont le nombre de vibrations par seconde est connu inscrit son mouvement vibratoire en même temps sur le cylindre. En comptant ensuite les sinuosités tracées par les deux corps sonores pendant le même temps, on obtient par une simple proportion la hauteur du son rendu par le corps sonore étudié. Le phonographe est une application de l'inscription graphique des vibrations des corps sonores.

La *méthode acoustique* est fondée sur l'emploi des sirènes. Ce sont de petits appareils munis d'un compteur de vibrations et auxquels on peut faire rendre des sons déterminés. En comprimant plus ou moins l'air qui pénètre dans une sirène, on arrive à lui faire rendre un son de même hauteur que le son à étudier, et c'est la sirène elle-même qui indique le nombre de vibrations accomplies par ce dernier. La sirène classique est celle de Cagniard de Latour. Elle se compose essentiellement d'une boîte à vent, d'une table percée de trous inclinés à  $45^\circ$  et d'un disque mobile percé de trous correspondant aux précédents mais inclinés en sens inverse. Le disque est mis en mouvement par l'air venant d'une soufflerie et, suivant que les ouvertures de la table et du disque sont ou non en coïncidence, le passage de l'air se fait librement ou est interrompu ; de là des vibrations. Ces vibrations donnent naissance à un son, qui est d'autant plus aigu que la vitesse de rotation du disque est plus considérable.

## EXERCICES SUR LE CHAPITRE II

5. Le disque d'une sirène est percé de 18 ouvertures et fait 120 tours en 20 secondes. Quelle est la hauteur du son produit dans ces conditions ?

6. Une sirène rend un son correspondant à  $217^{\text{vib}},5$  par seconde. On demande le nombre des tours du disque par seconde, sachant que ce disque a 24 ouvertures.



# OPTIQUE

---

## CHAPITRE III

### PROPAGATION DE LA LUMIÈRE EN GÉNÉRAL

---

**18. Définitions.** — La partie interne de l'œil est tapissée par une membrane sensible, la *rétine*, résultant de l'épanouissement du nerf optique. Quelle que soit l'excitation reçue par cette membrane, elle ne transmet au cerveau que des *sensations lumineuses*. On donne le nom de *lumière* à la cause qui provoque habituellement ces sensations, et celui d'*Optique* à la branche de la Physique qui a pour objet l'étude des phénomènes produits par la lumière.

On appelle *corps lumineux*, en général, tout corps capable d'impressionner la rétine à distance. Parmi les corps lumineux, les uns impressionnent la rétine par eux-mêmes ; tels sont le soleil, les flammes, les corps incandescents. On les appelle spécialement des *sources lumineuses*. Les autres sont visibles parce qu'ils renvoient sur la rétine une partie de la lumière qu'ils reçoivent. Ce sont des *corps éclairés* ou des sources secondaires. La lune, les planètes et la plupart des objets qui nous entourent sont des corps éclairés.

On dit qu'un corps est *transparent* lorsqu'il se laisse

traverser par la lumière qui le frappe, et permet de distinguer nettement la forme des objets placés derrière lui. Une lame de verre polie sur ses deux faces est un corps transparent. — Les corps transparents sont incolores ou colorés, suivant qu'ils laissent passer également toutes les couleurs ou qu'ils ne laissent passer que des couleurs déterminées.

Un corps est *opaque* s'il intercepte complètement la lumière et ne permet pas de distinguer les corps lumineux placés derrière lui. Le bois, le carton, les métaux sous une épaisseur suffisante, etc., sont des corps opaques.

Enfin les corps *translucides* sont intermédiaires entre les corps transparents et les corps opaques. Ils se laissent traverser par la lumière d'une source lumineuse, mais ils ne permettent pas de distinguer les formes et les distances des objets placés derrière eux. Comme exemples de corps translucides, on peut citer une lame de verre dépoli, une feuille de papier huilé.

**19. Nature de la lumière.** — L'analogie que présentent entre eux certains phénomènes sonores et lumineux a conduit à assimiler la production et la propagation de la lumière à la production et à la propagation du son. Dans cette hypothèse, appelée *hypothèse des ondulations*, les corps lumineux, de même que les corps sonores, sont le siège de mouvements vibratoires très rapides, qui se transmettent jusqu'à la rétine par l'intermédiaire d'un milieu élastique. Comme la lumière traverse le vide, ce que ne fait pas le son, on est obligé d'admettre l'existence d'un milieu impondérable répandu partout, dans le vide comme dans l'air, et pénétrant tous les corps. Ce milieu hypothétique, qui propage ainsi le mouvement vibratoire donnant naissance à la lumière, a reçu le nom d'*ether*.

La vitesse de propagation des vibrations lumineuses est beaucoup plus grande que celle des vibrations sonores; elle est d'environ 300 000<sup>km</sup> par seconde. Malgré cette énorme vitesse de propagation, les vibrations lumineuses sont tel-

lement rapides que leur *longueur d'onde*, c'est-à-dire l'espace parcouru par le mouvement vibratoire pendant la durée d'une vibration, est excessivement petite. Ainsi, tandis que les vibrations sonores correspondant aux sons perceptibles ne dépassent guère 23 000 par seconde, les vibrations lumineuses qui produisent la lumière rouge sont au nombre d'environ 430 trillions et celles qui produisent la lumière violette au nombre de 700 trillions, ce qui donne pour les longueurs d'onde évaluées en millièmes de millimètres, 0,697 pour le rouge et 0,428 pour le violet. A chaque couleur correspond un nombre déterminé de vibrations; on peut donc comparer la couleur à la hauteur en Acoustique. Quant à l'intensité de la lumière, elle augmente, comme l'intensité d'un son, avec l'amplitude des vibrations de la source lumineuse.

**20. Divisions de l'Optique.** — L'Optique comprend deux parties : l'optique géométrique et l'optique physique.

L'*optique géométrique* est consacrée à l'étude des phénomènes lumineux les plus simples, tels que la réflexion de la lumière par les corps polis. Cette étude se fait en partant de quelques lois expérimentales, sans qu'il y ait lieu de se préoccuper de la nature de la lumière. Elle est basée sur des considérations géométriques.

L'*optique physique* ne fait pas partie des connaissances élémentaires. Elle a pour but d'étudier une série de phénomènes plus ou moins complexes que l'on ne peut expliquer qu'en émettant une hypothèse sur la nature de la lumière. — L'hypothèse des ondulations, dont nous avons parlé plus haut, permet seule d'expliquer tous les phénomènes se rattachant à l'optique physique; aussi est-elle exclusivement adoptée aujourd'hui.

#### PRINCIPE DE LA PROPAGATION

**21. Énoncé et vérification.** — Dans tout milieu transparent et homogène, la lumière se propage en ligne droite.

Pour vérifier ce principe, on dispose sur la droite OA qui joint à l'œil un point A d'une flamme (*fig. 32*), trois

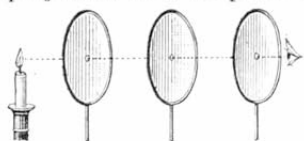


Fig. 32. — Vérification de la propagation rectiligne de la lumière.

écrans opaques percés chacun d'une petite ouverture; l'œil n'aperçoit le point A que si les trois ouvertures sont exactement sur la droite OA. — D'autre part,

on peut remarquer que, si la lumière solaire pénètre dans une chambre obscure par une petite ouverture, elle éclaire sur son passage les poussières en suspension dans l'air, et ce passage est ainsi marqué par un cône lumineux très allongé, à contours parfaitement rectilignes.

**22. Rayons et faisceaux lumineux.** — On appelle *rayon lumineux* toute direction suivant laquelle la lumière se propage. Ainsi, dans la figure 32, la droite OA, représentant la route suivie par la lumière partant du point A pour arriver à l'œil, est un rayon lumineux. Comme le point A est visible, quelle que soit, autour de ce point, la position des écrans, — pourvu que les ouvertures, l'œil et le point A soient sur une même droite, — il passe toujours par ces ouvertures un rayon lumineux. On en conclut qu'un point lumineux envoie des rayons lumineux dans toutes les directions.

On appelle *faisceau lumineux* un ensemble de rayons lumineux. Dans un milieu homogène, les rayons issus d'un même point lumineux vont toujours en s'écartant les uns des autres et ne peuvent former que des faisceaux coniques, ou, comme on dit, des faisceaux *divergents*. Si la source lumineuse est très éloignée, comme cela a lieu pour le soleil et les étoiles, l'angle de divergence des

rayons extrêmes d'un faisceau qui en est issu est excessivement petit et les rayons qui forment ce faisceau peuvent être considérés comme *parallèles*. Enfin un faisceau composé de rayons parallèles ou un faisceau divergent peuvent, par leur passage à travers certains milieux transparents, être transformés en un ensemble de rayons qui tendent à se réunir vers un point peu éloigné : cet ensemble de rayons constitue un faisceau *convergent*.

**23. Conséquences du principe de la propagation.** — Le principe de la propagation de la lumière est la base de l'optique géométrique. Ses deux conséquences immédiates sont la théorie géométrique des ombres portées par les corps opaques et la théorie des images données par les petites ouvertures.

**24. Théorie géométrique des ombres.** — Lorsqu'un corps opaque est placé devant une source lumineuse, il arrête tous les rayons qui le rencontrent et laisse derrière lui un certain espace où la lumière ne pénètre pas : cet espace s'appelle l'*ombre portée* par le corps opaque. Deux cas sont à considérer, celui d'une source lumineuse réduite à un point, et celui d'une source dont les dimensions ne sont plus négligeables.

**I. Ombre produite par un point lumineux.** — Soit S un point lumineux au-devant duquel est placé un corps opaque que nous supposerons sphérique (*fig. 33*). Menons par le point lumineux une droite indéfinie ST tangente à la sphère opaque, et faisons-la mouvoir autour de la sphère, de manière qu'elle lui reste tangente tout en passant constamment par le point S : cette droite décrit un cône tangent à la surface de la sphère opaque. Tout point tel que P, situé à l'intérieur de ce cône, au-delà de la sphère opaque,

est dans l'ombre, car le rayon lumineux SA qui peut lui arriver est intercepté. Au contraire, tout point tel que P',

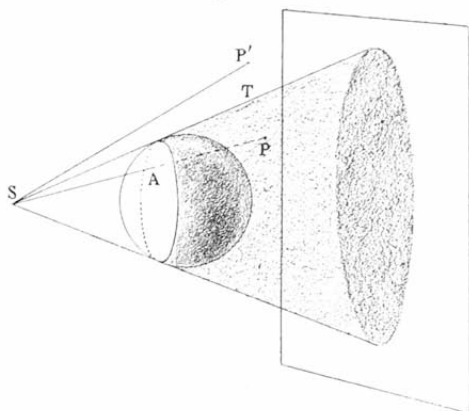


Fig. 33. — Ombre produite par un point lumineux.

situé en dehors du cône, reçoit un rayon lumineux SP' et se trouve éclairé. La portion de la surface du cône située derrière la sphère opaque sépare donc les points qui reçoivent de la lumière du point S de ceux qui n'en reçoivent pas. Si l'on coupe cette surface par un écran, l'ombre portée sur l'écran est une surface limitée par une courbe qui est, en général, une ellipse et marque un passage brusque de l'ombre à la lumière. — Quant à la limite de l'ombre du côté de la source lumineuse, elle est marquée par la circonférence de contact du cône tangent à la sphère opaque, circonférence qui divise cette sphère en deux parties, l'une éclairée, l'autre obscure.

**II. Ombre produite par une source lumineuse ordinaire.** — Si la source lumineuse a des dimensions sensibles, ce qui est le cas ordinaire, le passage de l'ombre à la lumière ne se fait plus brusquement ; il existe autour de l'ombre une région, appelée *pénombre*, qui n'est éclairée que par une portion de la source. Cette région forme une transition entre l'ombre et la partie éclairée par tous les points de la source.



Le cas le plus simple au point de vue géométrique est celui où la source lumineuse et le corps opaque sont tous deux sphériques.

Soient  $S$  une sphère lumineuse et  $S'$  une sphère opaque (*fig. 34*). Construisons le cône  $MOM'$  tangent extérieurement aux deux sphères. Tous les points situés dans ce cône, au-delà de la sphère opaque, ne peuvent recevoir de lumière d'aucun des points de la sphère lumineuse ; ils

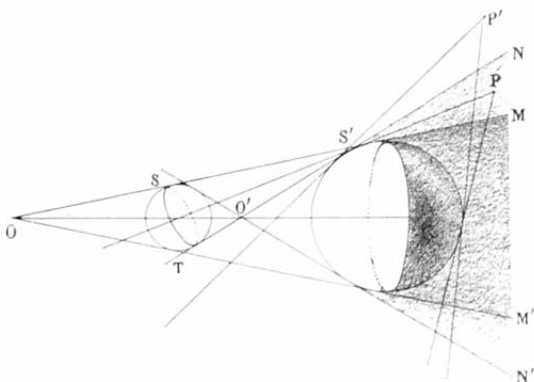


Fig. 34. — Ombre et pénombre dans le cas de deux sphères inégales ( $S < S'$ ).

sont donc dans l'*ombre*. Faisons maintenant tourner autour de la ligne des centres la tangente commune intérieure  $NT$  de manière à construire le cône  $NO'N'$  circonscrit intérieurement aux deux sphères, et considérons un point  $P$  situé dans l'intervalle des deux cônes. Si, du point  $P$  comme sommet, on décrit un cône tangent à la sphère opaque, la portion de la sphère lumineuse contenue dans ce cône n'éclairera pas le point  $P$ , et ce point, recevant moins de lumière que si la sphère opaque n'existait pas, sera dans la *pénombre*. D'après cela, la portion de la sphère  $S$  qui éclaire un point situé dans l'espace compris

entre les surfaces des deux cônes  $MOM'$  et  $NON'$  (au-delà de la sphère opaque), est d'autant plus faible que ce point est plus voisin de l'ombre. Cet espace constitue la pénombre. — Considérons enfin un point  $P'$  en dehors de la surface du cône  $NON'$  ; il est complètement éclairé, car le cône décrit tangentielllement à la sphère opaque de ce point comme sommet ne rencontre pas la sphère lumineuse et, par suite, tout rayon issu d'un point quelconque de la source parvient à  $P'$ .

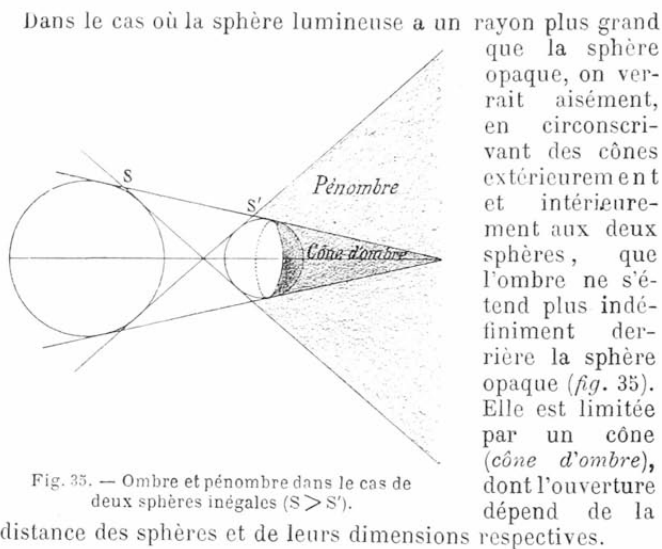


Fig. 35. — Ombre et pénombre dans le cas de deux sphères inégales ( $S > S'$ ).

Elle est limitée par un cône (cône d'ombre), dont l'ouverture dépend de la distance des sphères et de leurs dimensions respectives.

On peut constater nettement la production de l'ombre et de la pénombre en prenant comme source lumineuse la flamme d'un bec de gaz ou d'une bougie, et comme corps opaque un disque en carton épais que l'on tient verticalement à une certaine distance d'un grand écran blanc, ou, à défaut, de l'un des murs de la salle d'expé-

riences (\*). — On distingue sur l'écran trois régions (*fig. 36*): une région centrale complètement obscure, de même forme que le disque; autour de cette ombre, une pénombre, où l'intensité lumineuse décroît progressivement à

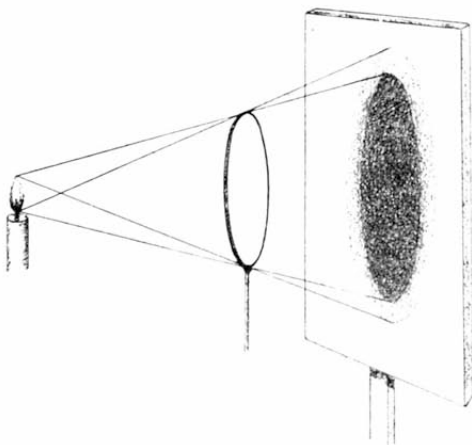


Fig. 36. — Manière de constater l'ombre et la pénombre dans une salle d'expériences.

mesure qu'on s'éloigne de l'ombre; enfin, en dehors de ces deux régions, une région éclairée par la flamme tout entière. — Si l'on rapproche peu à peu le disque du mur, l'épaisseur de la pénombre interceptée sur l'écran va toujours en diminuant.

**Applications.** — L'explication des éclipses de soleil et des éclipses de lune est une conséquence directe de la théorie générale des ombres. En géométrie descriptive, la détermination des ombres sur les dessins en perspective facilite l'intelligence du dessin en faisant mieux sentir le relief des objets représentés. La hauteur d'un édifice éclairé par

(\*) La salle ne doit être éclairée que par la source lumineuse.

le soleil peut être déterminée approximativement en mesurant la longueur de l'ombre portée et en la comparant à la longueur de l'ombre portée par une règle verticale de hauteur connue. Enfin la mesure des hauteurs des montagnes de la lune se déduit également de l'observation de leurs ombres.

**25. Images données par les petites ouvertures.** — Si par une petite ouverture pratiquée dans un des volets d'une chambre obscure, on laisse pénétrer dans la chambre les rayons lumineux venant de l'extérieur, on voit se peindre les images des objets extérieurs sur un écran blanc disposé en face de l'ouverture. Ces images conservent les couleurs des objets représentés ; elles sont *renversées* et leur forme est *indépendante* de celle de l'ouverture.

Considérons, en effet, un point A d'un objet rectiligne lumineux AB (*fig. 37*).

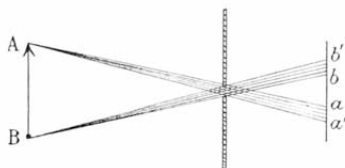


Fig. 37. — Explication des images données par les petites ouvertures.

lumineux AB (*fig. 37*). L'ensemble des rayons issus de ce point et pénétrant dans la chambre forme un faisceau divergent étroit qui éclaire sur l'écran une petite surface

$aa'$  de forme semblable à celle de l'ouverture. A chacun des points de l'objet AB correspond une petite surface éclairée analogue. — Or, si l'ouverture est assez petite et si l'objet est assez éloigné, les faisceaux issus des différents points de l'objet se réduisent sensiblement à leur axe, et chacune des petites surfaces éclairées correspondantes peut être assimilée à un point. L'ensemble de ces points reproduira donc la forme et l'apparence de l'objet. D'après cela,

l'image est d'autant plus nette que l'objet est plus éloigné et que l'ouverture est plus petite.

Les considérations précédentes donnent l'explication des ronds lumineux que l'on voit sur le sol à l'ombre d'un arbre éclairé par le soleil. Ces images sont produites par les faisceaux lumineux qui passent à travers les petits interstices des feuilles; leur forme est circulaire ou elliptique suivant que les rayons solaires ont une direction perpendiculaire ou oblique par rapport au sol. En cas d'éclipse partielle, elles acquièrent la forme de croissant comme le soleil lui-même, et cela quelle que soit également, entre les feuilles, la forme des ouvertures à travers lesquelles passe la lumière solaire.

REMARQUE. — Les reproductions des objets extérieurs par une petite ouverture dans une chambre obscure ne constituent pas des images, dans le sens propre attribué à ce mot en Optique (34). Ce sont simplement des *projections*. Comme elles sont toujours plus ou moins confuses, on n'utilise pas ce phénomène directement pour dessiner des objets. On augmente les dimensions de l'ouverture et on y place une lentille : on obtient alors sur la paroi opposée de véritables images, qui sont beaucoup plus éclairées et bien plus nettes que s'il n'y avait pas de lentille. L'appareil ainsi construit porte le nom de *chambre noire* (106).

26. *Vitesse de la lumière.* — La lumière se propage, comme le son, d'un *mouvement uniforme*, mais sa vitesse de propagation est incomparablement plus grande. Tandis que le son ne parcourt qu'environ 340<sup>m</sup> par seconde dans l'air, la vitesse de la lumière dans le même milieu est sensiblement égale à 300 000<sup>km</sup>, de telle sorte qu'elle mettrait à peine  $\frac{1}{7}$  de seconde pour faire le tour de la terre. C'est pour cette raison que l'on peut considérer la propagation de la lumière comme instantanée entre deux lieux

quelconques à la surface de la terre, ainsi qu'on l'a fait à propos de la mesure de la vitesse du son (7).

La vitesse de propagation de la lumière a été déterminée par deux méthodes bien différentes : la méthode astronomique et la méthode physique.

La méthode astronomique, employée par l'astronome danois Rømer (1676) et par Bradley (1728), est fondée sur l'observation et l'interprétation judicieuses de phénomènes astronomiques. Dans cette méthode, on mesure la vitesse de la lumière sur des distances très grandes et connues, comme le diamètre de l'orbite terrestre (environ 300 millions de kilomètres).

La méthode physique, moins ancienne, donne la mesure exacte de temps très courts, ce qui permet d'opérer sur des distances relativement faibles. Fizeau (1839) opérait sur des distances de quelques kilomètres. Foucault (1850 à 1862) employa une disposition particulière d'expériences qui lui permit de mesurer la vitesse de la lumière sur un espace de quelques mètres seulement. Comme les résultats obtenus par Foucault ont eu une influence capitale sur l'adoption de la théorie des ondulations, nous indiquerons le principe de la méthode qu'il a employée, après avoir étudié toutefois les propriétés des miroirs et des lentilles.

REMARQUE. — La lumière ne se propage pas avec la même vitesse dans les différents milieux homogènes transparents. Si l'on représente par  $v$  la vitesse de propagation dans le vide, vitesse qui est très sensiblement la même que dans l'air, la vitesse de propagation dans l'eau distillée est représentée par  $0,75$  (soit les  $\frac{3}{4}$ ), et la vitesse dans le verre léger (crown-glass) par  $0,654$  (soit environ les  $\frac{2}{3}$ ). De plus, dans les milieux transparents solides ou liquides, la vitesse n'est pas tout à fait la même pour les diverses couleurs, tandis que dans le vide elle ne dépend pas de la couleur. Les vitesses indiquées ci-dessus dans l'eau et dans le verre ne s'appliquent qu'aux rayons jaunes.

### RÉSUMÉ DU CHAPITRE III

La lumière est la cause qui provoque habituellement les sensa-

tions lumineuses, seules sensations que puisse recevoir la rétine. Parmi les corps lumineux, les uns impressionnent la rétine directement (sources lumineuses) ; les autres (corps éclairés) reçoivent de la lumière d'une source lumineuse et la renvoient en partie sur la rétine.

Un corps est dit *transparent* lorsqu'il permet de distinguer les objets placés derrière lui. Il est *opaque* s'il intercepte complètement la lumière. Les corps *translucides* sont intermédiaires entre les corps lumineux et les corps opaques.

Dans tout milieu homogène, la lumière se propage en ligne droite. Ce principe se vérifie en observant la pénétration de la lumière solaire dans une chambre obscure par une petite ouverture.

Toute direction suivant laquelle la lumière se propage est un *rayon* lumineux. Un ensemble de rayons issus d'un même point est un *faisceau*. Les rayons qui constituent un faisceau peuvent être divergents, ou considérés comme parallèles, ou enfin rendus convergents par une lentille ou un miroir concave.

La théorie géométrique des *ombres* est une conséquence immédiate du principe de la propagation. Si la source est réduite à un point, l'ombre portée par une sphère opaque est limitée brusquement derrière la sphère par la surface d'un cône ayant pour sommet le point lumineux et tangent à la sphère opaque. Si les dimensions de la source ne sont pas négligeables, le passage de l'ombre à la lumière ne se fait plus brusquement ; l'ombre portée par le corps opaque est entourée d'une pénombre plus ou moins étendue, qui forme une transition insensible entre l'ombre et la région éclairée complètement.

La théorie des ombres permet d'expliquer le phénomène des éclipses.

Lorsqu'une petite ouverture est faite dans une paroi d'une chambre obscure, on voit se peindre sur un écran placé derrière l'ouverture les images renversées des objets extérieurs. Ces images ont une forme indépendante de celle de l'ouverture ; elles sont d'autant plus nettes que les objets sont plus éloignés et que l'ouverture est plus petite.

La lumière se propage d'un mouvement uniforme. Cette propagation n'est pas instantanée, mais elle se fait avec une vitesse très considérable, environ  $300.000^{\text{m}}$  par seconde dans l'air.

### EXERCICES SUR LE CHAPITRE III

7. Etablir la théorie géométrique des ombres dans le cas où le corps opaque et la source lumineuse sont deux sphères égales.

8. Sachant que l'ombre portée par une règle verticale de  $4^{\text{m}},50$  de hauteur est de  $95^{\text{cm}}$ , quelle est la hauteur d'un édifice voisin dont l'ombre portée a une longueur de  $38^{\text{m}}$  ?

9. On fait arriver les rayons du soleil par une ouverture pratiquée dans l'une des parois d'une chambre obscure. A  $2^m$  de l'ouverture on dispose un écran de manière qu'il reçoive les rayons normalement.

En supposant d'abord que l'ouverture est réduite à un point, puis qu'elle est constituée par une fente de  $1^{cm}$  de longueur, quel sera dans chaque cas le diamètre de l'image circulaire obtenue? Les rayons qui viennent des bords extrêmes du soleil forment entre eux un angle égal à  $32'$ .

## CHAPITRE IV

### ÉTUDE DE LA RÉFLEXION. — MIROIRS PLANS

27. **Définitions.** — Lorsqu'on dispose un bain de mercure sur le trajet d'un faisceau de rayons solaires de manière que les rayons rencontrent obliquement la surface

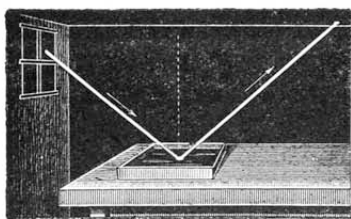


Fig. 38. — Phénomène de la réflexion régulière.

du mercure, le faisceau change de direction et est renvoyé en avant du mercure (*fig. 38*); on dit que les rayons qui le composent se sont *réfléchis régulièrement*.

Ce phénomène est général : tout rayon lumineux qui rencontre la surface d'un corps opaque parfaitement poli, est renvoyé en avant du corps poli dans une direction déterminée.

Soit  $MM'$  une surface plane réfléchissante (*fig. 39*). On appelle *rayon incident* une direction rectiligne telle que  $SI$  suivant laquelle la lumière tombe sur  $MM'$ , et *rayon*



*réfléchi* la nouvelle direction IR suivie par SI après sa

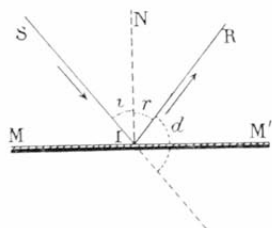


Fig. 39. — Réflexion d'un rayon lumineux.

rayon réfléchi avec la normale est l'*angle de réflexion*.

Menons la normale IN au point d'incidence I. Elle détermine avec le rayon incident un plan qui est perpendiculaire à la surface réfléchissante : c'est le *plan d'incidence*. L'angle que fait le rayon incident avec la normale est l'*angle d'incidence* ; l'angle du

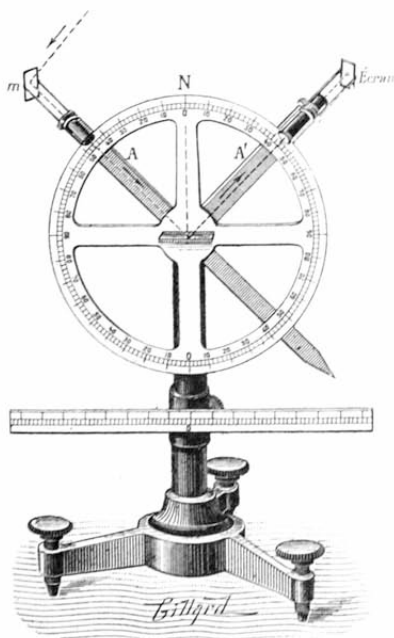


Fig. 40. — Appareil de Silbermann.

### 28. Lois de la réflexion régulière. —

La réflexion régulière est soumise aux deux lois suivantes :

1<sup>re</sup> Loi. — Le plan d'incidence contient le rayon réfléchi.

2<sup>e</sup> Loi. — L'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence.

Vérification. — On vérifie *approximativement* ces lois à l'aide de l'appareil de Silbermann (fig. 40). Il se compose d'un cercle vertical gradué, fixé à une colonne reposant sur un tré-

pied à vis calantes. Au centre du cercle et perpendiculairement à son plan se trouve un miroir métallique plan et poli. Deux règles ou *alidades* A et A', disposées comme deux rayons du cercle gradué, sont mobiles autour de son centre ; chacune d'elles porte un tube, fermé à ses extrémités par des plaques percées en leur milieu d'une petite ouverture.

Enfin le tube de l'alidade A est surmonté d'un petit miroir plan auxiliaire *m*, et le tube de l'alidade A' d'un petit écran de verre dépoli présentant en son milieu un point de repère situé dans le prolongement de l'axe du tube.

On reçoit sur le miroir auxiliaire les rayons solaires et on oriente ce miroir de manière que la lumière soit renvoyée suivant l'axe de l'alidade A. Le faisceau ainsi obtenu vient frapper le miroir au centre du limbe et se réfléchit. On fait ensuite varier la position de l'alidade A' jusqu'à ce que le faisceau réfléchi suive l'axe du tube correspondant et forme sur l'écran dépoli une petite tache lumineuse dont le point de repère occupe le centre. A ce moment les deux alidades font des angles égaux avec le diamètre vertical du cercle gradué, ce qui démontre la deuxième loi de la réflexion. Quant à la première loi, elle se trouve également démontrée, car les axes des deux tubes étant à la même distance du plan du cercle, le rayon incident et le rayon réfléchi sont dans un même plan vertical qui contient la normale au point d'incidence.

Les lois de la réflexion se vérifient d'une manière beaucoup plus précise par une méthode fondée sur des observations astronomiques. Du reste, leur application aux miroirs fournit des résultats qui sont toujours confirmés par l'expérience. C'est là une vérification indirecte de l'exactitude de ces lois.

**29. Conséquences des lois de la réflexion.** — Il résulte des lois de la réflexion régulière que si IR est une direction rectiligne suivant laquelle la lumière rencontre la surface polie, le rayon réfléchi sera IS (*fig. 39*); c'est le principe du *retour inverse* ou de la *réversibilité* des rayons lumineux dans la réflexion.

D'un autre côté, l'angle d'incidence variant de 0 à 90°, il en est de même de l'angle de réflexion. Quand  $i = 0$ , l'incidence est dite *normale*; alors  $r = 0$ , et le rayon incident se réfléchit sur lui-même. A mesure que  $i$  augmente,  $r$  augmente également, mais le rayon incident et le rayon réfléchi sont toujours situés de part et d'autre de la normale. Enfin, quand  $i = 90^\circ$ , l'incidence est dite *rasante*,  $r = 90^\circ$ , et les deux rayons sont dans le prolongement l'un de l'autre.

**REMARQUES.** — 1° La déviation que subit le rayon incident en se réfléchissant est l'angle  $d$  (*fig. 39*), angle qui est égal à  $180^\circ - (i + r)$  ou  $180^\circ - 2i$ . Cette déviation, égale à  $180^\circ$  quand l'incidence est normale, décroît à mesure que  $i$  augmente et devient nulle pour une incidence de  $90^\circ$ .

2° La quantité de lumière réfléchie ne représente jamais la totalité de la lumière incidente correspondante. Si la surface polie appartient à un corps opaque, comme nous l'avons supposé jusqu'ici, une faible partie seulement de la lumière incidente est absorbée par le corps opaque à une petite distance de sa surface, et la quantité de lumière ainsi absorbée reste sensiblement la même, quelle que soit l'incidence. Si la surface polie appartient au contraire à un corps transparent, comme le verre, l'eau, etc., la quantité de lumière réfléchie correspondant à une même quantité de lumière incidente varie considérablement avec l'incidence et elle est d'autant plus grande que l'incidence est plus grande. La lumière qui n'est pas réfléchie régulièrement pénètre dans le milieu transparent en se *réfractant* (55).

**30. Réflexion irrégulière ou diffusion.** — Quand la lumière, au lieu de rencontrer une surface parfaitement

polie, tombe sur une surface mate, comme celle d'un mur, elle se réfléchit sur les nombreuses aspérités très petites que présente une telle surface, et elle est renvoyée dans une foule de directions qui sont quelconques par rapport à l'ancienne. On donne à ce phénomène le nom de *réflexion irrégulière* ou de *diffusion*.

La diffusion des rayons lumineux à la surface d'un corps est d'autant plus grande que le poli de cette surface est moins parfait; elle est très faible, par exemple, sur la surface des métaux bien polis, de l'eau, du verre, des glaces étamées. Elle varie aussi avec la nature du corps, avec sa couleur et avec l'incidence des rayons.

C'est la diffusion qui nous fait distinguer la surface des corps qui n'émettent pas de lumière par eux-mêmes. Ainsi, une glace parfaitement polie, placée dans un lieu éclairé, n'est visible pour un observateur qui la regarde en face, que si la surface de la glace contient des poussières capables de diffuser une partie de la lumière qu'elle reçoit. Si l'on voit latéralement un faisceau de rayons solaires qui a pénétré dans une chambre obscure par une petite ouverture, c'est grâce à la présence de poussières en suspension dans l'air; sans ces poussières, un observateur ne verrait le faisceau qu'en plaçant l'œil dans son prolongement.

#### MIROIRS PLANS

**31. Définition.** — On donne le nom de *miroir plan* à toute surface plane réfléchissante. Des plans métalliques présentant un poli aussi parfait que possible, la surface d'un bain de mercure, sont des miroirs plans.

Nous étudierons successivement la réflexion des faisceaux divergents, des faisceaux de rayons parallèles et des faisceaux convergents.

**32. Réflexion des faisceaux divergents.** — *Lorsqu'un faisceau divergent rencontre un miroir plan, le faisceau réfléchi est lui-même divergent. Le sommet du faisceau*

réfléchi est situé derrière le miroir en un point symétrique par rapport au miroir du sommet du faisceau incident.

I. Cas d'un point lumineux. — Considérons d'abord un point S, lumineux ou éclairé, placé au-dessus d'un miroir

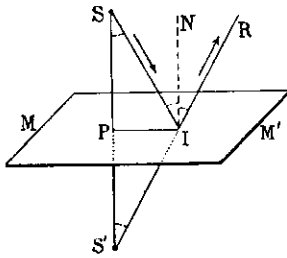


Fig. 41. — Image d'un point lumineux dans un miroir plan.

plan  $MM'$  (fig. 41); tous les rayons issus de ce point et rencontrant le miroir forment un faisceau de lumière divergente. Soient  $SI$  un rayon quelconque appartenant à ce faisceau,  $IN$  la normale au point d'incidence,  $IR$  le rayon réfléchi. Du point  $S$  abaissons la perpendiculaire  $SP$  et pro-

longeons-la derrière le miroir. Le plan d'incidence  $SIN$  contient la perpendiculaire  $SP$ , qui est parallèle à  $IN$ ; d'après la première loi de la réflexion, il contient aussi le rayon réfléchi  $IR$ . Par suite, le prolongement de ce rayon  $IR$  rencontre nécessairement, en un certain point  $S'$ , le prolongement de la perpendiculaire  $SP$ .

Joignons les points  $P$  et  $I$ . Nous formons ainsi deux triangles rectangles  $ISP$  et  $IS'P$  égaux. En effet, le côté  $IP$  est commun et les angles en  $S$  et en  $S'$  sont égaux comme étant, le premier, égal à l'angle d'incidence, le second, égal à l'angle de réflexion. Il en résulte que les côtés  $SP$  et  $S'P$  sont égaux. D'après cela, le point de rencontre  $S'$  de la perpendiculaire  $SP$  et du rayon réfléchi prolongé est symétrique du point lumineux  $S$  par rapport au miroir.

Ce que nous venons de dire pour le rayon  $SI$  peut se répéter pour un rayon quelconque appartenant au faisceau divergent qui tombe sur le miroir; donc les prolonge-

ments de tous les rayons réfléchis se coupent au même point  $S'$ . C'est de ce point que semble partir le faisceau divergent réfléchi correspondant au faisceau incident.

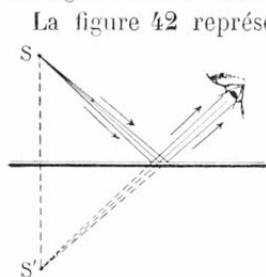


Fig. 42. — Marche d'un faisceau divergent tombant sur un miroir plan.

La figure 42 représente la marche d'une portion du faisceau divergent qui tombe sur le miroir, en prenant comme plan de la figure un plan mené par le point  $S$  perpendiculairement au miroir. On voit ainsi que, si l'œil est disposé de manière à recevoir un certain nombre de rayons réfléchis correspondant à cette portion, ils lui paraîtront émaner du point  $S'$ . Le point  $S'$  s'appelle l'*image* du point  $S$ .

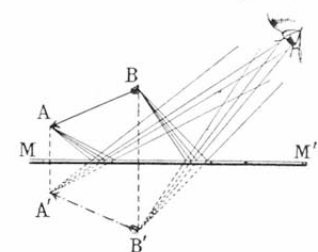


Fig. 43. — Construction de l'image d'un objet placé devant un miroir plan.

Cette image, n'étant formée que par les prolongements géométriques des rayons réfléchis et non par les rayons réfléchis eux-mêmes, n'existe pas réellement dans l'espace et ne peut être reçue sur un écran : on dit que c'est une image *virtuelle*.

II. Cas d'un objet lumineux. — Considérons maintenant un objet rectiligne  $AB$ , placé devant un miroir plan. En répétant pour tous les points de l'objet la construction géométrique que nous venons de faire pour un point lumineux, nous obtiendrions une image *virtuelle*, *symétrique* de l'objet. La figure 43 représente la marche des rayons qui, émis par les points  $A$  et  $B$ , concourent pour l'œil à la production des points  $A'$  et  $B'$ , dans un plan mené par  $AB$  perpendiculairement au miroir.

Le point  $S'$  s'appelle l'*image* du point  $S$ . Cette image, n'étant formée que par les prolongements géométriques des rayons réfléchis et non par les rayons réfléchis eux-mêmes, n'existe pas réellement dans l'espace et ne peut être reçue sur un écran : on dit que c'est une image *virtuelle*.

II. Cas d'un objet lumineux. — Considérons maintenant un objet rectiligne  $AB$ , placé devant un miroir plan. En répétant pour tous les points de l'objet la construction géométrique que nous venons de faire pour un point lumineux, nous obtiendrions une image *virtuelle*, *symétrique* de l'objet. La figure 43 représente la marche des rayons qui, émis par les points  $A$  et  $B$ , concourent pour l'œil à la production des points  $A'$  et  $B'$ , dans un plan mené par  $AB$  perpendiculairement au miroir.

En général, un objet de forme quelconque placé devant un miroir plan donne une image *virtuelle*, de *même grandeur* que l'objet. Cette image est *symétrique* de l'objet par rapport à la surface réfléchissante, mais elle lui est rarement superposable. C'est ainsi, par exemple, que la main droite placée devant une glace d'appartement donne une image qui paraît représenter la main gauche.

**VÉRIFICATION.** — On peut vérifier facilement les propriétés que nous venons d'établir pour les miroirs plans. Devant

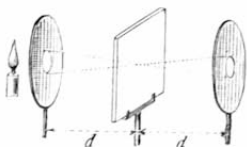


Fig. 44. — Vérification de la symétrie et de l'égalité de l'objet et de son image.

une glace transparente, disposée verticalement (fig. 44), on place d'un côté un écran muni d'un disque translucide en papier mince ou en verre dépoli; de l'autre côté, et dans une position symétrique, un second écran dans lequel on a découpé préalablement une ouverture de même rayon que le disque.

On éclaire alors le disque et on constate que son image s'encadre exactement dans l'ouverture du second écran.

Voici une autre vérification, moins précise, mais de forme plus séduisante. De part et d'autre d'une glace transparente on dispose symétriquement deux bougies de même longueur et on allume celle qui est en avant de la glace: la flamme donne par réflexion une image virtuelle qui se superpose à la mèche de la bougie placée derrière la glace et fait ainsi paraître cette bougie allumée.

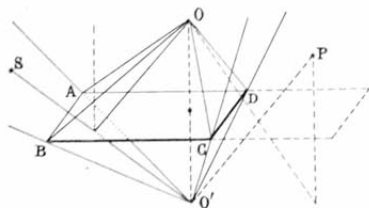


Fig. 45. — Champ d'un miroir plan.

**III. Champ d'un miroir plan.** — On appelle champ d'un miroir plan, pour une position déterminée de l'œil, la partie de l'espace qui est vi-

sible après réflexion sur le miroir.

Soit  $O$  la position de l'œil devant un miroir plan rectangulaire (*fig. 45*). Tous les rayons réfléchis reçus par l'œil sont compris dans une pyramide  $OABCD$  ayant le miroir pour base et le point  $O$  pour sommet. Les rayons incidents correspondants prolongés, sont compris dans une pyramide ayant également le miroir pour base et pour sommet le point  $O'$ , symétrique de  $O$ . Par suite, un point lumineux  $S$ , pour être vu, devra être dans l'angle polyèdre  $O'$ . Tout point  $P$  situé à l'extérieur de cet angle est caché, car aucun rayon partant de ce point et rencontrant le miroir n'arrive à l'œil après réflexion. — A mesure que l'œil se rapproche du miroir, le champ augmente.

**33. Réflexion d'un faisceau de rayons parallèles.** — *Tout faisceau de rayons parallèles rencontrant un miroir plan donne naissance à un faisceau réfléchi composé lui-même de rayons parallèles.*

Considérons un point lumineux suffisamment éloigné pour que les rayons qui en émanent puissent être considérés comme sensiblement parallèles, et soient  $SI$ ,  $S'I'$

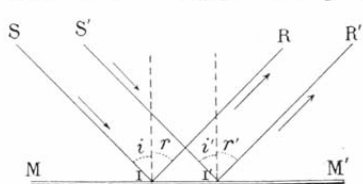


Fig. 46. — Réflexion de deux rayons parallèles.

deux de ces rayons rencontrant un miroir plan (*fig. 46*). Prenons leur plan commun d'incidence pour plan de la figure. Au rayon  $SI$  correspond un rayon réfléchi  $IR$  tel que l'on ait  $r = i$ ;

au rayon  $S'I'$  correspond un rayon réfléchi  $I'R'$  tel que l'on ait  $r' = i'$ . Les normales aux points d'incidence  $I$  et  $I'$  étant parallèles comme perpendiculaires à un même plan, l'angle  $i'$  est égal à l'angle  $i$ ; donc l'angle  $r'$  est aussi égal à l'angle  $r$ , et les deux rayons réfléchis sont parallèles entre eux comme l'étaient les rayons incidents.

**34. Réflexion d'un faisceau convergent.** — Lorsqu'un



miroir plan reçoit des rayons convergents (22), le faisceau réfléchi est également formé de rayons convergents, et le sommet de ce faisceau est symétrique, par rapport au miroir, du sommet du faisceau incident.

Interposons un miroir plan sur le trajet d'un faisceau convergent. Considérons deux rayons convergents  $SI$  et  $S'I'$  appartenant à ce faisceau et prenons toujours pour plan de la figure le plan d'incidence commun de ces deux rayons (fig. 47). Soit  $MM'$  la section du miroir par ce plan. On démontrerait, par un raisonnement

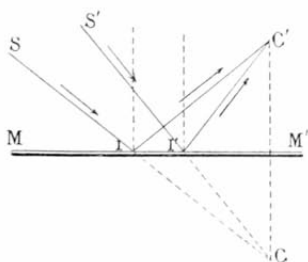


Fig. 47. — Réflexion de rayons convergents.

analogue à celui que nous avons fait pour les rayons divergents, que les rayons réfléchis correspondant aux rayons  $SI$  et  $S'I'$  iront converger en un point  $C'$ , symétrique, par rapport au miroir, du point  $C$ , auquel aboutiraient les rayons incidents si le miroir n'existait pas. Comme il en serait de même des autres rayons appartenant au faisceau convergent incident, on voit que ce faisceau reste convergent après la réflexion.

Le point  $C'$  est le point de concours de rayons lumineux réels; il se comporte exactement comme un point lumineux et peut être reçu sur un écran. C'est une image réelle.

### 35. Réflexion sur un miroir tournant. —

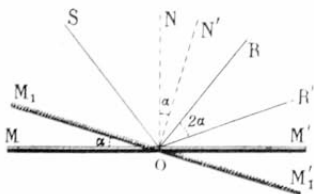


Fig. 48. — Principe du miroir tournant.

Lorsqu'un rayon lumineux fixe rencontre un miroir plan tournant autour d'un axe perpendiculaire au plan d'incidence, l'angle décrit par le rayon réfléchi est le double du déplacement angulaire donné au miroir.

Soient en effet  $MOM'$  la première position du miroir (fig. 48),  $SO$  un rayon incident de direction invariable,

passant par l'axe de rotation  $O$  du miroir,  $OR$  le rayon réfléchi correspondant. Quand le miroir tourne d'un angle  $\alpha$  et se place en  $M_1OM'_1$ , l'angle d'incidence augmente de  $\alpha$ ; le nouveau rayon réfléchi est  $OR'$ , et l'on a

$$\widehat{R'OR} = \widehat{R'OS} - \widehat{ROS} = 2(i + \alpha) - 2i = 2\alpha.$$

**Applications.** — Cette propriété des miroirs tournants est fréquemment utilisée pour amplifier et mesurer de très faibles déplacements angulaires. Foucault l'a appliquée à la détermination de la vitesse de la lumière. Enfin elle constitue le principe du *sextant*.

MESURE DES PETITS ANGLES. — Soit à mesurer l'angle très petit dont a tourné un objet autour d'un axe vertical. On fixe au support de l'objet un petit miroir plan vertical  $M$  (fig. 49), et l'on installe en avant du miroir une règle horizontale graduée  $RR'$  surmontée d'une lunette  $L$ , dont l'axe est dans la direction de la normale  $OI$  au plan du miroir.

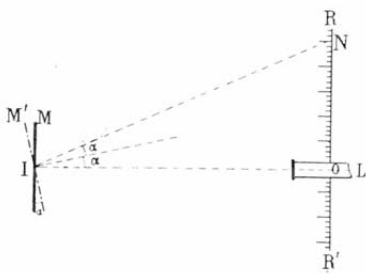


Fig. 49. — Principe de la mesure des petits angles.

Quand le miroir est parallèle à la règle, l'image du zéro de la règle coïncide avec le croisé des fils de son réticule: le rayon lumineux  $OI$  tombe alors sur le miroir sous une incidence normale et se réfléchit sur lui-même. Lorsque l'objet et le miroir ont tourné d'un angle  $\alpha$ , le rayon réfléchi  $OI$  correspond à un rayon incident  $IN$  tel que l'on ait  $\widehat{OIN} = 2\alpha$ , et l'on voit dans la lunette l'image d'une division  $N$  de la règle. Si la déviation du miroir est très petite, l'angle  $2\alpha$  est mesuré très sensiblement par le rapport  $\frac{ON}{OI}$ .

Cette méthode, dont nous verrons plus tard la disposition pratique, est surtout employée pour amplifier et mesurer les déviations des aiguilles de galvanomètres ou d'électromètres.

SEXTANT. — Le sextant est un instrument très employé

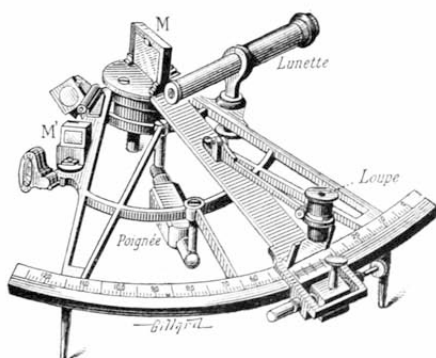


Fig. 50. — Sextant (modèle de la Marine).

d'un limbe dont l'ouverture est d'environ  $75^\circ$ . Le miroir M est fixé sur un disque mobile entraîné par une alidade. Le miroir M' est fixe ; sa moitié inférieure seule est étamée et sert à renvoyer dans la lunette les rayons déjà réfléchis par M ; sa moitié supérieure permet d'apercevoir directement, à l'aide de la lunette, l'un des deux astres, A par exemple.

Considérons l'alidade au zéro de la graduation ; les deux miroirs sont alors parallèles. Les deux rayons AO et AO' (fig. 51), issus du point A, peuvent être considérés comme parallèles à cause de l'éloignement de l'astre, et la portion O'N du rayon direct AO coïncide avec le rayon deux fois réfléchi correspondant au rayon AO. Déplaçons l'alidade jusqu'à ce que l'on aperçoive en même temps dans la lunette les deux astres A

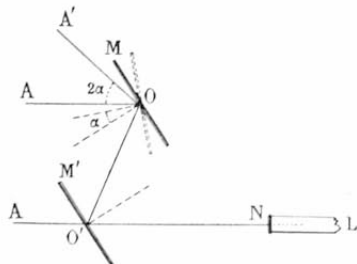


Fig. 51. — Emploi du sextant.

et A' ; le rayon O'O provient alors du rayon incident A'O issu de l'astre A'. L'angle que font les rayons provenant des deux astres est A'OA ; il est le double de l'angle dont le miroir M et, par suite, l'alidade, ont dû tourner. Le limbe

étant divisé en demi-degrés marqués comme des degrés, l'angle  $2z$  est donné directement par la lecture du limbe, lecture que l'on rend plus précise par l'emploi d'un vernier et d'une loupe.

**36. Réflexion sur deux miroirs parallèles.** — Tout point lumineux placé entre deux miroirs plans parallèles donne derrière chacun d'eux une série *indéfinie* d'images dont l'éclat va en s'affaiblissant graduellement, par suite de la perte de lumière qui accompagne chaque réflexion. Ces images sont situées toutes sur la perpendiculaire commune abaissée du point lumineux sur le miroir.

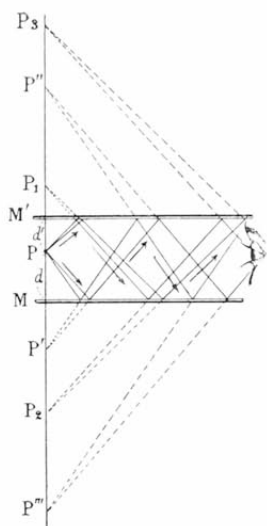


Fig. 52. — Réflexion sur deux miroirs plans parallèles.

Etudions la marche d'un petit faisceau partant du point lumineux  $P$  et tombant d'abord sur le miroir  $M$  (fig. 52). Ce faisceau se réfléchit et diverge ensuite comme s'il était issu d'un point  $P'$  symétrique de  $P$  par rapport à  $M$ ; il rencontre alors le miroir  $M'$  et diverge après réflexion comme s'il était issu d'un point  $P''$  symétrique de  $P'$  par rapport à  $M'$ ; puis il rencontre de nouveau  $M$  et diverge après réflexion comme s'il était issu d'un point  $P'''$  symétrique de  $P''$  par rapport à  $M$ , et ainsi de suite indéfiniment.

Nous obtiendrions de même une seconde série d'images  $P_1, P_2, P_3, \dots$  en considérant un faisceau issu de  $P$  et rencontrant d'abord le miroir  $M'$ .

Nous obtiendrions de même une seconde série d'images  $P_1, P_2, P_3, \dots$  en considérant un faisceau issu de  $P$  et rencontrant d'abord le miroir  $M'$ .

Si l'on remplace le point lumineux  $P$  par un objet lumineux présentant une face et un revers, les images successives présenteront alternativement le revers et la face. Des images de ce genre s'observent facilement dans les salles dont les murs opposés sont recouverts de glaces.

REMARQUE. — Si l'on appelle  $d$  et  $d'$  les distances du point lumineux aux miroirs  $M$  et  $M'$ , on voit aisément que les distances à ce point des images  $P', P_2, P''', \dots$  vues par un observateur tourné vers  $M$  sont successivement

$$2d, \quad 2d + 2d', \quad 4d + 2d', \quad 4d + 4d', \quad \dots$$

Les distances au point  $P$  des images  $P_1, P'', P_3, \dots$  vues par un observateur tourné vers  $M'$  sont successivement

$$2d', \quad 2d' + 2d, \quad 4d' + 2d, \quad 4d' + 4d, \quad \dots$$

De telle sorte que deux images consécutives situées derrière  $M$  ou derrière  $M'$  sont alternativement à la distance  $2d$  et  $2d'$ .

**37. Réflexion sur deux miroirs inclinés.** — Lorsqu'un point lumineux est placé entre deux miroirs inclinés, il donne naissance à une série *limitée* d'images. Ces images sont en nombre variable avec l'inclinaison des miroirs ;

elles sont toutes situées sur une circonférence passant par le point lumineux et ayant pour centre le sommet de l'angle formé par les miroirs.

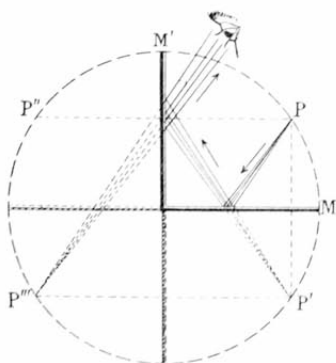


Fig. 53. — Réflexion sur deux miroirs inclinés.

Nous n'étudierons que le cas le plus simple, celui où les deux miroirs sont rectangulaires. Prenons pour plan de la figure un plan perpendiculaire à leur intersection et contenant le

point lumineux (fig. 53). Parmi les rayons issus de  $P$ ,

ceux qui se réfléchissent sur le miroir  $M$  donnent une image  $P'$ , symétrique de  $P$  par rapport à  $M$ ; ceux qui se réfléchissent sur le miroir  $M'$  donnent une image  $P''$ , symétrique de  $P$  par rapport à  $M'$ . Outre ces deux images produites par des rayons qui ont subi une seule réflexion, il se forme une image  $P'''$  produite par des rayons qui n'arrivent à l'œil de l'observateur qu'après avoir subi deux réflexions successives sur la surface des miroirs. Considérons en effet un petit faisceau issu de  $P$  et tombant d'abord sur le miroir  $M$ ; il se comporte, après sa réflexion, comme s'il émanait du point  $P'$ . Il se réfléchit ensuite sur  $M'$  et se comporte comme s'il émanait du point  $P''$ , symétrique de  $P'$  par rapport à  $M'$ . — Réciproquement, un petit faisceau qui éprouve une première réflexion sur  $M'$ , puis une seconde sur  $M$ , donnerait une image en un point symétrique de  $P''$  par rapport à  $M$ . L'angle des deux miroirs étant de  $90^\circ$ , ce point se confond avec le point  $P'''$ . Enfin les rayons qui ont subi deux réflexions successives ne peuvent plus donner d'images, car ils ne rencontrent plus les surfaces réfléchissantes.

En résumé, l'œil placé entre les deux miroirs aperçoit quatre fois le point lumineux  $P$ , une fois directement, et trois fois par réflexion.

D'une façon générale, le nombre des images augmente avec l'inclinaison des miroirs. Ainsi, il se forme cinq images si l'angle des miroirs est de  $60^\circ$ , sept s'il est de  $45^\circ$ . Toutes ces images sont *virtuelles* (32); elles cessent de se réfléchir sur l'un ou l'autre miroir lorsqu'elles tombent dans l'angle formé par les prolongements eux-mêmes des miroirs. Cet angle s'appelle le *champ mort* du miroir.

APPLICATION. — La formation d'images multiples par les miroirs inclinés est utilisée dans un petit appareil appelé *kaléidoscope*.

Le modèle le plus simple se compose d'un tube de carton dans lequel sont fixés deux miroirs inclinés à  $60^\circ$ , dont l'intersection est dirigée parallèlement à l'axe du tube. A l'une des extrémités du tube se trouvent des objets diversement colorés (fragments de verre, de dentelle, etc.). En plaçant l'œil à l'autre extrémité on aperçoit un champ circulaire brillant, formé par ces objets et leurs cinq images symétriques disposées en une sorte de rosace à six compartiments (fig. 54). On peut d'ailleurs, en faisant tourner le tube sur lui-même, modifier la position des corps colorés les uns par rapport aux autres, et transformer ainsi à volonté l'ensemble régulier qu'ils forment avec leurs images.



Fig. 54. — Dessin vu au kaléidoscope.

Le kaléidoscope est employé comme jouet d'enfant. Les dessinateurs sur tissus en font usage pour obtenir des combinaisons de dessins et de couleurs.

**38. Applications générales des miroirs plans.** — On ne se sert guère comme miroirs plans que de glaces *étamées* ou *argentées*. Elles sont formées d'une lame de verre, derrière laquelle est appliquée une couche mince d'argent ou d'amalgame d'étain. Dans ces miroirs, la réflexion est un peu compliquée, comme nous le verrons plus loin (63), par la réfraction à travers le verre; de plus, il y a deux surfaces réfléchissantes, ce qui donne des images multiples; mais, en somme, la couche métallique joue le rôle principal dans la réflexion, et elle réfléchit plus de lumière qu'un miroir métallique.

Nous avons déjà vu quelques applications des miroirs plans. On en fait, en outre, un fréquent usage dans l'économie domestique, comme *glaces d'appartement*, comme *espions*, comme *réflecteurs*. Quelques instruments de phy-

sique, tels que les *porte-lumière*, les *héliostats*, etc., contiennent des miroirs plans afin de donner à la lumière une direction déterminée. Enfin on obtient certains effets d'optique plus ou moins curieux en disposant convenablement plusieurs miroirs plans (*miroirs magiques*, *lunettes magiques*, etc.).

Les *espions*, très employés dans les pays du Nord, sont des miroirs plans que l'on peut orienter à volonté de manière à voir dans une direction déterminée. On en fait usage pour surveiller les étalages, l'intérieur des magasins ; pour voir de l'intérieur d'une pièce ce qui se passe à l'extérieur, etc. — Les *réflecteurs* sont destinés à éclairer les magasins obscurs, les caves, etc. On les incline de manière qu'ils renvoient horizontalement la lumière qu'ils reçoivent verticalement d'en haut.

Le *porte-lumière* est très employé dans les cours de Physique pour renvoyer les rayons solaires dans la chambre obscure où se font les expériences d'Optique. Il se compose d'une plaque de cuivre verticale que l'on applique, avec des vis, sur une ouverture percée dans un des volets

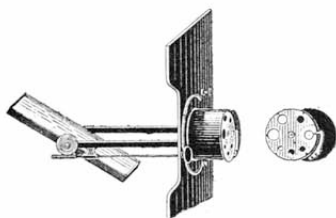


Fig. 55. — Porte-lumière fixé.

de la chambre obscure (fig. 55). Cette plaque soutient à l'extrémité une glace argentée que l'on peut mouvoir dans tous les sens à l'aide d'un bouton double ; elle porte intérieurement un cylindre muni d'un bouchon métallique creux.

La face antérieure du bouchon est percée soit d'une fente à largeur variable, soit d'ouvertures rangées par ordre de grandeur et que l'on peut amener l'une après l'autre en regard d'un trou central qu'elles réduisent à leur propre dimension.



Comme la position du soleil dans le ciel varie à chaque instant, il faut aussi à chaque instant toucher au bouton double du porte-lumière si l'on veut conserver au faisceau réfléchi une direction constante. Dans les expériences nécessitant une grande fixité du faisceau lumineux on substitue un *héliostat* au porte-lumière. Les héliostats sont des appareils assez compliqués qui, grâce à un mouvement d'horlogerie, donnent automatiquement à un faisceau de rayons solaires une direction constante pendant tout le temps que le soleil reste au-dessus de l'horizon.

Parmi les combinaisons de miroirs avec lesquelles on produit des effets d'Optique, nous citerons celle qui est appliquée dans la *lunette magique*. Cet appareil permet de



Fig. 56. — Lunette magique.

voir un objet malgré l'interposition de corps opaques. Il se compose généralement de quatre miroirs plans inclinés à  $45^\circ$  sur l'axe d'un tube ou d'une lunette

(fig. 56). Par suite de cette inclinaison, un rayon partant d'un point P arrive à l'œil de l'observateur en suivant constamment la direction du tube ou de la lunette.

## RÉSUMÉ DU CHAPITRE IV

Lorsqu'un rayon lumineux rencontre un corps opaque dont la surface est parfaitement polie, il est renvoyé en avant du corps dans une direction déterminée (rayon réfléchi). On donne le nom de *réflexion régulière* à ce phénomène. Le plan d'incidence est le plan formé par le rayon incident et la normale à la surface réfléchissante ; il contient le rayon réfléchi (1<sup>re</sup> loi de la réflexion). En outre, l'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence (2<sup>e</sup> loi). Ces lois se démontrent approximativement avec l'appareil de Silbermann.

Si la surface du corps qui reçoit la lumière n'est pas parfaitement polie, une partie plus ou moins grande de la lumière incidente est réfléchie dans des directions quelconques : on dit qu'elle est *diffusée*. C'est grâce à la diffusion que les corps éclairés sont visibles. Si enfin le corps est transparent, une autre partie de la lumière incidente y pénètre en se réfractant.

On appelle *miroir plan* toute surface plane réfléchissante. Lorsqu'un faisceau divergent rencontre un miroir plan, le faisceau réfléchi est aussi divergent et son sommet est situé derrière le miroir en un point symétrique par rapport au miroir du sommet

du faisceau incident. Ce point, formé par les prolongements des rayons réfléchis, ne peut être reçu sur un écran ; c'est une image virtuelle. Un objet lumineux donne une image virtuelle, symétrique de l'objet par rapport au miroir.

Un faisceau de rayons parallèles qui tombe sur un miroir plan reste composé de rayons parallèles après sa réflexion. Un faisceau convergent reste également convergent, et le point de concours du faisceau convergent réfléchi peut être reçu sur un écran. C'est une image réelle.

Un point lumineux placé entre deux miroirs plans parallèles donne une série indéfinie d'images dont l'éclat va en s'affaiblissant graduellement. Si les deux miroirs sont inclinés, le nombre des images est limité ; il est d'autant plus grand que l'angle du miroir est plus petit. De plus, les images sont toutes situées sur une circonférence ayant pour centre le sommet de l'angle du miroir et pour rayon la distance de ce sommet au point lumineux.

Les applications des miroirs plans sont nombreuses : on peut citer les glaces d'appartement, les espions ; l'emploi de ces miroirs dans les porte-lumière, les héliostats, le sextant, etc.

#### EXERCICES SUR LE CHAPITRE IV

10. Quelle est la hauteur *minima* que doit avoir un miroir plan placé verticalement, pour qu'une personne se tenant debout devant ce miroir s'y voie par réflexion de la tête aux pieds ? Etablir la position du miroir.

11. Construire géométriquement : 1° l'image d'une droite horizontale placée devant un miroir plan incliné à  $45^\circ$  sur l'horizon ; 2° l'image d'une droite verticale placée au-dessus d'un miroir plan horizontal.

### CHAPITRE V

#### MIROIRS COURBES

39. Réflexion sur une surface courbe. — Une surface courbe pouvant être considérée comme formée par une infinité de petits éléments plans, tout rayon lumineux qui tombe sur une surface courbe se réfléchit comme il le ferait sur le petit élément plan correspondant au point

d'incidence. La normale au point d'incidence est alors la perpendiculaire à cet élément, ou, ce qui est la même chose, la perpendiculaire au plan tangent mené au point d'incidence. Les lois de la réflexion sont donc applicables aux surfaces courbes.

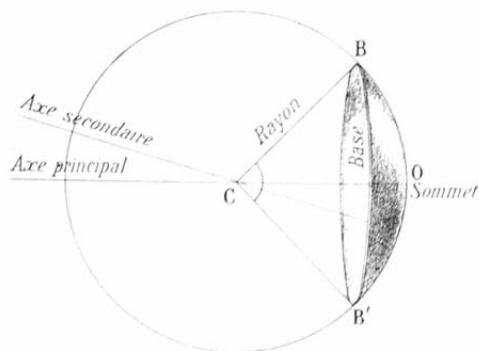
**40. Classification des miroirs courbes.** — Les miroirs courbes se distinguent, suivant la forme de leur surface réfléchissante, en miroirs *sphériques*, *cylindriques*, *coniques*, *paraboliques*, etc. Les plus simples sont les miroirs sphériques.

Les miroirs sphériques sont constitués par une portion de surface sphérique. Ils sont dits *concaves* si c'est la face interne de cette portion qui est la surface réfléchissante, et *convexes* si c'est la face externe.

On n'emploie guère que des miroirs sphériques et des miroirs paraboliques.

## MIROIRS SPHÉRIQUES CONCAVES

**41. Définitions.** — Soit un miroir sphérique concave



(fig. 57). On appelle *centre de courbure* le centre C de la sphère à laquelle appartient le miroir, et *rayon de courbure* le rayon de cette sphère. Le plan du petit cercle

Fig. 57. — Caractéristiques d'un miroir sphérique concave.

$BB'$  qui forme le bord du miroir est la *base* du miroir ; la droite qui passe par le centre de courbure et est perpendiculaire au plan de la base est l'*axe principal* du miroir. Le point où l'axe principal rencontre la surface réfléchissante est le *pôle* ou le *sommet* du miroir. Toute droite qui passe par le centre de courbure sans passer par le sommet est un *axe secondaire*.

Menons maintenant un plan par l'axe principal. Ce plan coupe le miroir suivant un arc de grand cercle,  $BOB'$  par exemple : l'angle  $BCB'$ , formé par les droites menées du centre de courbure aux extrémités de l'arc  $BB'$ , est l'*ouverture* du miroir. Un plan quelconque, mené ainsi par l'axe principal, prend le nom de *section principale*.

Pour établir la théorie *élémentaire* des miroirs sphériques concaves, on suppose essentiellement que l'ouverture ne comporte qu'un petit nombre de degrés (4 à 5°, par exemple) et que le miroir reçoit seulement des rayons s'écartant peu de l'axe principal ou, autrement dit, des rayons *centraux*.

**42. Réflexion des faisceaux de rayons parallèles.** — *Tout faisceau de rayons parallèles qui rencontre un miroir sphérique concave devient, après réflexion, un faisceau convergent.* Si les rayons incidents sont parallèles à l'axe principal, le sommet du faisceau réfléchi se nomme *foyer principal* ; il est situé sur l'axe principal, à une distance du sommet du miroir très sensiblement égale à la moitié du rayon de courbure.

**I. Rayons parallèles à l'axe principal.** — Soit  $MOM'$  l'arc de grand cercle suivant lequel un miroir concave de petite ouverture est coupé par une section principale (*fig. 58*) ; prenons cette section pour plan de la figure et soit, dans

cette section, un rayon lumineux parallèle à l'axe principal, tombant sur le miroir en M. La normale MC au point

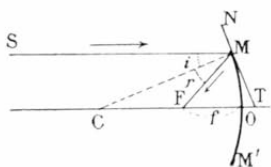


Fig. 58. — Réflexion d'un rayon parallèle à l'axe principal.

d'incidence n'est autre que le rayon de courbure ; par suite, le plan d'incidence SMC se confond avec le plan de la figure. Faisons un angle de réflexion égal à l'angle d'incidence ; nous obtiendrons le

rayon réfléchi MF, rayon qui est aussi contenu dans le plan de la figure.

Soit F le point où le rayon réfléchi coupe l'axe principal. Les angles MCF et  $i$  sont égaux comme alternes-internes ; le triangle MCF est donc isocèle, et  $MF = FC$ . Menons maintenant la tangente MT au point d'incidence, jusqu'à sa rencontre avec l'axe principal. Le triangle FMT est aussi isocèle, car l'angle  $FMT = 90^\circ - r$  et l'angle  $FTM = NMS = 90^\circ - i$ . Il en résulte  $MF = FT$ .

Or, le miroir n'ayant qu'une faible ouverture, le rapport de l'arc MO au rayon CO est très petit, et la longueur TO, qui est elle-même très petite par rapport au rayon du miroir, est *pratiquement négligeable*. Il en est de même à plus forte raison de toutes les autres valeurs que peut prendre la longueur TO pour le miroir considéré, car à mesure que le rayon incident se rapproche de l'axe principal, le point T se rapproche du point O, pour se confondre avec ce point lorsque le rayon incident suit l'axe principal. On peut donc confondre le point variable T avec le sommet du miroir dans l'évaluation de la longueur FT, et poser  $OF = FC$ .

En résumé, tous les rayons parallèles à l'axe principal viennent passer au point F après réflexion, et cela quel que

soit le point d'incidence. Le point  $F$  est le *foyer principal* du miroir. La distance  $FO = f$  est la *distance focale principale*; elle est sensiblement égale à  $\frac{R}{2}$ .

Réciproquement, si un point lumineux est placé en  $F$ , tous les rayons émis par ce point et rencontrant le miroir se réfléchiront parallèlement à l'axe principal.

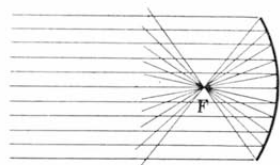


Fig. 59. — Marche d'un faisceau de rayons parallèles à l'axe principal.

Elle montre aussi la marche inverse qui serait suivie après réflexion par un faisceau divergent ayant le point  $F$  pour sommet.

**DÉTERMINATION EXPÉRIMENTALE DE LA DISTANCE FOCALE PRINCIPALE.** — Pour obtenir approximativement la distance focale principale d'un miroir concave, on oriente ce miroir de manière que son axe principal soit dirigé vers le centre du soleil, puis on cherche avec un petit écran blanc et opaque la région où l'image du soleil se forme avec netteté. La distance de l'écran au sommet du miroir est la distance focale principale. Nous verrons plus loin (43) comment on détermine cette distance avec précision.

**II. Rayons non parallèles à l'axe principal.** — Le raisonnement que nous avons fait pour les rayons parallèles à l'axe principal s'applique à un faisceau quelconque de rayons parallèles à un axe secondaire tel que  $AI'$  (fig. 60), ne faisant qu'un petit angle avec l'axe principal. On démontrerait que ces rayons viennent, après réflexion, converger en un foyer  $F'$ , situé sur l'axe secondaire  $AI'$  et au milieu de  $CI'$ .

Tous les points  $F, F', \dots$  se trouvent donc sur une petite

calotte sphérique de centre  $C$  et de rayon  $\frac{R}{2}$ . Si les axes

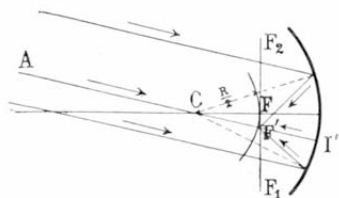


Fig. 60. — Réflexion d'un faisceau de rayons parallèles à un axe secondaire.

secondaires des faisceaux incidents correspondants ne font que de petits angles avec l'axe principal, cette petite calotte se confond sensiblement avec son plan tangent au point  $F$ , c'est-à-dire avec le plan  $F_1FF_2$  mené par  $F$  perpendiculairement à l'axe principal. Ce plan  $F_1FF_2$

est le *plan focal* du miroir. — Tout faisceau de rayons parallèles à un axe secondaire quelconque forme, après réflexion, un faisceau convergent dont le sommet est à l'intersection de cet axe secondaire avec le plan focal. Réciproquement, les rayons émis par un point lumineux placé en un point tel que  $F'$  du plan focal, se réfléchissent parallèlement à l'axe secondaire qui passe par  $F'$ .

**43. Réflexion des faisceaux divergents.** — Nous étudierons successivement la réflexion d'un faisceau issu d'un point lumineux situé sur l'axe, celle d'un faisceau issu d'un point lumineux situé hors de l'axe, et enfin les images produites par les faisceaux divergents.

**I. Point lumineux situé sur l'axe principal.** — Soient

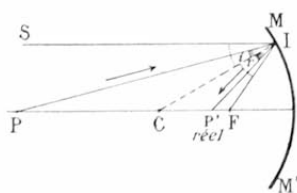


Fig. 61. — Réflexion d'un rayon issu d'un point situé sur l'axe principal au delà du centre.

$MM'$  la coupe du miroir par une section principale, et  $P$  un point lumineux situé sur l'axe principal, au delà du centre de courbure (fig. 61). Considérons un rayon incident  $PI$  dans le plan de la figure. L'angle d'incidence  $PIC$  étant plus petit que l'angle  $SIC$  formé par un rayon qui tomberait en  $I$  parallèlement à l'axe, l'angle de réflexion

correspondant à PIC sera plus petit que CIF, et le rayon réfléchi  $IP'$  coupera l'axe principal entre F et C. Nous démontrerons par le calcul que tous les rayons issus de P et rencontrant le miroir viennent, après réflexion, converger sur l'axe principal en ce même point  $P'$ . Le point  $P'$  est le foyer correspondant au point P; c'est un foyer *réel*.

D'après le principe de la réversibilité (29), si les rayons lumineux partaient du point  $P'$ , ils viendraient, après la réflexion, concourir au point P. Les points P et  $P'$  sont donc *réciroques* l'un de l'autre : on les nomme des foyers ou des points *conjugués*.

La construction précédente montre que si le point lumineux P se rapproche du centre de courbure, le foyer correspondant  $P'$  s'en rapproche également. Quand le point lumineux est situé au centre de courbure, un rayon incident quelconque est normal au miroir et se réfléchit sur lui-même : le point lumineux et son foyer coïncident en C. Si le point lumineux est placé entre le centre de courbure et le foyer, son conjugué passera au-delà de C. Enfin si le point lumineux arrivait exactement au foyer principal, les rayons réfléchis deviendraient parallèles à l'axe principal.

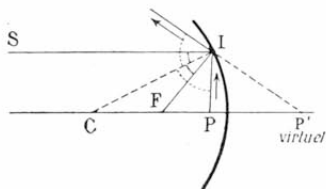


Fig. 62. — Réflexion d'un rayon issu d'un point situé sur l'axe principal entre le foyer et le sommet du miroir.

Plaçons maintenant le point P entre le foyer et le sommet du miroir (fig. 62). Un rayon incident quelconque PI fait avec la normale

IC un angle d'incidence plus grand que l'angle FIC; par suite, l'angle de réflexion correspondant est plus grand que l'angle CIS, et le rayon réfléchi ne peut rencontrer l'axe principal en



avant du miroir. Prolongeons ce rayon derrière le miroir ; il rencontre l'axe principal en un point  $P'$ . On démontre encore que les prolongements géométriques de tous les rayons issus de  $P$  et réfléchis sur le miroir viennent passer par le point  $P'$ . Ce point est le foyer conjugué du point  $P$ . C'est un foyer *virtuel*.

RELATION NUMÉRIQUE ENTRE LA DISTANCE FOCALE ET LES DISTANCES CONJUGUÉES. — Soit, dans une section principale,

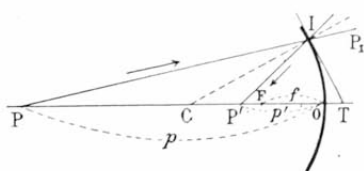


Fig. 63. — Figure servant à établir l'équation aux foyers conjugués.

un rayon incident quelconque  $PI$  issu d'un point lumineux  $P$  situé sur l'axe principal, au delà du centre de courbure (*fig. 63*) ; ce rayon se réfléchit en restant

dans la section principale et vient couper l'axe en un point  $P'$ .

La normale  $IC$  étant la bissectrice de l'angle  $I$  du triangle  $PIP'$ , on a

$$\frac{PI}{P'I} = \frac{P'C}{P'C}$$

D'un autre côté, si l'on mène la tangente  $IT$ , tangente qui est bissectrice de l'angle extérieur  $P'IP_1$ , parce qu'elle est perpendiculaire à  $CI$ , on a aussi

$$\frac{P'I}{PI} = \frac{TP'}{TP},$$

d'où

$$\frac{TP'}{TP} = \frac{P'C}{PC}.$$

Or si, comme nous le supposons toujours, l'ouverture du miroir est très petite, on peut négliger la distance  $OT$  sans

erreur sensible et écrire

$$\frac{OP'}{OP} = \frac{PC}{PC}.$$

D'après cela, la position de  $P'$  peut être regardée comme *indépendante* de l'angle d'incidence; tous les rayons issus du point  $P$  vont donc, après réflexion, passer par le même point  $P'$ .

Appelons  $p$  et  $p'$  les distances du point lumineux et de son conjugué au sommet du miroir. Il vient successivement

$$\frac{p'}{p} = \frac{R - p'}{p - R},$$

$$Rp' + Rp = 2pp',$$

et, en divisant chaque produit par  $Rpp'$ ,

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{2}{R}.$$

Si l'on remplace dans cette équation  $R$  par  $2f$ , on a

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}.$$

Cette formule, appelée *équation aux foyers conjugués*, peut être considérée comme générale pour les miroirs sphériques de petite ouverture. Il suffit de prendre toujours le miroir pour origine des distances et d'adopter la convention suivante, habituelle en géométrie: les longueurs  $p$ ,  $p'$  et  $f$  sont comptées *positivement* quand on s'éloigne du sommet du miroir pour aller vers  $P$ ,  $P'$ ,  $F$ , en marchant dans le *sens* de la lumière réfléchie; elles sont comptées *négativement* quand on s'éloigne du sommet en marchant en *sens inverse* de la lumière réfléchie. Dans le premier cas, ces longueurs correspondent à des points de

conours réels ; dans le second, à des points de concours virtuels.

Si l'on veut discuter l'équation aux foyers conjugués, c'est-à-dire chercher les différentes valeurs que prend  $p'$  suivant celles que l'on donne à  $p$ , il est commode de résoudre d'abord l'équation par rapport à  $p'$ . On a ainsi

$$p' = \frac{pf}{p-f},$$

ou, ce qui revient au même,

$$p' = \frac{f}{1 - \frac{f}{p}}.$$

En faisant successivement dans cette formule  $p = \infty$ ,  $p > 2f$ ,  $p = 2f$ ,  $2f > p > f$ ,  $p = f$ , et discutant les valeurs correspondantes de  $p'$ , on retrouve tous les résultats que nous avons obtenus en considérant les angles d'incidence et de réflexion.

Enfin dans le cas où  $p < f$ , il faut, d'après la convention établie plus haut, donner à  $p'$  une valeur négative, ce qui conduit à la formule

$$p' = \frac{f}{\frac{f}{p} - 1},$$

laquelle donne pour  $p'$  des valeurs positives et parfaitement admissibles pour toutes les valeurs de  $p$  inférieures à  $f$ .

On trouvera plus loin le résumé de la discussion de l'équation aux foyers conjugués.

FORMULE DE NEWTON. — Prenons pour origine des distances le foyer principal du miroir. Appelons  $d$  et  $d'$  les distances du point lumineux  $P$  et de son conjugué  $P'$  au point  $F$  (fig. 63). Nous aurons

$$p = f + d, \quad p' = f + d'.$$

Remplaçons maintenant  $p$  et  $p'$  par ces valeurs dans l'équation aux foyers conjugués ; il vient, après réduction,

$$dd' = f^2.$$

Cette formule, dite *formule de Newton*, se présente sous une forme plus simple que l'équation aux foyers conjugués ; elle se discute comme cette dernière et fournit les mêmes résultats.

CONSTRUCTION GÉOMÉTRIQUE DU CONJUGUÉ D'UN POINT LUMINEUX SITUÉ SUR L'AXE. — On peut trouver sans mesure d'angles la position du conjugué d'un point lumineux situé sur l'axe principal en s'appuyant soit sur la formule de Newton, soit

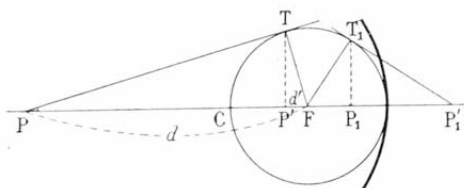


Fig. 64. — Construction géométrique du conjugué d'un point lumineux (d'après la formule de Newton).

térieur au cercle, on mène par ce point la tangente PT ; le foyer conjugué est le pied P' de la perpendiculaire abaissée du point de tangence T sur l'axe principal. Si le point lumi-

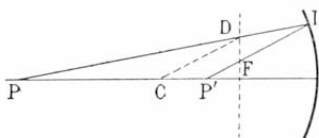


Fig. 65. — Construction géométrique du conjugué d'un point lumineux (d'après les propriétés du plan focal).

sur les propriétés du plan focal.

Dans le premier cas, on décrit une circonférence du point F comme centre avec un rayon égal à  $f$  (fig. 64).

Si le point lumineux est ex-

terieur au cercle, on mène par ce point la tangente PT ; le foyer conjugué est le pied P' de la perpendiculaire abaissée du point de tangence T sur l'axe principal. Si le point lumineux est intérieur au cercle, on fait la même construction en sens inverse. On a toujours  $dd' = f^2$ .

Dans le second cas, soit D le point où le rayon incident PI coupe le plan focal (fig. 65). Le rayon peut être considéré comme partant du point D ; il se réfléchira donc

parallèlement à DC (42). Menons IP' parallèle à DC : le point P' est le conjugué de P. Cette construction est également applicable quand le conjugué P' est virtuel.

## II. Point lumineux situé hors de l'axe principal. —

Les considérations que nous venons de développer s'appliquent à un point lumineux situé sur un axe secondaire quelconque ne faisant qu'un *très petit* angle avec l'axe principal. Il en résulte que les rayons issus d'un point A placé dans ces conditions passent, après réflexion, en un point A' situé sur l'axe secondaire du point A. Les points A et A' sont encore des *points conjugués*.

CONSTRUCTION GÉOMÉTRIQUE. — Soit un point lumineux A situé hors de l'axe principal (fig. 66). Le rayon qui suit

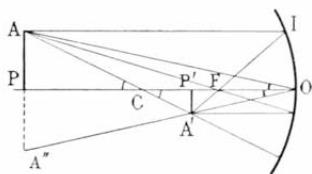


Fig. 66. — Construction géométrique du conjugué d'un point situé hors de l'axe.

l'axe secondaire AC est normal au miroir et se réfléchit sur lui-même. Prenons pour plan de la figure la section principale qui contient cet axe secondaire. Pour obtenir directement le conjugué de A, il suffit de

construire un rayon réfléchi et de déterminer son intersection avec l'axe AC. Parmi les rayons issus du point A, considérons le rayon AI parallèle à l'axe principal ; il passe, après réflexion, par le point F. Le point d'intersection A' du rayon IF et de l'axe secondaire AC est le conjugué du point lumineux A. — Nous pouvons employer aussi le rayon AF et le rayon AO : le premier est réfléchi parallèlement à l'axe principal et coupe également l'axe secondaire en A' ; le second se réfléchit en O comme sur un miroir plan, et comme il passerait par un point A'' symétrique de A par rapport à l'axe principal, il rencontre toujours l'axe AC en A'.

Les rayons AC, AI, AF, AO, dont la marche peut ainsi être facilement construite, sont quelquefois appelés *rayons remarquables*. Ils déterminent deux à deux le point A' conjugué de A ; de là six constructions distinctes possibles.

DROITES CONJUGUÉES. — Abaissons des points A et A' les perpendiculaires AP et A'P' sur l'axe principal ; les points P et P' sont *conjugués*. En effet, les triangles semblables OPA et OP'A' donnent

$$\frac{OP'}{OP} = \frac{A'P'}{AP}.$$

Les triangles  $P'CA'$  et  $PCA$  sont aussi semblables et donnent

$$\frac{CP'}{CP} = \frac{AP'}{AP}.$$

Il en résulte  $\frac{OP'}{OP} = \frac{CP'}{CP} = \frac{OC - OP'}{OP - OC}$ ,

d'où  $OC \cdot OP' + OC \cdot OP = 2OP \cdot OP'$ .

Divisons les deux membres de l'égalité par le produit  $OC \cdot OP \cdot OP'$ ; il vient

$$\frac{1}{OP} + \frac{1}{OP'} = \frac{2}{OC}.$$

Donc les points  $P$  et  $P'$  sont conjugués. Il en est de même des droites  $AP$  et  $A'P'$ : tout point lumineux situé sur l'une d'elles a son conjugué sur l'autre.

Cherchons maintenant le rapport des grandeurs des droites conjuguées  $AP$  et  $A'P'$ . Les triangles semblables  $OPA$  et  $OP'A'$  donnent

$$\frac{A'P'}{AP} = \frac{OP'}{OP} = \frac{p'}{p}.$$

Ce rapport  $\frac{A'P'}{AP}$  de deux dimensions linéaires conjuguées s'appelle le *grossissement linéaire*; il est égal au rapport des distances du miroir à ces deux dimensions.

La figure 66 montre que l'on voit toujours sous un même angle, du centre de courbure, les deux droites conjuguées  $AP$  et  $A'P'$ . Le sommet  $O$  du miroir jouit de la même propriété.

**PLANS CONJUGUÉS.** — Faisons enfin tourner le plan de la figure autour de l'axe principal. Les droites  $AP$  et  $A'P'$  engendrent deux plans perpendiculaires à l'axe principal. Ces plans sont dits des *plans conjugués*: toute figure prise dans l'un a son image dans l'autre. De plus, la figure et l'image sont

semblables et le centre de courbure du miroir est le centre de similitude. Si l'on appelle  $s'$  et  $s$  les dimensions superficielles de la figure et de l'image, on a

$$\frac{s'}{s} = \frac{p'^2}{p^2}.$$

Ces considérations de droites et de plans conjugués ne sont applicables qu'en supposant toujours un très faible écart angulaire entre les axes secondaires considérés et l'axe principal. Les plans engendrés par les droites AP et A'P' par exemple, sont en réalité les plans tangents aux sphères conjuguées passant par P et P'.

### III. Images produites par les faisceaux divergents.

— L'image d'un objet est l'ensemble des conjugués de ses différents points. Sa construction se ramène toujours à celle de l'image d'une ou plusieurs droites perpendiculaires à l'axe principal; elle se déduit par suite des considérations que nous avons exposées pour les droites conjuguées.

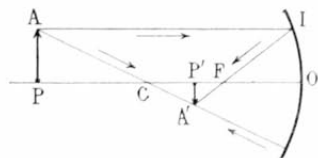


Fig. 67. — Image d'une droite située au delà du centre de courbure.

Nous n'examinerons que le cas le plus simple, celui où l'objet est une petite droite AP perpendiculaire à l'axe principal, limitée par cet axe (fig. 67), et nous

prendrons pour plan de la figure une section principale qui contienne la droite AP.

1° L'objet AP est situé au delà du centre de courbure.

— On mène du point A l'axe secondaire AC et le rayon parallèle AI; l'intersection A' du rayon réfléchi IF avec l'axe AC est le conjugué de A. La perpendiculaire A'P' abaissée sur l'axe principal est l'image de la droite AP. On voit que cette image est réelle, renversée par rapport à l'objet, plus petite que l'objet (P'O étant plus petit que

PO); elle est située entre le foyer et le centre de courbure.

Si l'on suppose que l'objet AP se rapproche du centre, l'angle PCA, qui représente le *diamètre apparent* de l'objet vu du point C, augmente; l'image A'P' grandit et se rapproche également du centre.

Si au contraire AP s'éloigne du centre, l'angle PCA diminue, l'image A'P' diminue et se rapproche du foyer principal. Enfin si AP est à l'infini, son diamètre apparent est nul; l'image A'P' est réduite à un point, au foyer principal.

2° L'objet AP est situé dans un plan perpendiculaire à l'axe principal et passant par le centre de courbure. —

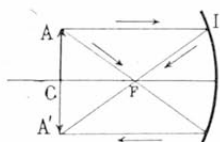


Fig. 68. — Image d'une droite située dans le plan vertical qui passe par le centre de courbure.

Le conjugué du point A se détermine à l'aide des rayons AI et AF (fig. 68); après réflexion, le premier passe par F; le second est parallèle à l'axe principal. L'image est *réelle, renversée, égale* à l'objet; elle est symétriquement placée par rapport à l'axe principal.

3° L'objet AP est situé entre le centre de courbure et le foyer principal. — On verrait facilement, en faisant la construction géométrique ordinaire, que l'image est *réelle, renversée, plus grande* que l'objet. Elle se forme au-delà du centre.

Plus l'objet AP se rapproche du foyer principal, plus l'image grandit en s'éloignant du centre.

4° L'objet AP est situé dans le plan focal. — Chacun des points de la droite AP envoie sur le miroir des rayons qui, après réflexion, sont parallèles. Il n'y a donc plus d'image ou, du moins, elle est alors infiniment grande et infiniment éloignée du miroir.



5° L'objet AP est situé entre le foyer principal et le miroir. — Dans ce cas (fig. 69), les rayons réfléchis correspondant aux rayons incidents AI et AC (axe secondaire) ne se rencontrent pas en avant du miroir, la distance AI étant plus petite que FC ; ils ne se coupent que sur leurs prolongements. L'image est virtuelle, droite, plus grande que l'objet ; elle semble se former derrière le miroir. A mesure que AP se rapproche du miroir, l'image s'en rapproche aussi et diminue de grandeur. Quand AP est situé au sommet du miroir, son image se confond avec lui.

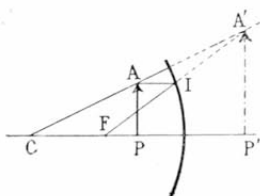


Fig. 69. — Image d'une droite située entre le miroir et son foyer.

est virtuelle, droite, plus grande que l'objet ; elle semble se former derrière le miroir. A mesure que AP se rapproche du miroir, l'image s'en rapproche aussi et diminue de grandeur. Quand AP est situé au sommet du miroir, son image se confond avec lui.

Les résultats que nous venons d'indiquer sont résumés dans le tableau suivant :

OBJET AP Position	IMAGE A'P'			
	Position	Nature	Direction	Grandeur
$p = \infty$	$p' = f$	Réelle	Renversée.	Infinitement diminuée
$\infty > p > 2f$	$f < p' < 2f$	Id.	Id.	Plus petite.
$p = 2f$	$p' = 2f$	Id.	Id.	Égale.
$2f > p > f$	$2f < p' < \infty$	Id.	Id.	Plus grande.
$p = f$	$p' = \pm \infty$	Réelle.	Renversée.	Infinitement agrandie
		Virtuelle.	Droite.	
$f > p > 0$	$p' < 0$	Virtuelle.	Droite.	Plus grande.
$p = 0$	$p' = 0$	Id.	Id.	Égale.

REMARQUE. — Lorsqu'un objet très éloigné d'un miroir a un diamètre apparent sensible, comme le soleil, la lune, etc., on ne représente pas l'objet sur la figure. En admettant que l'axe principal, indéfiniment prolongé, aille passer par une des extrémités de l'objet, on mène par le centre de courbure l'axe secondaire AC qui correspond à l'autre extrémité

(fig. 70). L'image se forme dans le plan focal, et sa dimension rectiligne  $\delta$  a sensiblement pour valeur  $F\alpha$ , si l'angle  $\alpha$  est très petit. Dans le cas où l'objet est le soleil et où l'axe principal du miroir concave est dirigé sur le centre de l'astre, l'angle  $\alpha$  est égal à  $16'$ . L'image est un cercle lumineux dont le rayon  $\delta$ , pour un miroir ayant  $1^m$  de distance focale, est égal à  $1 \times \frac{2\pi \times 16}{360 \times 60} = 4^{mm},6$ .

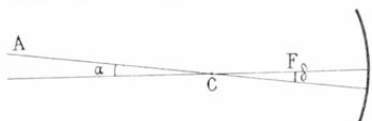


Fig. 70. — Image d'un objet éloigné ayant un diamètre apparent sensible.

de l'astre, l'angle  $\alpha$  est égal à  $16'$ . L'image est un cercle lumineux dont le rayon  $\delta$ , pour un miroir ayant  $1^m$  de distance focale, est égal à  $1 \times \frac{2\pi \times 16}{360 \times 60} = 4^{mm},6$ .

IV. Vérifications expérimentales. — Les miroirs concaves destinés aux expériences de cours se font en laiton ou en verre. Dans le premier cas, la surface intérieure est



Fig. 71. — Miroir métallique et son support.



Fig. 72. — Miroir en verre argenté et son support.

soigneusement polie (fig. 71). Dans le second, le verre est argenté ou recouvert d'amalgame d'étain sur l'une de ses faces. Les miroirs en verre sont les plus usités ; ils sont fixés par l'intermédiaire d'un demi-cercle métallique à une tige en bois noir (fig. 72),

que l'on peut abaisser ou élever à volonté à l'intérieur d'un support également en bois noir.

Tous ces miroirs ayant une assez grande ouverture, il convient, pour avoir des images nettes, de les recouvrir

d'un anneau de papier noir qui ne laisse libre qu'une petite partie centrale. C'est ce que l'on appelle *diaphragme*.

Pour vérifier les résultats relatifs aux images données par les miroirs concaves, on se place dans une chambre obscure et on dispose une bougie ou un bec de gaz devant le miroir, de manière que le milieu de la flamme se

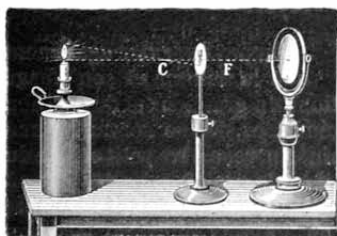


Fig. 73. — Image réelle donnée par un miroir concave (image plus petite que l'objet).

siner sur l'écran une image

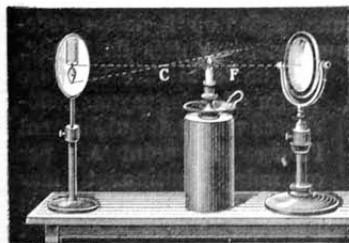


Fig. 74. — Image réelle donnée par un miroir concave (image plus grande que l'objet).

est plus grande que la flamme et se forme au delà du centre (*fig. 74*). Si la bougie arrive au foyer principal, l'image disparaît. Enfin lorsque la bougie dépasse le

trouve à peu près sur l'axe principal du miroir. A l'aide d'un petit écran opaque et blanc placé sur un support, on cherche alors le lieu où l'image se forme avec le plus de netteté. La bougie étant d'abord placée très loin, on voit se dessiner sur l'écran une image renversée, très petite et très brillante (*fig. 73*). A mesure que la bougie se rapproche du miroir, l'image s'en éloigne en grandissant; au centre de courbure la flamme et son image sont égales et dans le même plan. Quand la bougie dépasse le centre, l'image est encore renversée, mais elle

foyer, on ne reçoit plus d'image sur un écran, mais un

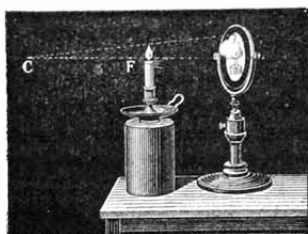


Fig. 75. — Image virtuelle donnée par un miroir concave.

observateur placé en avant du miroir voit l'image virtuelle droite de la flamme (fig. 75), image d'autant plus agrandie que la bougie est plus rapprochée du foyer.

On peut vérifier également que la flamme et son image présentent entre elles les relations de grandeur et de position qui résultent des équations générales. En se servant d'une lampe à gaz, munie d'une cheminée percée d'un petit orifice du côté du miroir et en se plaçant dans le cas où  $p = 2f$  (cas où l'orifice se peint nettement sur un écran placé dans le même plan perpendiculaire à l'axe), on obtient facilement le rayon de courbure du miroir, et on en déduit la distance focale principale du miroir.

REMARQUE. — Les images *réelles* qui se produisent sur un écran sont visibles quelle que soit la position de l'observateur, parce que l'écran diffuse de la lumière dans toutes les directions. On peut voir les images réelles *directement*. Il faut pour cela placer l'œil en une région où il puisse recevoir à la fois des rayons venus des extrémités de l'objet,

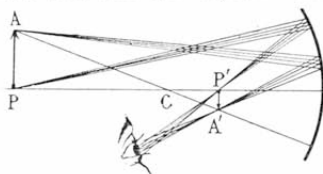


Fig. 76. — Vision directe des images réelles.

comme le montre la figure 76. En effet, les rayons réfléchis convergents qui forment l'image du point A, par exemple, continuent leur marche s'ils ne rencontrent pas d'écran en A' et forment alors un cône de rayons divergents. Dès lors, un observateur dont l'œil est placé à l'intérieur de ce dernier cône voit le point de concours A' comme s'il appartenait à un objet lumineux matériel. Il voit en même temps le point P' si son œil reçoit aussi les rayons divergents issus de ce point.

Les images vues dans ces conditions portent le nom d'*images aériennes*; elles jouent, comme nous le verrons, un

rôle important dans la plupart des instruments d'optique. Elles diffèrent essentiellement des images réelles produites sur un écran en ce que, n'envoyant pas de lumière dans toutes les directions, elles ne sont visibles que pour des positions déterminées de l'œil.

**44. Réflexion des faisceaux convergents.** — Interposons un miroir concave dans un faisceau de rayons convergents de manière que le point de concours P de ces

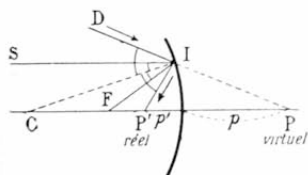


Fig. 77. — Réflexion d'un rayon qui coupe l'axe principal derrière le miroir.

rayons se trouve sur l'axe principal prolongé (fig. 77). Prenons une section principale pour plan de la figure et considérons, dans cette section, un rayon lumineux incident DI dont le prolongement aboutit au point P.

L'angle d'incidence DIC étant plus grand que l'angle SIC, l'angle de réflexion CIP' est plus grand que l'angle CIF; par suite, le rayon DI vient, après réflexion, couper l'axe principal en un point situé entre le miroir et son foyer. Soit P' ce point. Tous les rayons réfléchis correspondant aux rayons du faisceau incident viennent converger au même point P'. Les points P et P' sont encore des *points conjugués*; ils sont toujours du même côté de F. Le point P' est un foyer *réel*, correspondant à un point lumineux *virtuel*.

En tenant compte de la convention admise pour les miroirs, l'équation aux foyers conjugués devient dans ce cas

$$\frac{1}{p'} - \frac{1}{p} = \frac{1}{f}.$$

On en tire

$$p' = \frac{f}{1 + \frac{f}{p}}.$$

D'après cette relation, si  $p < 0$ ,  $p' < f$ ; si  $p = -\infty$ ,  $p' = f$ .

On voit que plus le point de concours  $P$  s'éloigne du miroir, plus le point  $P'$  se rapproche du foyer.

**Images produites par les faisceaux convergents.** — Soit  $AP$  une petite droite virtuelle qui serait formée soit par une lentille (71), soit par un miroir concave, si les rayons n'é-

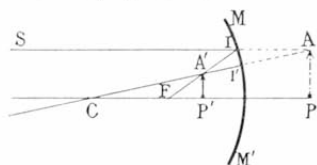


Fig. 78. — Image réelle d'un objet virtuel.

taient interceptés par un miroir concave  $MM'$  (fig. 78). Le rayon qui suit l'axe secondaire  $CA$  est normal au miroir et se réfléchit en  $I'$  suivant sa propre direction. Parmi les autres rayons dont les prolongements aboutissent au point  $A$ , on peut toujours en supposer un,  $SI$ , parallèle à l'axe principal; il se réfléchit suivant  $IF$ . Le point  $A'$ , intersection des rayons réfléchis  $I'C$  et  $I'F$ , est le conjugué de  $A$ , et la perpendiculaire  $AP'$  est l'image de la droite  $AP$ . Cette image est *réelle, droite et plus petite* que l'objet.

#### 45. Aberration de sphéricité des miroirs concaves. —

La théorie élémentaire que nous avons établie pour les miroirs concaves ne s'applique plus lorsque l'ouverture du miroir est assez considérable. Dans ce cas, les rayons issus d'un point lumineux et réfléchis près des bords (rayons *marginiaux*) ne convergent pas au même point que les rayons centraux; ils viennent rencontrer l'axe secondaire du point lumineux en des points d'autant plus voisins du sommet que la réflexion se produit plus près du bord. Ce défaut de convergence a reçu le nom d'*aberration de sphéricité*.

Considérons, par exemple, des rayons parallèles à l'axe principal tombant sur un miroir dont l'ouverture a pour valeur  $2\omega$  (fig. 79). Le rayon  $SM$  qui tombe sur le bord  $M$  du miroir fait avec la normale  $CM$  un angle d'incidence égal à  $\omega$ ; le rayon réfléchi correspondant coupe l'axe principal en un certain point  $F_1$ . Abaissons du point  $F_1$  la perpendi-

culaire  $F_1P$  sur le rayon de courbure  $CM$ . Le triangle  $F_1CM$  est isocèle ; par suite,  $MP = CP = \frac{R}{2}$ .

On a  $CP = F_1C \cos \omega$ ,

d'où  $F_1C = \frac{\frac{R}{2}}{\cos \omega}$ .

On voit ainsi que  $F_1C$  est plus grand que  $\frac{R}{2}$ .

Pour  $\omega = 0$ ,  $\cos \omega = 1$  ; la formule montre que la distance du foyer au centre de courbure est alors égale à  $\frac{R}{2}$ .

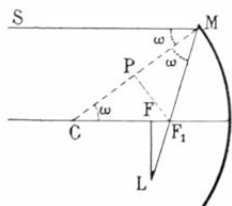


Fig. 79. — Aberration dans les miroirs concaves.

triques partant du foyer  $F$



Fig. 80. — Caustique principale par réflexion.

Pour des valeurs croissantes de  $\omega$ ,  $\cos \omega$  prend des valeurs décroissantes, et le foyer s'éloigne de plus en plus du centre de courbure. Les rayons réfléchis se coupent deux à deux avant de rencontrer l'axe principal ; leurs intersections successives dessinent dans une section principale une courbe lumineuse formée de deux branches symétriques partant du foyer  $F$  des rayons centraux (fig. 80). Cette courbe se nomme *caustique principale par réflexion*.

La distance  $FF_1$  (fig. 79) s'appelle l'*aberration longitudinale* principale du miroir. Si l'on mène par le point  $F$  une perpendiculaire à l'axe principal, elle rencontre le rayon  $MF_1$  prolongé en un certain point  $L$  ; la longueur  $FL$  s'appelle l'*aberration latérale* principale. Il résulte de

l'aberration latérale que si l'on reçoit sur un miroir concave la lumière émise par une étoile, on obtient dans le plan focal, non un point, mais un cercle de rayon  $FL$ . Comme un miroir est dit *aplanétique* quand il donne d'un point lumineux une image réduite à un point, un miroir sphérique n'est aplanétique que pour un point lumineux placé en son centre de courbure, car les rayons émanés de ce point sont tous nor-

maux au miroir et vont, après réflexion, y concourir rigoureusement.

**46. Applications des miroirs concaves.** — Les miroirs sphériques concaves s'emploient, sous le nom de *réflecteurs*, soit pour projeter à des distances relativement considérables la lumière émise par une source lumineuse, soit pour éclairer fortement un objet rapproché, comme dans la lanterne magique. Dans les deux cas, la source lumineuse est placée au foyer du miroir. — On se servait autrefois dans les télescopes de miroirs métalliques concaves pour obtenir des images réelles des objets éloignés; on leur substitue aujourd'hui des miroirs paraboliques en verre argenté.

C'est avec deux miroirs concaves conjugués que l'on démontre les lois de la réflexion de la chaleur et de la réflexion du son. — Comme objets de toilette, les miroirs concaves ont encore une application; l'observateur placé entre le miroir et son foyer voit une image virtuelle, agrandie, de son visage. Enfin on produit avec les miroirs concaves certaines illusions d'optique, parmi lesquelles

nous citerons le *bouquet magique*.

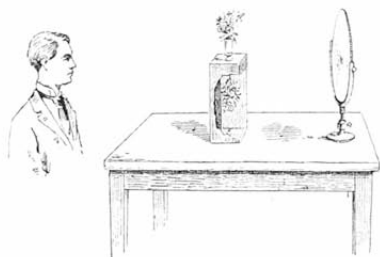


Fig. 81. — Expérience du bouquet magique.

Au-dessous du centre de courbure d'un grand miroir concave, on dispose sur un fond noir et dans une position renversée un bouquet de fleurs bien éclairé (fig. 81). Un observateur placé à quelque distance en avant du miroir aperçoit alors une image *aérienne* et droite du bouquet dans un vase vide placé au-dessus du centre de courbure.



## MIROIRS SPHÉRIQUES CONVEXES

**47. Définitions.** — Les définitions que nous avons données pour les miroirs concaves relativement à l'axe principal, au sommet, à l'ouverture, etc., sont applicables aux miroirs convexes. La théorie élémentaire de ces miroirs s'établit comme celle des miroirs concaves, en supposant que l'ouverture ne comprend qu'un petit nombre de degrés et que le miroir ne reçoit que des rayons centraux.

**48. Réflexion des faisceaux de rayons parallèles.** — Soit  $MM'$  la coupe d'un miroir sphérique convexe par une section principale (*fig. 82*).

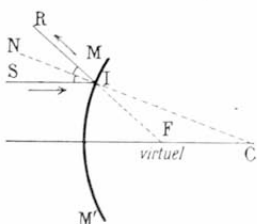


Fig. 82. — Réflexion d'un rayon parallèle à l'axe principal.

Considérons, dans cette section, un rayon  $SI$  parallèle à l'axe principal; il se réfléchit suivant  $IR$ , de manière à faire avec la normale  $IN$  des angles d'incidence  $SIN$  et de réflexion  $NIR$ , égaux. Prolongeons le rayon réfléchi  $IR$  derrière le miroir; il rencontre l'axe principal en un point  $F$ . On démontre, par un raisonnement analogue à celui qui est employé pour les miroirs concaves : 1<sup>o</sup> que tous les rayons parallèles à l'axe principal forment, après réflexion, un faisceau divergent dont le sommet est le point  $F$ ; 2<sup>o</sup> que le point  $F$  est sensiblement à égale distance du centre de courbure et du sommet du miroir. Ce point est le *foyer principal*. Il ne peut être reçu sur un écran; c'est un foyer *virtuel*.

Si les rayons parallèles ont une direction quelconque, les rayons réfléchis forment encore un faisceau divergent. Le

sommet de ce faisceau est à l'intersection du rayon qui passe par le centre de courbure et du plan mené par F perpendiculairement à l'axe principal (plan focal). Le plan focal est *virtuel*.

DÉTERMINATION EXPÉRIMENTALE DE LA DISTANCE FOCALE PRINCIPALE. — Pour déterminer approximativement la distance focale principale d'un miroir convexe, on recouvre le miroir d'une feuille de papier dans laquelle on a ménagé deux petites ouvertures  $a$  et  $a'$ , situées à égale distance de l'axe principal et dans un plan passant par cet axe (*fig. 83*). On dirige l'axe principal du miroir vers le soleil et l'on place en avant de la surface réfléchissante un écran percé d'une ouverture suffisamment large pour que les rayons solaires tombent sur les ouvertures  $a$  et  $a'$ . Les rayons réfléchis en  $a$  et en  $a'$  forment sur l'écran deux petites surfaces éclairées R et R'.

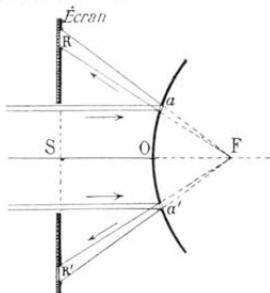


Fig. 83. — Détermination expérimentale de la distance focale principale d'un miroir convexe.

On approche ou on écarte alors l'écran du miroir jusqu'à ce que la distance entre les surfaces R

et R' soit double de celle des ouvertures  $a$  et  $a'$ . Les triangles semblables  $Faa'$  et  $FRR'$  donnent

$$\frac{aa'}{RR'} = \frac{FO}{FS},$$

d'où l'on tire 
$$FO = \frac{FS \times aa'}{RR'} = \frac{FS}{2}.$$

La distance focale principale est donc la distance du miroir à l'écran.

49. Réflexion des faisceaux divergents. — Un rayon quelconque PI issu d'un point lumineux P situé sur l'axe principal (*fig. 84*) fait avec la normale IN un angle plus grand que  $\text{SIN}$ ; le rayon réfléchi correspondant IR est donc plus écarté de la normale que le rayon qui aboutirait en F, et son prolongement géométrique rencontre l'axe

principal en un point  $P'$  situé entre le miroir et le foyer principal. Tous les rayons issus du point  $P$  et tombant sur

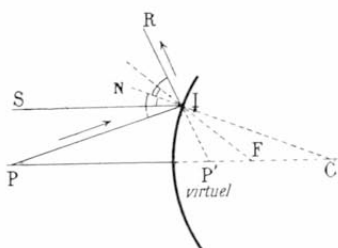


Fig. 84. — Reflexion d'un rayon issu d'un point situé sur l'axe principal.

la surface réfléchissante viennent, après réflexion, concourir au point  $P'$ . Le point  $P'$  est le *conjugué* du point  $P$ ; il est *virtuel*: l'œil placé sur le trajet du rayon réfléchi voit le point  $P'$  derrière le miroir. La construction montre que

ce point se rapproche du sommet du miroir en même temps que le point  $P$ .

La relation qui existe entre  $p$ ,  $p'$  et  $f$  s'établit facilement; elle est la même que pour les miroirs concaves. D'après la convention admise pour les miroirs sphériques (43),  $f$  est négatif;  $p$  est aussi négatif pour toute valeur positive de  $p$ , c'est-à-dire pour tout objet placé devant le miroir. On a donc

$$\frac{1}{p} - \frac{1}{p'} = -\frac{1}{f},$$

équation qui montre que la position du point  $P'$  est indépendante de la position du point d'incidence, sous les mêmes conditions que pour les miroirs concaves.

De l'équation précédente on tire

$$p' = \frac{f}{1 + \frac{f}{p}}.$$

Si l'on remplace dans cette formule  $p$  par diverses valeurs, on trouve toujours pour  $p'$  une valeur admissible, ce qui montre que le *conjugué d'un point lumineux réel est toujours virtuel dans un miroir convexe*.

La formule de Newton (43) s'applique également aux miroirs convexes.

Images produites par les faisceaux divergents. — Les considérations relatives à la construction des images dans les miroirs concaves s'appliquent aux miroirs convexes. Etant donnée, par exemple, une petite droite AP perpendiculaire à l'axe principal

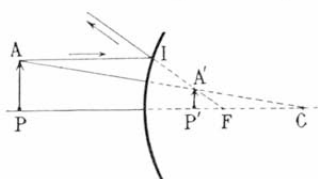


Fig. 85. — Image d'une droite réelle dans un miroir convexe

et située dans le plan d'une section principale prise pour plan de la figure, le conjugué A' du point A est à l'intersection de l'axe secondaire CA et du prolongement géométrique du rayon réfléchi correspondant à un rayon AI parallèle à l'axe principal. En abaissant du point A' une perpendiculaire sur l'axe principal, on obtient l'image A'P', qui est virtuelle, droite et plus petite que la droite AP.

On a toujours, entre les dimensions linéaires AP et A'P', la relation

$$\frac{A'P'}{AP} = \frac{p'}{p}.$$

La discussion de ce rapport montre que l'image est d'autant plus rapprochée du foyer et d'autant plus petite que l'objet est plus éloigné du miroir.

Les résultats précédents se vérifient facilement avec les miroirs convexes destinés aux expériences de cours, diaphragmés s'il y a lieu. On obtient toujours une image virtuelle, droite et diminuée, d'un objet quelconque placé devant la surface réfléchissante.

**50. Réflexion des faisceaux convergents.** — Il y a deux cas à considérer, suivant que la lumière converge entre le miroir et son foyer, ou au-delà du foyer.

1<sup>er</sup> CAS. — L'image est réelle, droite et plus grande que celle qu'aurait donné la lumière convergente. Soit en

effet  $AP$  une droite réelle que formeraient les rayons convergents sans l'interposition du miroir convexe  $MM'$  (fig. 86). Les rayons incidents ayant la même direction que si l'image

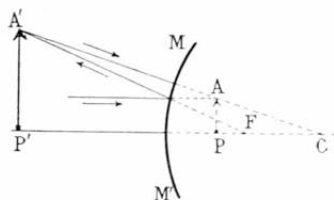


Fig. 86. — Image réelle donnée par un miroir convexe en lumière convergente.

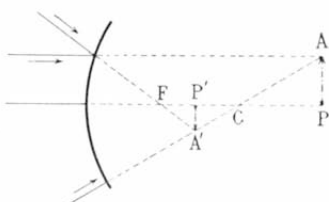


Fig. 87. — Image virtuelle donnée par un miroir convexe en lumière convergente.

se formait réellement, il suffit d'appliquer la construction générale (axe secondaire et rayon parallèle). L'image est la droite  $A'P'$ .

2<sup>e</sup> CAS. — L'image est toujours *virtuelle* et *renversée*. On le voit aisément par la construction de la figure 87.

#### 51. Applications des miroirs sphériques convexes. —

Les miroirs sphériques convexes ont peu d'applications. On les a employés dans quelques télescopes. Les paysagistes s'en servent pour obtenir l'image réduite du paysage qui leur sert de modèle. Enfin on trouve dans les jardins des *globes périscopiques*. Ce sont des sphères de verre argentées intérieurement qui jouent le rôle de miroirs convexes à grande ouverture et donnent l'image virtuelle, diminuée et déformée, du paysage et des objets environnants.

#### MIROIRS PARABOLIQUES

**52. Définitions.** — La *parabole* est une courbe plane dont chaque point est également éloigné d'un point fixe  $F$  et d'une droite  $AB$  donnée dans son plan (fig. 88). Le point fixe se nomme *foyer*; la droite  $AB$  se nomme *directrice*. La perpendiculaire abaissée du foyer sur la directrice est *l'axe* de la

parabole. Toute droite qui joint le foyer à un point quelconque  $M$  de la courbe est un *rayon vecteur*.

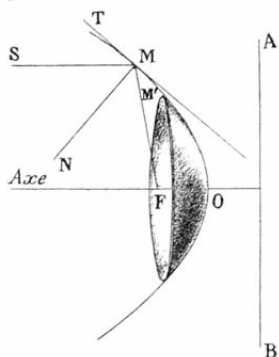


Fig. 88. — Parabole et miroir parabolique.

Les miroirs *paraboliques* sont des miroirs concaves dont la surface est engendrée par la rotation complète d'un arc de demi-parabole, tel que  $OM'$ , autour de l'axe de la courbe.

**53. Réflexion des rayons parallèles sur un miroir parabolique.** — La tangente en un point quelconque  $M$  de la parabole fait des angles égaux avec le rayon vecteur  $FM$  du point de contact et la droite  $MS$  menée parallèlement à l'axe par

ce même point. Il résulte de cette propriété de la parabole que les angles  $FMN$  et  $SMN$  avec la normale en  $M$  sont aussi égaux. Par suite, si  $MS$  est un rayon incident, le rayon réfléchi passera par le foyer  $F$ . Il

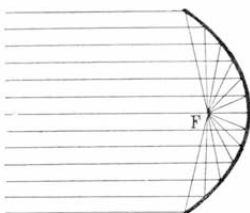


Fig. 89. — Section d'un miroir parabolique jouant le rôle de réflecteur.

en est de même pour un rayon incident quelconque parallèle à l'axe d'un miroir parabolique. Réciproquement, un point lumineux étant placé au foyer du miroir, tous les rayons issus de ce point forment, après réflexion, un faisceau de rayons rigoureusement parallèles à l'axe (*fig. 89*). Un miroir parabolique est donc aplanétique.

On voit d'après cela le grand avantage des miroirs paraboliques sur les miroirs sphériques, quand on veut concentrer des rayons parallèles en un point ou bien envoyer de la lumière réfléchie à grande distance sans perte d'intensité. En revanche, ils sont inférieurs aux miroirs sphériques quand il s'agit de faisceaux divergents, car alors l'aberration est très marquée, surtout si la source lumineuse n'est pas située sur l'axe du miroir.

**54. Usages des miroirs paraboliques.** — On utilise les

réflecteurs paraboliques sur les locomotives, sur les voitures publiques, dans les gares, etc. Ils servaient autrefois dans les phares (phares à réflexion); aujourd'hui on les a remplacés presque partout par des lentilles à échelons (77). Dans le télescope de Foucault, on emploie un miroir parabolique pour recevoir les rayons parallèles provenant des astres.

## RÉSUMÉ DU CHAPITRE V

Les miroirs courbes les plus simples sont les miroirs sphériques.

Les *miroirs sphériques concaves* sont constitués par une portion de surface sphérique, dont la face interne est la surface réfléchissante. Leur théorie élémentaire s'établit en supposant que l'ouverture ne comporte qu'un petit nombre de degrés. Sous cette condition, tous les rayons parallèles à l'axe principal convergent, après réflexion, en un point situé sur cet axe et appelé *foyer principal*. La distance du foyer principal au sommet du miroir est la distance focale principale; elle est égale à la moitié du rayon de courbure, quelle que soit l'incidence. Réciproquement, si un point lumineux est placé au foyer principal, tous les rayons réfléchis sont parallèles à l'axe principal.

Lorsqu'un point lumineux P est situé sur l'axe principal, au delà du centre de courbure, les rayons divergents qu'il envoie sur le miroir vont, après réflexion, couper l'axe principal en un même point P' situé entre le foyer et le centre de courbure. Les points P et P' sont réciproques l'un de l'autre; ce sont des *points conjugués*.

Ils coïncident quand le point P est placé au centre de courbure. Si le point P est placé entre le miroir et son sommet, son conjugué est virtuel; il est derrière le miroir.

Entre les distances de P et P' au sommet du miroir et la distance focale principale, on a la relation  $\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}$ . On rend cette relation générale pour les miroirs sphériques en donnant le signe + à p, p' et f quand ils correspondent à des points de concours réels, le signe - quand ils correspondent à des points de concours virtuels.

Lorsque le point lumineux P est hors de l'axe principal, son conjugué P' se trouve sur l'axe secondaire passant par le point P. Le point P' est à l'intersection de cet axe secondaire et du rayon réfléchi correspondant à un rayon partant de P et parallèle à l'axe principal.

Pour construire l'image d'une droite AP perpendiculaire à l'axe principal, on mène d'abord l'axe secondaire qui passe par l'extrémité A de la droite, puis on cherche comme précédemment le conjugué A' du point A. On abaisse ensuite la perpendiculaire A'P' sur l'axe principal. Entre ces deux dimensions linéaires on a la relation

$\frac{A'P}{AP} = \frac{p'}{p}$ . — Les images sont réelles et renversées tant que l'objet est situé au-delà du foyer principal; elles sont virtuelles et droites quand l'objet est entre le miroir et son foyer.

Lorsque des rayons convergents tombent sur un miroir concave, ils vont, après réflexion, converger en un foyer réel, situé en avant du miroir. Les images produites dans ces conditions sont réelles, droites, plus petites que l'objet qui serait formé par les rayons convergents sans l'interposition du miroir.

Les miroirs concaves sont employés comme réflecteurs, comme miroirs de toilette, etc.

Les *miroirs sphériques convexes* sont constitués par une portion de surface sphérique dont la face externe est la surface réfléchissante. Le foyer principal est virtuel; il est situé derrière le miroir. Un point lumineux situé sur l'axe principal a un foyer également virtuel situé entre le miroir et son foyer principal. Tout objet réel placé devant un miroir convexe donne une image virtuelle, droite et plus petite que l'objet.

Les miroirs paraboliques sont employés comme réflecteurs à cause de leur propriété de transformer les rayons issus d'un point placé à leur foyer en un faisceau de rayons rigoureusement parallèles à l'axe.

#### EXERCICES SUR LE CHAPITRE V

12. Une droite de 10<sup>cm</sup> de hauteur est placée perpendiculairement à l'axe principal, à 25<sup>cm</sup> d'un miroir concave dont le rayon de courbure est de 30<sup>cm</sup>. Trouver la position et la grandeur de l'image.

13. A quelle distance d'un miroir sphérique concave de 50<sup>cm</sup> de distance focale faut-il placer une petite droite lumineuse perpendiculaire à l'axe principal pour que son image soit agrandie 2 fois? On examinera successivement les cas où l'image est réelle et où l'image est virtuelle.

14. Une droite lumineuse AP, placée sur l'axe principal d'un miroir sphérique concave, fournit une image réelle A'P' de longueur égale à AP. Quelle relation y a-t-il entre les distances  $a$  et  $p$  des points A et P au sommet du miroir et la distance focale  $f$ ? Quelle est la situation de l'image A'P' par rapport à l'objet AP?

15. Une droite lumineuse de 11<sup>cm</sup> de hauteur est placée perpendiculairement à l'axe principal, à 50<sup>cm</sup> d'un miroir convexe dont le rayon de courbure est 1<sup>m</sup>. Trouver la position et la grandeur de l'image.

16. Deux miroirs sphériques, l'un concave, l'autre convexe, dont les rayons de courbure sont  $2f$  et  $2f'$ , sont disposés de manière que leurs axes coïncident et que leurs surfaces réfléchissantes se regardent.

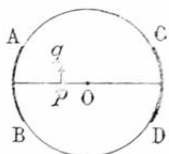


dent. La distance de leurs sommets est égale à  $d$ . En quel point de la droite qui joint les sommets faut-il placer une ligne lumineuse perpendiculaire à cette droite pour que l'image de cette ligne lumineuse donnée par le premier miroir soit égale en grandeur à l'image de la même ligne donnée par le second ?

17. On donne un miroir sphérique concave dont le rayon de courbure est  $R$ . On demande comment on devra placer un objet pour que l'image réelle ou virtuelle soit égale au tiers ou au triple de l'objet.

Même question pour un miroir convexe.

18. Dans une sphère de grand diamètre  $2r$ , on découpe deux miroirs concaves identiques  $AB$  et  $CD$ , diamétralement opposés. Un objet  $pq$  est placé près du centre; construire géométriquement les deux images dues à deux réflexions successives, c'est-à-dire l'image  $p_1q_1$  provenant des rayons réfléchis d'abord sur  $AB$ , puis ensuite sur  $CD$ , et l'image  $p_2q_2$  provenant des rayons réfléchis d'abord sur  $CD$ , puis ensuite sur  $AB$ .



On supposera ensuite  $Op = \frac{r}{4}$  et on calculera les distances au centre O des images  $p_1q_1$  et  $p_2q_2$ .

## CHAPITRE VI

### ÉTUDE DE LA RÉFRACTION

55. Définitions. — Lorsqu'un rayon lumineux passe obliquement d'un milieu homogène dans un autre milieu homogène de nature différente, il change brusquement de direction à la surface de séparation des deux milieux. On donne à ce phénomène le nom de *réfraction*.

Pour avoir une idée générale du phénomène de la réfraction, on fait pénétrer un faisceau de rayons solaires dans une chambre obscure, et on le reçoit obliquement à

travers une cuve en verre pleine d'eau (fig. 90). Le faisceau

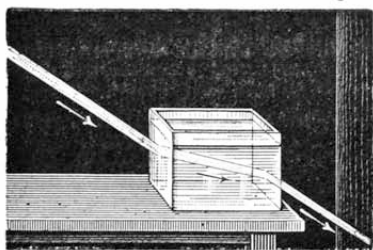


Fig. 90. — Phénomène de la réfraction.

éclairer les poussières sur son passage et marque ainsi le chemin qu'il suit. On le voit s'infléchir en pénétrant dans le liquide, puis s'infléchir en sens inverse et reprendre sa direction primitive en sortant de l'eau pour rentrer dans l'air.

Soit AB la surface de séparation de deux milieux homogènes de nature différente, l'air et l'eau par exemple (fig. 91). Un rayon incident tel que SI qui rencontre

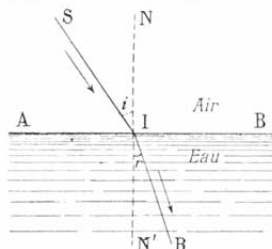


Fig. 91. — Réfraction d'un rayon lumineux.

obliquement cette surface pénètre dans le liquide en se rapprochant du prolongement de la normale IN. On appelle *plan d'incidence* le plan mené par le rayon incident SI et la normale IN au point d'incidence. L'*angle d'incidence* est l'angle SIN du rayon incident

et de la normale; l'*angle de réfraction*, l'angle RIN' du rayon réfracté IR et de la normale.

REMARQUE. — Une partie seulement de la lumière incidente se retrouve dans la lumière réfractée; l'autre partie est réfléchiée régulièrement ou diffusée à la surface de séparation des deux milieux. De plus, la lumière réfractée est toujours colorée de diverses nuances, la réfraction de la lumière blanche étant accompagnée du phénomène de la *dispersion* (408). Enfin, il existe des milieux transparents, tels que le quartz, le spath, dans lesquels plusieurs rayons réfractés peuvent correspondre à un rayon incident.

Pour simplifier l'étude de la réfraction, nous ne nous occuperons que de la direction du rayon réfracté, en admettant que la lumière qui se réfracte est simple et indécomposable, comme la lumière *jaune* émise par la combustion de l'alcool salé. Nous ne considérerons, en outre, que des milieux *mono-réfringents*, c'est-à-dire des milieux ne donnant qu'un rayon réfracté pour un rayon incident.

**56. Lois de la réfraction.** — Le phénomène de la réfraction est soumis aux deux lois suivantes, appelées lois de Descartes :

1<sup>re</sup> Loi : Le rayon réfracté est dans le plan d'incidence ;

2<sup>e</sup> Loi : Pour deux milieux déterminés, il existe un rapport constant entre le sinus de l'angle d'incidence et le sinus de l'angle de réfraction.

Ce rapport constant se nomme *l'indice de réfraction* du second milieu par rapport au premier. En le représentant par  $n$  comme on le fait habituellement, on a  $\frac{\sin i}{\sin r} = n$ , ou  $\sin i = n \sin r$ .

La valeur de  $n$  change suivant les milieux ; quand elle est plus grande que 1, on dit que le second milieu est *plus réfringent* que le premier, et le rayon réfracté se rapproche alors de la normale : il en est ainsi quand la lumière passe de l'air dans l'eau  $\left(n = \frac{4}{3}\right)$ , de l'air dans le verre ordinaire  $\left(n = \frac{3}{2}\right)$ . Quand la valeur de  $n$  est inférieure à 1, on dit que le second milieu est *moins réfringent* que le premier et le rayon réfracté s'écarte alors de la normale : c'est le cas de la lumière passant de l'eau dans l'air  $\left(n = \frac{3}{4}\right)$ , ou du verre ordinaire dans l'air  $\left(n = \frac{2}{3}\right)$ .

REMARQUE. — Lorsque l'angle d'incidence et, par suite, l'angle de réfraction ne comportent qu'un petit nombre de

degrés, on peut, sans erreur sensible, remplacer les sinus par les arcs dans la formule  $\sin i = n \sin r$ . Il vient alors la formule simple  $i = nr$ , connue sous le nom de *formule de Képler*.

### 57. Vérification approximative des lois de la réfraction.

— Les lois de la réfraction se vérifient approximativement avec l'appareil de Silbermann.

L'appareil de Silbermann que nous avons décrit (28) est construit de manière à permettre de vérifier les lois de la réfraction. On y adapte, dans ce cas, au lieu du miroir

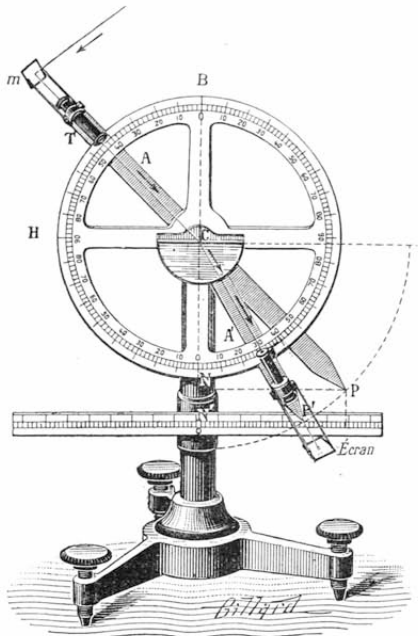


Fig. 92. — Appareil de Silbermann disposé pour vérifier les lois de la réfraction.

central, un vase demi-cylindrique en verre, limité par deux plans de verre (*fig. 92*), et on y verse de l'eau jusqu'au niveau du diamètre horizontal. En inclinant convenablement le petit miroir *m*, on dirige un étroit faisceau de rayons lumineux provenant du soleil, ou mieux d'une lampe à alcool salé, de manière qu'en suivant l'axe du tube

central, un vase demi-cylindrique en verre, limité par deux plans de verre (*fig. 92*), et on y verse de l'eau jusqu'au niveau du diamètre horizontal. En inclinant convenablement le petit miroir *m*, on dirige un étroit faisceau de rayons lumineux provenant du soleil, ou mieux d'une lampe à alcool salé, de manière qu'en suivant l'axe du tube

T il vienne ren-

contrer la surface de l'eau en C. Ce faisceau se réfracte en pénétrant dans l'eau, mais comme il se propage dans

ce liquide suivant la direction d'un rayon du cercle, il traverse *normalement*, pour sortir de l'eau, la paroi de la cuve cylindrique et l'expérience montre qu'à la sortie il n'y a pas de déviation.

Comme il est toujours possible de donner à l'alidade A' une position telle que le faisceau réfracté soit reçu sur le centre du petit écran que porte cette alidade, on voit que le faisceau réfracté reste dans le plan d'incidence, qui est parallèle au plan du cercle. La première loi se trouve ainsi vérifiée.

Pour la démonstration de la deuxième loi, l'alidade A porte un prolongement CP, dont la longueur est égale à CP'. On a

$$\sin i \text{ ou } \sin ACB = \sin PCN = \frac{PN}{CP},$$

$$\text{et } \sin r \text{ ou } \sin P'CN' = \frac{P'N'}{CP'} = \frac{P'N'}{CP},$$

$$\text{d'où } \frac{\sin i}{\sin r} = \frac{PN}{P'N'}.$$

Les longueurs PN et P'N' se mesurent à l'aide d'une règle horizontale graduée que l'on fait mouvoir le long du support vertical de l'appareil, de façon qu'elle vienne toucher successivement les pointes P et P'. On constate que, quelle que soit l'incidence, le rapport entre ces longueurs est constant et égal à  $\frac{4}{3}$ .

Nous verrons d'ailleurs que les conséquences que l'on déduit des lois de la réfraction dans l'étude des prismes et des lentilles sont toujours d'accord avec l'observation, ce qui démontre mieux encore que les vérifications directes l'exactitude de ces lois.

**58. Réfraction de la lumière dans un milieu plus réfringent.** — C'est le cas où l'indice de réfraction du second

milieu par rapport au premier est *plus grand* que 1. La formule  $\sin i = n \sin r$  montre que l'angle d'incidence est alors supérieur à l'angle de réfraction. Si  $i = 0$  (incidence normale),  $r = 0$ , donc un rayon continu son chemin en ligne droite s'il est normal à la surface de séparation. A mesure que  $i$  croît,  $r$  croît aussi, mais moins que  $i$ , et il atteint une limite déterminée  $\lambda_r$  pour  $i = 90^\circ$  (incidence rasante). Cette limite est donnée par la formule

$$n \sin \lambda_r = 1,$$

d'où 
$$\sin \lambda_r = \frac{1}{n}.$$

Si les deux milieux sont l'air et l'eau, par exemple,  $n = \frac{4}{3}$  et  $\sin \lambda_r = \frac{3}{4}$ , ce qui correspond à  $r = 48^\circ 35'$

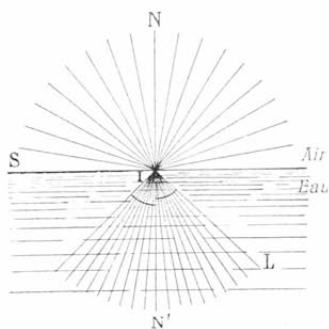


Fig. 93. — Réfraction de rayons incidents passant de l'air dans l'eau.

environ. D'après cela, IL étant le rayon réfracté correspondant à un rayon SI tombant en I sous une incidence rasante (*fig. 93*), si l'on décrit un cône avec  $IN'$  comme axe et le rayon  $IL$  comme génératrice, tous les rayons qui pénètrent dans l'eau par le point I seront compris dans son intérieur.

REMARQUE. — Nous avons vu que, si la surface qui reçoit les rayons incidents appartient à un milieu transparent, la quantité de lumière réfléchie correspondant à une même quantité de lumière incidente est d'autant plus grande que l'incidence est plus grande. Par suite, la proportion de lumière réfractée augmente à mesure que l'incidence diminue. Cette

proportion est donc très grande pour les rayons réfractés voisins de  $IN'$ ; elle est presque nulle, au contraire, pour les rayons voisins de  $IL$ .

**Construction d'Huyghens.** — La construction d'Huyghens permet de déterminer géométriquement la direction du rayon réfracté quand on connaît l'indice de réfraction et la direction du rayon incident.

Prenons le plan d'incidence pour plan de la figure. Du point d'incidence  $I$  comme centre (*fig.* 94) décrivons deux

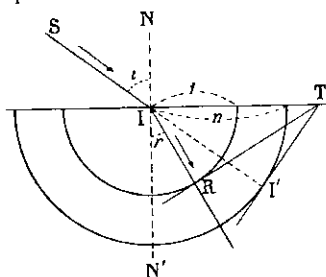


Fig. 94. — Construction d'Huyghens ( $n > 1$ ).

deux demi-circonférences ayant respectivement pour rayons l'unité et  $n$  ( $n$  étant  $> 1$ ), puis, au point  $I'$  où le prolongement du rayon incident rencontre la demi-circonférence de rayon  $n$ , menons la tangente  $I'T$ . Enfin, du point  $T$  où cette tangente rencontre la surface de séparation, menons la tangente  $TR$  à la demi-circonférence de rayon

$1$  : le point de contact  $R$  et le point d'incidence  $I$  déterminent la direction du rayon réfracté. On a en effet, dans le triangle  $IRT$ ,

$$IR = IT \sin r,$$

et dans le triangle  $IIT'$ ,

$$I'I' = IT \sin i.$$

En remplaçant  $IR$  par  $1$ ,  $I'I'$  par  $n$  et égalant les deux valeurs de  $IT$ , il vient

$$\sin i = n \sin r.$$

**59. Réfraction de la lumière dans un milieu moins réfringent.** — Soit un rayon lumineux passant de l'eau dans un milieu moins réfringent, tel que l'air. Appelons  $i$  l'angle d'incidence dans l'eau et  $r$  l'angle de réfraction dans l'air. On a

$$\sin i = n' \sin r,$$

$n'$  étant l'indice de réfraction de l'air par rapport à l'eau.

Or, le principe de la réversibilité ou du retour inverse des rayons lumineux étant applicable aux rayons réfractés,  $n' = \frac{1}{n}$ , et la formule devient

$$\sin i = \frac{1}{n} \sin r,$$

ou  $\sin r = n \sin i$ .

Lorsque  $i = 0$ ,  $r = 0$ , et le rayon traverse la surface de séparation sans subir de déviation;  $i$  et  $r$  augmentent ensuite en même temps, mais  $r$  croît plus vite que  $i$ . Lorsque  $i = 48^{\circ}35'$ ,  $\sin i = \frac{3}{4}$ ,  $\sin r = 1$  et  $r = 90^{\circ}$ , le rayon sort alors en rasant la surface de séparation. Tout rayon dont l'incidence est supérieure à  $48^{\circ}35'$  ne peut émerger dans l'air.

En général, si l'on désigne par  $\lambda_i$ , pour une substance quelconque, l'angle limite des rayons dont la réfraction est possible dans l'air, on peut écrire

$$1 = n \sin \lambda_i,$$

d'où  $\sin \lambda_i = \frac{1}{n}$ .

Pour une incidence supérieure à  $\lambda_i$ , la formule  $\sin r = n \sin i$  donnerait pour  $\sin r$  une valeur plus grande que 1, ce qui est impossible. L'expérience montre qu'alors il n'y a plus de rayon réfracté, et qu'il se produit un phénomène nouveau appelé *réflexion totale*.

**60. Réflexion totale.** — Soit un point lumineux P situé dans l'eau (*fig. 95*). Parmi les rayons issus de P, le rayon PN, qui suit la normale à la surface de séparation de l'eau et de l'air, sort sans déviation. Un rayon tel que PI, qui fait avec la normale PN un angle égal à



l'angle limite  $48^{\circ}33'$ , sort en rasant la surface de séparation. Construisons un cône ayant pour axe la normale PN et pour génératrice le rayon PI ; il contiendra tous les

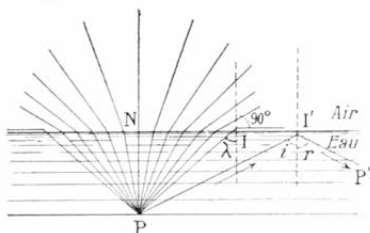


Fig. 95. — Réfraction et réflexion totale de rayons issus d'un point lumineux situé dans l'eau.

rayons dont la réfraction est possible dans l'air. Tout rayon  $PI'$  extérieur au cône tombera sur la surface de séparation sous une incidence supérieure à l'angle limite; il reviendra

dans le liquide en suivant les lois de la réflexion régulière; on dit qu'il est réfléchi *totalement*, parce que toute la lumière du rayon incident  $PI'$  se retrouve dans le rayon réfléchi  $I'P'$ .

Il est bon de remarquer que, dans le cône, une partie seulement de la lumière incidente sort du liquide; l'autre partie est réfléchi à la surface de séparation. Pour une même quantité de lumière incidente, la quantité de lumière qui est ainsi renvoyée dans l'eau est presque nulle pour le rayon incident PN et les rayons voisins; elle augmente avec l'angle d'incidence et est sensiblement égale à la quantité de lumière incidente pour les rayons tels que PI qui font avec la normale un angle égal à l'angle limite.

**Expérience montrant la réflexion totale.** — Au-dessous

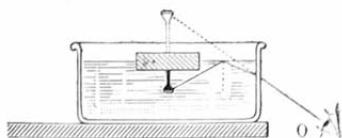


Fig. 96. — Expérience montrant la réflexion totale.

d'un bouchon plat en liège ayant environ  $3^{\text{cm}}$  de rayon on implante verticalement un clou de manière que sa partie libre ait environ  $2^{\text{cm}}$

de longueur et on fait flotter le bouchon sur l'eau

contenue dans un cristallin (fig. 96). D'après les dimensions qui viennent d'être indiquées, les rayons émis par le clou et rencontrant la surface de l'eau en dehors du bouchon ont une inclinaison supérieure à l'angle limite. Il en résulte qu'il est impossible de voir le clou par réfraction, quelle que soit la position de l'œil au-dessus de la surface de l'eau. Au contraire, en plaçant l'œil au-dessous de cette surface, en O par exemple, on recevra les rayons qui ont subi la réflexion totale et on verra au-dessus du bouchon une image virtuelle du clou.

**Applications.** — On applique le principe de la réflexion totale dans les prismes à réflexion totale et dans les fontaines lumineuses.

**PRISMES A RÉFLEXION TOTALE.** — Ce sont des prismes en verre (crown) dont la section droite est un triangle rectangle isocèle (fig. 97). Considérons un rayon lumineux SI qui tombe normalement sur la face BA.

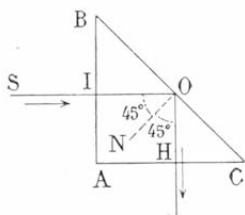


Fig. 97. — Prisme à réflexion totale.

Il entre dans le prisme sans subir de déviation, et continue sa marche en ligne droite jusqu'à l'hypoténuse BC. Là, il fait avec la normale ON un angle de  $45^\circ$ , supérieur par conséquent à l'angle limite, qui est d'environ  $42^\circ$  pour le crown; le rayon est donc réfléchi totalement, et comme il prend la direction OH normale à la face AC, il sort sans déviation.

On voit que, dans un pareil prisme, l'hypoténuse joue le rôle d'un *miroir plan*, miroir qui est *parfait* puisque la réflexion totale n'est accompagnée d'aucune perte de lumière.

Les prismes à réflexion totale se comportent de la même

manière pour les rayons qui, émanant d'un point très éloigné, tombent à peu près normalement sur l'une des faces BA de l'angle droit. Ces rayons rencontrent alors la face hypoténuse sous un angle voisin de  $45^\circ$ ; ils se réfléchissent totalement et leurs prolongements géométriques forment une image virtuelle, symétrique du point lumineux par rapport à la face hypoténuse.

Cette propriété fait employer les prismes à réflexion totale dans certains instruments d'Optique.

FONTAINES LUMINEUSES. — La figure 98 représente la fontaine de Colladon. Cet appareil se compose d'un vase cylindrique

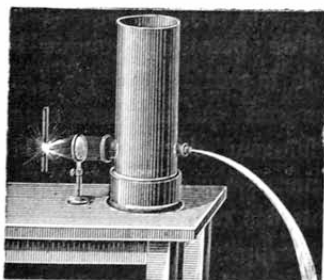


Fig. 98.— Fontaine de Colladon.

plein d'eau muni inférieurement de deux ouvertures opposées : l'une de ces ouvertures est fermée par une lame de verre ; l'autre, plus étroite, sert à l'écoulement de l'eau. A l'aide d'une lentille, on dirige horizontalement sur la lame de verre un faisceau lumineux intense, provenant par exemple de l'arc voltaïque. Les rayons qui composent ce faisceau se propagent en ligne droite jusqu'à l'orifice d'écoulement. Il semble qu'ils devraient alors quitter la veine liquide qui, elle, se courbe et prend la forme parabolique ; mais chaque rayon subit la réflexion totale, et il en est de même pour tous les nouveaux rayons qui se présentent à la surface de séparation de l'eau et de l'air. La veine liquide emprisonne donc, en quelque sorte, le faisceau lumineux et se trouve ainsi fortement éclairée. L'appareil est livré avec une série de verres de couleur que l'on peut interposer sur le trajet du faisceau avant son entrée dans la fontaine, de manière à colorer diversement la veine liquide. — Des fontaines lumineuses de ce genre ont fonctionné à Paris dans les jardins du Champ-de-Mars pendant l'Exposition de 1889. A l'Opéra de Paris et dans diverses salles de spectacles, on utilise les fontaines lumineuses pour produire des effets scéniques.

#### 61. Principaux phénomènes dus à la réfraction. —

Parmi les phénomènes naturels qui sont des effets de la

réfraction simple, nous citerons le relèvement apparent des objets immergés et le relèvement apparent des astres au-dessus de l'horizon.

**I. Relèvement apparent des objets immergés.** — Par suite de la réfraction, un objet qui se trouve dans l'eau paraît, en général, plus près de la surface qu'il ne l'est réellement.

Soit, par exemple, un bâton plongé en partie dans l'eau

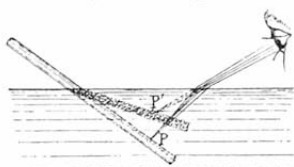


Fig. 99. — Apparence brisée d'un bâton plongé en partie dans l'eau.

(fig. 99), et considérons un petit faisceau divergent issu d'un point quelconque P de la partie immergée. Les rayons qui composent ce faisceau s'écartent de la normale en passant de l'eau

dans l'air, et les prolongements des rayons réfractés se coupent en un point P' plus rapproché de la surface que le point P. Le point P' est l'image virtuelle du point P. Comme chacun des points de la partie immergée semble relevé de même vers la surface de l'eau, on s'explique pourquoi le bâton paraît brisé au point où il pénètre dans le liquide.

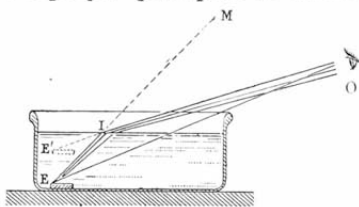


Fig. 100. — Déplacement apparent d'une pièce de monnaie vue dans l'eau.

Mettons maintenant une pièce de monnaie au fond d'une cuvette vide à parois opaques (fig. 100) et éloignons-nous jusqu'à ce qu'un rayon OE partant de l'extrémité E de la

pièce de monnaie et rasant le bord de la cuvette arrive seul à l'œil. Si, restant dans cette position, nous faisons verser doucement de l'eau dans la cuvette, la pièce devient visible dès que l'eau a atteint une certaine hauteur; elle

paraît relevée, ainsi que le fond de la cuvette. Cela tient à ce que l'œil reçoit des rayons tels que MI qui continuaient leur route en ligne droite quand la cuvette était vide, et qui subissent une réfraction les écartant de la normale maintenant que la cuvette contient de l'eau ; l'œil voit alors l'extrémité E de la pièce au point de concours E' des rayons qu'il reçoit.

REMARQUE. — Si l'on regarde verticalement un objet

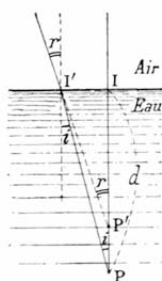


Fig. 101. — Relèvement apparent d'un point situé dans l'eau.

immergé dans l'eau, le relèvement apparent est sensiblement le quart de sa distance à la surface du liquide. Supposons en effet que l'on regarde verticalement un point P situé dans l'eau à une distance  $d$  de la surface (fig. 101). Le rayon normal PI arrive à l'œil sans déviation. Un rayon PI' très voisin arrive également à l'œil, mais en se réfractant, et son prolongement coupe le rayon PI en un point P'. Le relèvement apparent du point P est la distance PP'. On a

$$II' = d \operatorname{tg} i = IP' \operatorname{tg} r,$$

d'où

$$IP' = d \frac{\operatorname{tg} i}{\operatorname{tg} r}.$$

Comme les angles  $i$  et  $r$  sont très petits, on peut prendre sensiblement le rapport des sinus pour le rapport des tangentes, et écrire

$$IP' = d \frac{\sin i}{\sin r} = d \times \frac{1}{n} = d \times \frac{3}{4}.$$

On a, par suite, 
$$PP' = d - IP' = \frac{d}{4}.$$

II. Réfraction atmosphérique. — On sait que les couches gazeuses qui constituent l'atmosphère augmentent de densité en se rapprochant du sol. Par rapport à la marche des rayons lumineux émanés des astres, elles agissent comme des milieux différents. Il en résulte qu'un rayon, tel que SI, issu d'un astre (fig. 102), éprouve en se propageant dans l'atmosphère une série de déviations qui le

rapprochement de plus en plus de la normale. Un observateur placé en  $O$  voit l'astre suivant la direction  $OS'$  du dernier rayon réfracté. Les astres paraissent donc plus élevés sur l'horizon qu'ils ne le sont réellement.

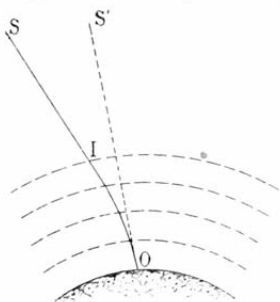


Fig. 102. — Effet de la réfraction atmosphérique.

Sous l'effet de cette réfraction atmosphérique, les astres peuvent même être visibles quand ils sont à une petite distance au-dessous de l'horizon. C'est ainsi que l'on voit le soleil tout entier, quand rien ne le masque, avant même que son sommet ait émergé au-dessus de l'horizon. La journée se trouve de ce fait allongée le matin. Elle se trouve également allongée le soir, car le soleil est encore visible un certain temps après qu'il est passé sous l'horizon. — Citons cet autre fait, bien connu des navigateurs : quand on se rend dans l'hémisphère austral, on continue à voir l'étoile polaire assez longtemps après qu'on a dépassé l'équateur.

## 62. Réfraction à travers une lame à faces parallèles.

— Lorsqu'un rayon lumineux traverse obliquement une

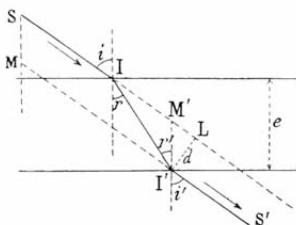


Fig. 103. — Réfraction à travers une lame à faces parallèles.

lame transparente à faces parallèles, il est déplacé sans être dévié, ou, en d'autres termes, *le rayon émergent est parallèle au rayon incident.*

Considérons une lame transparente à faces parallèles (représentée par une section perpendiculaire à ses faces) (fig. 103), et soit, dans cette section, un rayon qui part du point lumineux

S et tombe en I sur la face supérieure. En pénétrant dans la lame, ce rayon éprouve une première réfraction conforme à la loi :  $\sin i = n \sin r$  ( $n$  étant l'indice du verre par rapport à l'air). En sortant de la lame il subit une réfraction en sens inverse, et l'on a  $\sin r' = n' \sin i'$  ( $n'$  étant l'indice de l'air par rapport au verre). Or, les angles  $r$  et  $r'$  sont égaux comme alternes-internes, et d'autre part  $n' = \frac{1}{n}$ . On a, par suite,

$$\sin i' = \sin i,$$

d'où  $i' = i$ .

La direction de sortie  $I'S'$  est donc parallèle à la direction d'entrée  $SI$ .

L'expérience vérifie ce résultat. Si l'on regarde obliquement à travers une lame de verre assez épaisse posée sur des droites parallèles, toutes les droites paraissent déplacées dans le même sens, mais elles restent parallèles entre elles. En regardant normalement, on n'aperçoit aucune solution de continuité dans les lignes.

Le déplacement latéral éprouvé par le rayon incident est représenté par la perpendiculaire  $II'$ . Appelons  $d$  la longueur de cette perpendiculaire et  $e$  l'épaisseur de la lame. On a

$$d = II' \sin(i - r) \quad \text{et} \quad II' = \frac{e}{\cos r},$$

d'où  $d = \frac{e \sin(i - r)}{\cos r}$ .

Il est facile également de calculer la quantité  $SM$  dont le point  $S$ , vu à travers la lame, paraît s'être rapproché de la face d'entrée de la lame. On a

$$SM = IM' = \frac{d}{\sin i},$$

ou  $SM = \frac{e \sin(i - r)}{\sin i \cos r} = e \left( 1 - \frac{\cos i}{n \cos r} \right)$ .

Si l'angle  $i$  est très petit, le rapport  $\frac{\cos i}{\cos r}$  est très sensiblement égal à l'unité, et on peut écrire

$$SM = e \left( 1 - \frac{1}{n} \right).$$

On voit que le déplacement dépend à la fois de l'épaisseur de la lame et de son indice de réfraction.

**63. Images produites par les miroirs plans étamés ou argentés.** — Ces miroirs sont formés par un milieu réfringent (lame de verre) compris entre deux surfaces réfléchissantes (face antérieure du verre et couche étamée ou argentée). La face métallique réfléchit une fraction de la lumière incidente beaucoup plus grande que la face antérieure du verre, laquelle laisse pénétrer dans le verre une fraction considérable de la lumière incidente.

Cela posé, faisons passer un plan par un point lumineux P, perpendiculairement aux deux faces

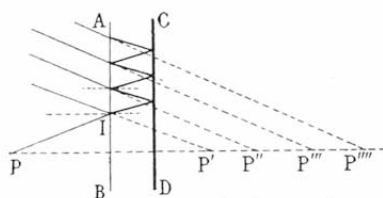


Fig. 104. — Formation des images dans un miroir plan étamé ou argenté.

d'un miroir de verre étamé ou argenté (fig. 104). Un rayon PI, issu de ce point, rencontre d'abord la première face AB, s'y réfléchit en partie et donne une image pâle P' symétrique de P par rapport à cette face. En même temps, la lumière qui a pénétré dans le verre vient tomber sur la face

métallique ; elle s'y réfléchit, puis se réfracte en passant du verre dans l'air et donne une deuxième image P'', brillante. Comme une faible fraction de la lumière précédente se réfléchit sur la face antérieure AB et retourne vers la surface métallique, il y a production d'une troisième image P''', plus pâle que la première image P', et ainsi de suite. On a ainsi une série d'images dont l'éclat va en diminuant à mesure qu'elles s'éloignent de l'image brillante P''.

En plaçant un objet brillant, comme la flamme d'une bougie, près d'une glace d'appartement et en regardant sous une incidence très oblique, on distingue nettement les images successives d'éclat décroissant. Si l'on regarde un objet



quelconque par réflexion dans une direction voisine de la normale, toutes ces images, qui sont voisines les unes des autres, se superposent en partie ; en outre, on ne voit guère que la deuxième image, parce qu'elle est de beaucoup la plus intense.

## RÉSUMÉ DU CHAPITRE VI

Lorsqu'un rayon lumineux rencontre obliquement la surface polie d'un corps transparent, une partie de la lumière pénètre dans ce corps en suivant une direction différente de celle du rayon incident. Ce phénomène est appelé *réfraction*. L'angle de réfraction est l'angle que fait le rayon réfracté avec la normale à la surface au point d'incidence.

La réfraction est soumise aux lois de Descartes :

1° *Le rayon réfracté reste dans le plan d'incidence ;*

2° *Pour deux milieux donnés, il existe un rapport constant entre les sinus des angles d'incidence et de réfraction. Ce rapport est l'indice de réfraction du second milieu par rapport au premier.*

Ces lois se vérifient surtout dans leurs conséquences, mais on peut les vérifier directement d'une façon approximative avec l'appareil de Silbermann.

Deux cas peuvent se présenter pour la réfraction :

1°  $n > 1$ . On dit alors que le second milieu est *plus réfringent* que le premier (passage de l'air dans l'eau). Le rayon réfracté se rapproche de la normale. Si  $i = 0$ ,  $r = 0$  ; si  $i = 90^\circ$ , l'angle de réfraction a une valeur plus petite  $\lambda_r$ , donnée par la formule

$$\sin \lambda_r = \frac{1}{n}.$$

2°  $n < 1$ . Le second milieu est *moins réfringent* que le premier (passage de l'eau dans l'air). Le rayon réfracté s'écarte de la normale et, l'angle de réfraction croissant plus vite que l'angle d'incidence, il arrive un moment où celui-ci atteint une valeur  $\lambda_i$  pour laquelle l'angle de réfraction est égal à  $90^\circ$ . Cette valeur de  $\lambda_i$  est

donnée par la formule  $\sin \lambda_i = \frac{1}{n}$ . Tout rayon qui fait un angle

d'incidence supérieur à cette limite  $\lambda_i$  ne subit pas de réfraction il se réfléchit régulièrement sur la surface de séparation des deux milieux et revient dans le même milieu sans qu'il y ait aucune perte de lumière. Ce phénomène est appelé *réflexion totale*.

Les prismes à réflexion totale ont pour section droite un triangle rectangle isocèle ; ils réfléchissent totalement les rayons qui tombent normalement ou presque normalement sur l'une des faces de l'angle droit.

Les principaux phénomènes dus à la réfraction sont le relèvement des objets immergés (apparence brisée d'un bâton plongé en partie

dans l'eau) et le relèvement des astres au-dessus de l'horizon.

Lorsqu'un rayon lumineux traverse obliquement une lame transparente à faces parallèles, il est déplacé sans être dévié, c'est-à-dire que le rayon émergent est parallèle au rayon incident.

### EXERCICES SUR LE CHAPITRE VI

19. On demande quel est l'indice de réfraction de l'eau par rapport au verre, sachant que l'indice du verre par rapport à l'air est  $\frac{3}{2}$ , et celui de l'eau par rapport à l'air,  $\frac{4}{3}$ .

20. Un rayon lumineux passe du verre dans l'eau. Quel angle fait-il avec la normale lorsque le rayon réfracté correspondant émerge dans l'eau en rasant la surface de séparation des deux milieux ?

21. Un rayon lumineux issu d'un point S rencontre sous une incidence de  $45^\circ$  une lame de flint-glass à faces parallèles ayant  $30^{\text{cm}}$  d'épaisseur. Calculer le déplacement latéral du rayon incident. L'indice de réfraction du flint par rapport à l'air est 1,6.

## CHAPITRE VII

### RÉFRACTION DANS LES PRISMES

64. **Définitions.** — On appelle prisme, en Optique, tout milieu transparent compris entre deux faces planes non parallèles (*fig. 105*). L'intersection  $AA'$  de ces deux faces constitue l'*arête réfringente* du prisme; l'angle dièdre qu'elles forment est l'*angle réfringent*. Le prisme est limité par une *base*, taillée parallèlement à l'arête réfringente, et qui n'intervient pas dans la marche des rayons étudiés.

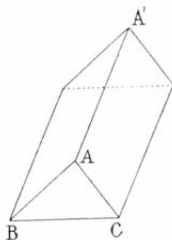


Fig. 105. — Prisme

Toute section telle que ABC, perpendiculaire à l'arête réfringente, est une *section principale*. Pour établir la théorie élémentaire du prisme, on suppose que le plan d'incidence des rayons lumineux est une section principale; on suppose de plus que la lumière incidente est *simple* et indécomposable, sans quoi il y aurait *dispersion* (108).



Fig. 106. — Prisme destiné aux expériences de cours.

Les prismes dont on se sert pour les expériences de cours se font en *crown*, verre à base de soude et de chaux (indice 1,53), ou en *flint*, cristal à base de plomb beaucoup plus réfringent que le *crown* (indice 1,60); ils sont munis d'une garniture en cuivre et sont soutenus par des supports (*fig.* 106), disposés de manière à permettre soit de les élever ou de les abaisser dans le sens vertical, soit de les faire tourner autour d'un axe vertical ou d'un axe horizontal.

65. **Marche des rayons à travers un prisme.** —

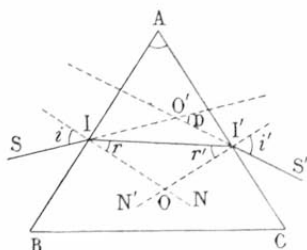


Fig. 107. — Marche d'un rayon lumineux à travers un prisme.

Considérons un rayon incident SI (*fig.* 107) contenu dans le plan d'une section principale ABC d'un prisme, et soit  $n$  l'indice de réfraction par rapport à l'air de la substance qui constitue le prisme,  $n$  étant  $> 1$ .

Le rayon SI se réfracte en restant dans le plan de la figure, et comme le milieu dans lequel il pénètre est plus réfringent que l'air, il se rapproche de la normale IN et prend une direction II' telle que l'on ait  $\sin i = n \sin r$ . Si, en I', le rayon fait avec la normale I'N' un angle plus petit que l'angle limite (59), il éprouve une nouvelle ré-

fraction et sort du prisme en s'écartant de la normale. Sa nouvelle direction  $IS'$  est toujours dans le plan de la section principale  $ABC$ ; elle est déterminée par la relation  $\sin i' = n \sin r'$ ,  $i'$  désignant l'angle d'émergence et  $r'$  l'angle que fait le rayon  $II'$  avec la normale  $IN'$ .

On voit que chacune des deux réfractions a pour effet d'abaisser le rayon vers la *base* du prisme. L'angle  $D$  que forme le prolongement du rayon émergent  $IS'$  avec le prolongement du rayon incident  $SI$  s'appelle la *déviatio*n.

Considérons maintenant un faisceau divergent très étroit issu d'un point lumineux  $P$  et dont l'axe est dans le plan d'une section principale (*fig.* 108). On pourra, soit recevoir les rayons émergents sur un écran, soit regarder le point lumineux à travers le prisme. Dans le premier cas, on obtient une image réelle, allongée, colorée des couleurs de l'arc-en-ciel si la lumière émise par le point lumineux est de la lumière

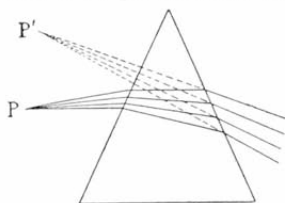


Fig. 108. — Image virtuelle donnée par un prisme.

blanche. Dans le second, l'œil placé sur le trajet des rayons émergents voit le point  $P$  en  $P'$  sur la direction prolongée de ces rayons et relevé vers l'arête réfringente. Le point  $P'$  est l'image *virtuelle* du point  $P$ . Toutefois, cette image n'est bien nette que si les rayons qui pénètrent dans l'œil et les rayons incidents correspondants sont à peu près également inclinés sur les deux faces du prisme.

Il résulte de ce qui précède qu'un prisme dont l'arête est dirigée vers le haut relève en apparence les objets que l'on regarde au travers. Les images ainsi observées sont plus ou moins confuses; elles présentent en outre des contours irisés, par suite de la dispersion.

**66. Formules du prisme.** — Pour un prisme donné, d'angle  $A$  et d'indice  $n$ , on peut considérer cinq variables: l'angle d'incidence  $i$ , l'angle d'émergence  $i'$ , les angles de réfraction intérieurs  $r$  et  $r'$ , et la déviation  $D$ . Ces

cinq variables sont liées à l'indice et à l'angle du prisme par quatre relations générales, que l'on appelle les *formules* du prisme.

On a d'abord, d'après les lois de la réfraction,

$$\sin i = n \sin r, \quad (1)$$

$$\sin i' = n \sin r'. \quad (2)$$

Dans le quadrilatère OIAI' (*fig. 107*), les angles en I et I' étant droits, les angles en A et O sont supplémentaires. Il en résulte que l'angle NOI', extérieur au quadrilatère, est égal à l'angle A du prisme. Mais cet angle NOI' est extérieur au triangle OII'. On a donc

$$r + r' = A. \quad (3)$$

Calculons maintenant la déviation.

L'angle de déviation D, extérieur au triangle IO'I', est égal à la somme  $\widehat{O'II'} + \widehat{II'O'}$ , c'est-à-dire à

$$(i - r) + (i' - r'),$$

ce qui permet d'écrire

$$D = i + i' - (r + r'),$$

ou 
$$D = i + i' - A. \quad (4)$$

Supposons l'angle d'incidence connu. L'équation (1) fera connaître la valeur de  $r$ . En portant cette valeur dans l'équation (3), on déterminera l'angle  $r'$ , ce qui permettra de calculer l'angle d'émergence  $i'$  à l'aide de l'équation (2). La déviation s'obtiendra enfin en portant dans l'équation (4) les valeurs de  $i$  et de  $i'$ . Pour un prisme donné, elle ne dépend, comme on le voit, que de l'angle d'incidence. Pour un prisme quelconque, elle dépend en outre de l'angle du prisme et de son indice de réfraction.

REMARQUE. — Si l'angle d'incidence ne comprend qu'un

petit nombre de degrés, ainsi que l'angle du prisme, les angles  $r$ ,  $r'$  et  $i'$  seront également très petits. On pourra alors remplacer les équations  $\sin i = n \sin r$  et  $\sin i' = n \sin r'$  par les équations  $i = nr$  et  $i' = nr'$ , ce qui donne

$$i + i' = n(r + r') = nA.$$

Portant cette valeur de  $(i + i')$  dans l'équation (4), il vient

$$D = A(n - 1).$$

Cette expression approchée de la déviation est indépendante de l'incidence. Nous en ferons usage dans l'étude des lentilles (73).

**67. Étude de la déviation.** — Nous venons de voir que la déviation peut être considérée d'une manière générale comme une fonction de l'angle du prisme, de son indice de réfraction et de l'incidence. Nous allons étudier *expérimentalement* l'influence de ces trois variables sur la grandeur de la déviation.

**I. Variation de la déviation avec l'angle du prisme.**

— *Pour des prismes de même nature et pour une même incidence, la déviation croît avec l'angle réfringent.* On vérifie cette proposition à l'aide d'un prisme liquide dont on peut faire varier à volonté l'angle réfringent (*prisme à angle variable*).

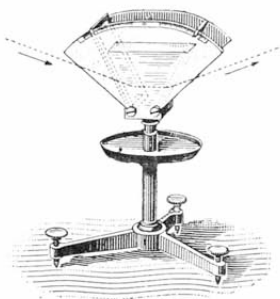


Fig. 109. — Prisme à angle variable.

C'est une petite cuve prismatique à fond plan (fig. 109), formée par deux plaques de cuivre parallèles fixées sur

un pied (sur notre figure, la plaque de devant a été supposée transparente pour qu'on voie l'intérieur du prisme). Entre ces plaques peuvent se mouvoir, autour de deux charnières horizontales, deux cadres formés par

des lames de verre. En versant de l'eau dans la cuve, et en inclinant les cadres, on a un prisme liquide, dont l'arête serait l'intersection des plans des deux lames prolongées.

Si l'on fait tomber un petit faisceau lumineux sur l'une des faces de ce prisme et si, laissant immobile la face d'entrée pour maintenir l'incidence constante, on incline de plus en plus la face de sortie, on voit que les rayons émergents sont d'autant plus relevés qu'on augmente davantage l'angle du prisme liquide.

**II. Variation de la déviation avec l'indice de réfraction.** — *Pour des prismes de même angle réfringent et pour une même incidence, la déviation croît avec l'indice de réfraction.* On le démontre avec le *polyprisme*.

Le polyprisme est formé de quatre petits prismes de

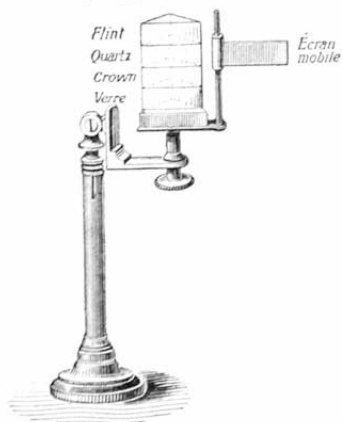


Fig. 110. — Polyprisme.

même angle, accolés par leurs sections principales (fig. 110), et constitués par des substances inégalement réfringentes (flint, quartz ou cristal de roche, crown, verre). On dispose la fente du porte-lumière parallèlement à l'arête réfringente et on fait tomber par cette fente un faisceau de rayons solaires qui rencontre à la fois tous les prismes. Chaque prisme produit une dé-

viation particulière, et les images, tout en étant parallèles à l'arête réfringente du polyprisme, ne sont pas disposées suivant une même ligne droite. La déviation la plus grande s'observe avec le flint dont l'indice est le

plus grand, puis vient celle produite par le cristal de roche, et ainsi de suite dans l'ordre des indices de réfraction décroissants.

III. Variation de la déviation avec l'incidence. — Pour un prisme d'angle et d'indice donnés, la déviation varie avec l'angle d'incidence. Elle passe par un *minimum*, correspondant au cas où l'incidence est telle que l'angle d'émergence est égal à l'angle d'incidence.

L'existence d'un minimum de déviation peut être mise facilement en évidence par l'expérience suivante. Par une des petites ouvertures du porte-lumière, on fait arriver dans une chambre noire un faisceau horizontal de lumière solaire et on reçoit ce faisceau sur le bord d'un prisme de manière que l'arête horizontale A du prisme coupe le faisceau en deux parties sensiblement égales

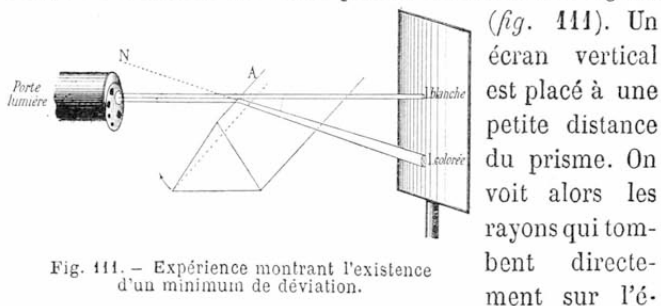


Fig. 111. — Expérience montrant l'existence d'un minimum de déviation.

cran y former une petite image blanche très brillante, tout en éclairant sur leur passage les poussières en suspension dans l'air. En même temps, les rayons qui traversent le prisme sont déviés vers sa base et vont former sur l'écran une image colorée. Comme les rayons émergents éclairent également les poussières sur leur passage, la déviation produite par le prisme est rendue manifeste.



Si l'on fait alors tourner lentement et régulièrement le prisme autour de son arête A dans le sens indiqué par la flèche, on voit l'image colorée se rapprocher progressivement de l'image fixe, ce qui montre que la déviation diminue à mesure que l'incidence augmente sur la face d'entrée. A un moment donné, et bien que l'on continue à faire tourner le prisme dans le même sens, l'image colorée reste à peu près stationnaire, puis elle revient vers son point de départ. La déviation a donc eu une valeur minima.

On démontre soit par le calcul algébrique, soit à l'aide d'instruments appelés *goniomètres*, que l'incidence spéciale correspondant à la déviation minima est celle pour laquelle le rayon incident et le rayon émergent sont également inclinés sur les deux faces du prisme (*fig. 112*).

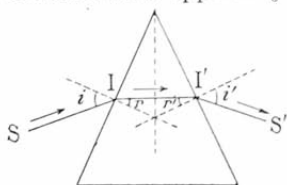


Fig. 112. — Position des rayons incident et émergent au minimum de déviation.

Les angles d'incidence et d'émergence étant alors égaux, il en est de même des angles de réfraction intérieurs. Par suite, le rayon intérieur  $II'$  est perpendiculaire à la bissectrice de l'angle du prisme.

Les angles d'incidence et d'émergence étant alors égaux, il en est de même des angles de réfraction intérieurs. Par suite, le rayon intérieur  $II'$  est perpendiculaire à la bissectrice de l'angle du prisme.

**68. Conditions d'émergence dans les prismes.** — L'indice de réfraction des prismes étant plus grand que 1, un rayon lumineux qui rencontre une des faces pénètre toujours dans le prisme, quel que soit son angle d'incidence; mais, pour qu'il puisse émerger par l'autre face, il faut que l'angle  $r'$  soit inférieur ou tout au plus égal à l'angle limite  $\lambda$  correspondant à la substance qui constitue le prisme.

Soit ABC (*fig. 113*) la section principale d'un prisme. Tous les rayons lumineux qui tombent en un point I sur la face AB pénètrent dans le prisme en se rapprochant de la normale IN; ils font avec cette normale un angle qui ne dé-

ne passe jamais  $\lambda$  ; ils sont donc toujours compris dans l'angle

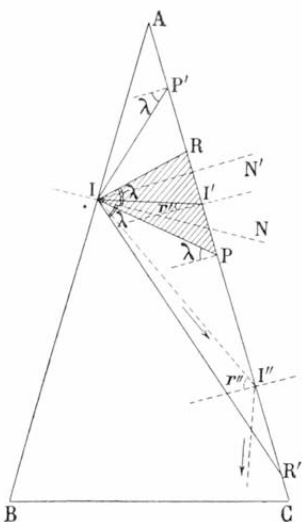


Fig. 413. — Construction du faisceau qui émerge d'un prisme.

$RIR' = 2\lambda$  qui a  $IN$  pour bissectrice. Abaissons du point  $I$  la perpendiculaire  $IN'$  sur la face d'émergence  $AC$ , et menons les deux droites  $IP$  et  $IP'$  qui font avec  $IN'$  un angle  $\lambda$ . Pour qu'un rayon  $II'$  entré dans le prisme par  $I$  puisse émerger, il faut que l'angle  $r'$  qu'il fait avec la normale en  $I$  ne soit pas supérieur à  $\lambda$  ; il faut donc que ce rayon soit compris dans l'angle  $PIP'$ . Un rayon tel que  $II''$ , extérieur à cet angle, subirait la réflexion totale, car l'angle  $r''$  qu'il ferait avec la normale serait supérieur à  $\lambda$ . En somme, un rayon qui a pénétré dans le prisme en  $I$  est astreint, par le fait même qu'il est entré, à se trouver dans l'angle  $RIR'$  ; il est astreint,

pour pouvoir sortir par la face  $AC$ , à être dans l'angle  $PIP'$  : il faut donc, pour qu'il traverse le prisme, qu'il se trouve dans la partie  $\widehat{PIR}$  commune aux deux angles. Par suite, il n'y aura un faisceau émergent qui si ces deux angles se coupent ; or ils sont tous deux égaux à  $2\lambda$  ; il faut donc que l'angle des normales  $IN$  et  $IN'$ , angle qui est égal à l'angle  $A$  du prisme, soit plus petit que  $2\lambda$ , ou au plus égal à  $2\lambda$ .

Si  $A = 2\lambda$ , le faisceau émergent se réduit aux rayons qui ont pénétré dans le prisme sous l'incidence rasante ; tous les autres se réfléchiront totalement.

Si  $A < 2\lambda$ , le faisceau émergent est d'autant plus épais que l'angle réfringent est plus petit.

Si enfin  $A > 2\lambda$ , tout rayon qui pénètre dans le prisme se réfléchit totalement sur la face d'émergence. On applique cette propriété dans les prismes à réflexion totale (60).

**69. Indices de réfraction.** — Pour déterminer expéri-

mentalement les indices de réfraction des diverses substances, on utilise généralement la relation simple qui existe entre l'angle  $A$  d'un prisme que l'on a taillé dans cette substance, son indice de réfraction  $n$  et la valeur de la déviation minima  $D$ .

Lorsqu'un prisme se trouve placé dans la position du minimum de déviation, les formules  $r + r' = A$  et  $D = i + i' - A$  deviennent  $2r = A$  et  $D = 2i - A$ . On en tire

$$r = \frac{A}{2} \quad \text{et} \quad i = \frac{D + A}{2}.$$

En remplaçant  $r$  et  $i$  par ces valeurs dans la relation  $\sin i = n \sin r$ , il vient

$$n = \frac{\sin \frac{D + A}{2}}{\sin \frac{A}{2}}.$$

On voit que, pour connaître l'indice  $n$  de la substance, il suffit de mesurer l'angle  $A$  du prisme et la déviation minima  $D$ . On emploie pour cela des appareils spéciaux appelés *goniomètres*.

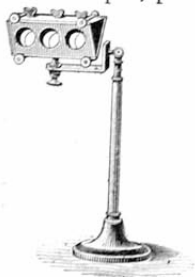


Fig. 114.— Prisme pour la détermination des indices de réfraction des liquides.

La même méthode est applicable aux liquides. On se sert alors de prismes creusés de cavités cylindriques que l'on remplit des liquides à étudier et dont on ferme les ouvertures par des lames de verre (fig. 114).

Le tableau suivant donne les *indices de réfraction* de quelques substances pour les *rayons jaunes*.

Solides		Liquides	
	Indices		Indices
Glace . . . . .	1,310	Eau distillée . . . . .	1,333
Crown-glass . . . . .	1,529	Ether ordinaire . . . . .	1,359

Solides		Liquides	
	Indices		Indices
Glace de Saint-Gobain.	1,533	Alcool absolu . . . .	1,366
Sel gemme . . . . .	1,550	Benzine . . . . .	1,413
Flint-glass . . . . .	1,605	Chloroforme . . . . .	1,449
Diamant. . . . .	2,600	Sulfure de carbone . .	1,630

**70. Applications des prismes.** — Les prismes sont employés dans une foule d'instruments d'optique; ils font partie essentielle des *spectroscopes*, instruments destinés à étudier la dispersion produite par les différentes sources lumineuses, des *chambres claires* des dessinateurs, des *goniomètres*, etc.

Les prismes à réflexion totale sont substitués avantageusement aux miroirs plans dans le télescope de Foucault (403), dans les appareils destinés à projeter des objets transparents placés horizontalement, dans les phares (77), etc.

## RÉSUMÉ DU CHAPITRE VII

On appelle *prisme* en Optique un milieu transparent limité par deux faces planes qui forment un angle dièdre. Cet angle est l'angle réfringent. Pour étudier les effets produits par le prisme, on ne considère que des rayons situés dans le plan d'une section principale, c'est-à-dire dans un plan perpendiculaire à l'arête réfringente.

Lorsqu'un rayon lumineux rencontre un prisme, il y pénètre en se rapprochant de la normale à la face d'entrée. Arrivé sur la deuxième face, s'il fait avec la normale à cette face un angle inférieur à l'angle limite, il émerge du prisme en s'écartant de la normale. Ces deux réfractions successives abaissent le rayon vers la base du prisme. La déviation est l'angle formé par le rayon émergent avec le prolongement du rayon incident.

Il y a quatre formules du prisme :  $\sin i = n \sin r$  ;  $\sin i' = n \sin r'$  ;  $r + r' = A$  ;  $D = i + i' - A$ .

La déviation ne dépend que de  $A$ ,  $n$  et  $i$  : elle croît avec l'angle du prisme (démonstration par le prisme à angle variable) et avec l'indice de réfraction (démonstration par le polyprisme); elle varie avec  $i$  et passe par un minimum, correspondant au cas où  $i = i'$ ,  $r = r'$ .

Pour déterminer expérimentalement l'indice de réfraction d'une substance solide, on y taille un prisme, et l'on mesure successive-

ment l'angle du prisme et la déviation minima. On applique ensuite

$$\text{la formule } n = \frac{\sin \frac{D+A}{2}}{\sin \frac{A}{2}}.$$

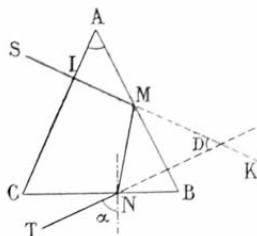
## EXERCICES SUR LE CHAPITRE VII

22. Un faisceau parallèle de rayons jaunes tombe sur l'une des faces d'un prisme sous une incidence de  $50^\circ$ . Calculer l'angle de déviation des rayons émergents. L'angle au sommet du prisme est de  $70^\circ$ . L'indice de réfraction est 1,5.

23. Un prisme de verre ordinaire dont la section droite est un triangle rectangle isocèle est placé de manière que l'une des petites faces soit verticale. Celle-ci reçoit normalement un faisceau de lumière qui se réfléchit totalement sur la face hypoténuse. On fait ensuite tourner le prisme d'un angle  $\alpha$  autour de l'arête A jusqu'à ce que les rayons incidents puissent émerger par la face hypoténuse. Quelle est la valeur minima que doit avoir  $\alpha$ ? On suppose l'indice de réfraction du verre égal à  $\frac{3}{2}$ .

24. Deux prismes d'angles A et B connus sont placés de telle sorte que le second produit, mais en sens inverse, une déviation moitié de la déviation produite par le premier. Dans chacun des prismes le rayon intérieur est dirigé perpendiculairement au plan bissecteur des deux faces. On connaît l'angle d'incidence  $i$  sur le premier prisme.

Déterminer : 1° l'angle d'incidence  $i'$  sur le second prisme ; 2° l'angle  $\alpha$  que la face de sortie du premier prisme fait avec la face d'entrée du second.



25. On a un prisme isocèle d'indice  $\frac{3}{2}$ . Un rayon lumineux homogène SI tombe normalement sur la face AC.

Quel doit être l'angle minimum A du prisme pour qu'il y ait réflexion totale en M? Le rayon vient alors en N. Emergera-t-il, et quel sera l'angle  $\alpha$  de sortie avec la normale en N?

Calculer, en outre, l'angle D formé par le rayon émergent NT avec le prolongement MK du rayon incident.

## CHAPITRE VIII

## RÉFRACTION DANS LES LENTILLES

**71. Définition et classification.** — On appelle lentilles des milieux réfringents limités par deux surfaces sphériques ou par une surface sphérique et une surface plane.

Dans le premier cas, l'*axe principal* est la droite qui passe par les centres des deux surfaces sphériques; dans le second, c'est la perpendiculaire menée du centre de la surface sphérique sur la surface plane.

Les lentilles se divisent en deux groupes : les lentilles *convergentes* et les lentilles *divergentes*.

Les lentilles convergentes ont la propriété essentielle de faire converger les rayons vers l'axe. On les appelle aussi lentilles à *bords minces* parce que leur épaisseur décroît depuis le milieu jusqu'aux bords. — Elles com-

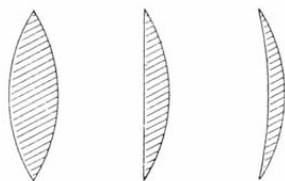


Fig. 115. — Types de lentilles convergentes.

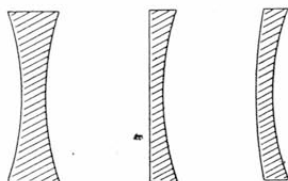


Fig. 116. — Types de lentilles divergentes.

prennent trois types (*fig. 115*) : la lentille *biconvexe*, limitée par deux surfaces sphériques; la lentille *planoconvexe*, limitée par une surface sphérique et une surface plane; et la lentille périscopique convexe ou *ménisque*

*convergent*, limitée par deux surfaces sphériques dont les centres sont situés du même côté, la face concave ayant un rayon plus grand que la face convexe.

Les lentilles divergentes tendent, au contraire, à faire diverger les rayons de l'axe. Ce sont des lentilles à *bords épais*, dont l'épaisseur décroît depuis les bords jusqu'au milieu. Elles comprennent également trois types (*fig. 116*) : la lentille *biconcave*, la lentille *plan-concave* et la lentille périscopique concave ou *ménisque divergent*.

## LENTILLES CONVERGENTES.

**72. Définitions.** — Dans les conditions où l'on se place pour étudier les lentilles, les propriétés des lentilles convergentes sont les mêmes pour les trois types de ce groupe. Nous n'étudierons spécialement que les lentilles biconvexes.

On appelle *centres de courbure* d'une lentille biconvexe les centres des calottes sphériques qui limitent la lentille. Toute section faite par un plan passant par l'axe principal est une *section principale*.

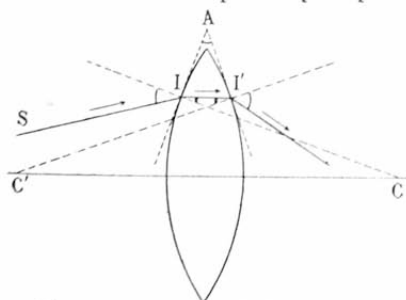


Fig. 117. — Marche générale d'un rayon dans une lentille convergente.

Prenons une section principale pour plan de la figure (*fig. 117*) et considérons dans ce plan un rayon lumineux *SI* qui rencontre la lentille. Soient *C* et *C'* les centres

de courbure. Le rayon *SI* éprouve, en pénétrant dans la lentille, une première réfraction suivant *I'I'*, qui le

rapproche de la normale IC. En I', il émerge et s'écarte de la normale I'C'. Ces deux réfractions successives ont pour effet, l'une et l'autre, de rejeter le rayon vers l'axe principal tout en le laissant dans le plan d'incidence. Cela posé, menons aux points d'incidence et d'émergence des plans tangents aux surfaces courbes; ces plans se rencontrent du côté opposé à l'axe et forment un prisme d'angle A. On voit que la lentille a produit sur le rayon lumineux SI le même effet qu'un prisme d'angle A.

Comme on peut substituer aux surfaces courbes qui limitent la lentille une infinité d'éléments plans infiniment petits, une lentille biconvexe (et en général une lentille convergente) peut être assimilée à un assemblage de prismes dont les bases sont toujours du côté de l'axe. On conçoit ainsi que les rayons soient déviés vers cette région.

Pour établir la théorie élémentaire des lentilles, on admet :

1° Qu'elles sont suffisamment *minces* pour qu'on puisse négliger leur épaisseur;

2° Qu'elles ne reçoivent que des rayons *centraux*, c'est-à-dire des rayons peu éloignés de l'axe principal, parallèles à cet axe ou faiblement inclinés sur sa direction.

Nous étudierons la marche des rayons qui tombent sur la lentille dans le plan d'une section principale, comme nous l'avons fait pour les miroirs sphériques, et nous supposerons que les deux faces de la lentille sont toujours baignées par l'air. Une lentille mince sera représentée par une simple ligne perpendiculaire à l'axe principal; nous supposerons cette ligne aussi grande qu'il sera nécessaire pour faciliter les constructions et nous la terminerons par deux pointes de flèche, comme ci-contre, pour indiquer que la lentille est convergente. Les deux déviations successives qu'éprouve un rayon lumineux,





l'un à l'entrée, l'autre à la sortie d'une lentille, seront remplacées par une seule déviation se produisant au point où le rayon rencontre la ligne qui représente la coupe de la lentille infiniment mince par une section principale.

**73. Réfraction des faisceaux de rayons parallèles.** — Nous étudierons successivement la réfraction des rayons parallèles à l'axe principal et des rayons parallèles de direction quelconque.

**I. Rayons parallèles à l'axe principal.** — Lorsqu'une lentille convergente reçoit un faisceau de rayons parallèles à l'axe principal, l'expérience et le calcul montrent qu'ils vont très sensiblement converger, après réfraction,

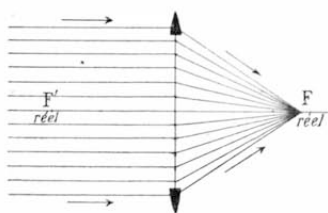


Fig. 418. — Réfraction d'un faisceau de rayons parallèles à l'axe principal.

en un point unique  $F$  situé sur l'axe principal (fig. 418). Ce point est un *foyer principal* et sa distance à la lentille est la *distance focale principale*. Elle dépend, pour une même lentille, des rayons de courbure et de l'indice de réfraction.

Comme les rayons parallèles peuvent tomber sur l'une ou l'autre face de la lentille, il y a *deux foyers principaux*. Ces foyers sont tous deux réels, et on démontre qu'ils sont placés de part et d'autre à la *même distance* de la lentille quand elle est d'une épaisseur négligeable.

Réciproquement, si l'on place un point lumineux en  $F$  ou en  $F'$ , les rayons qui tombent sur la lentille émergent du côté opposé au point lumineux et forment un faisceau parallèle à l'axe principal.

**PUISSANCE D'UNE LENTILLE.** — On appelle *puissance*, ou encore *convergence* d'une lentille, l'inverse de sa distance

focale. La puissance d'une lentille convergente est positive; en la représentant par  $P$ , on a

$$P = \frac{1}{f}.$$

La puissance d'une lentille s'évalue en *dioptries*. La dioptrie est la puissance d'une lentille ayant 1<sup>m</sup> de distance focale. D'après cela, la puissance d'une lentille convergente ayant 0<sup>m</sup>,10 de distance focale est de  $\frac{1}{0,10} = 10$  dioptries.

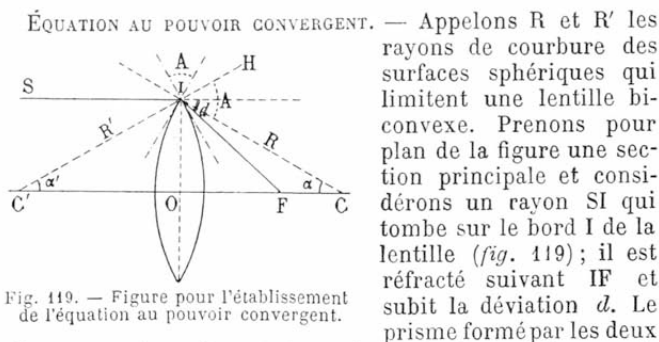


Fig. 119. — Figure pour l'établissement de l'équation au pouvoir convergent.

plans tangents en  $I$  peut être substitué à la lentille pour le rayon  $SI$ . La déviation qu'il produirait est précisément égale à  $d$ , et comme l'ouverture du prisme et l'incidence sont très petites, cette déviation est donnée par la formule

$$d = (n - 1)A \quad (66).$$

En nous plaçant toujours dans l'hypothèse des petits angles, nous pouvons confondre l'angle  $d$  avec sa tangente, et écrire  $d = \frac{IO}{OF}$ . D'un autre côté, l'angle  $A$  du prisme est égal à l'angle  $CIH$ , lequel est extérieur au triangle  $CIC'$ . Nous avons donc

$$\frac{IO}{OF} = (n - 1)(\alpha + \alpha') = (n - 1)\left(\frac{IO}{OC} + \frac{IO}{OC'}\right),$$

ou, en considérant l'épaisseur de la lentille comme négligeable,

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left( \frac{1}{R} + \frac{1}{R'} \right).$$

Telle est l'équation au pouvoir convergent.

Si les rayons de courbure sont égaux, l'équation devient

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \frac{2}{R},$$

d'où l'on tire 
$$f = \frac{R}{2(n-1)}.$$

Enfin, si l'on suppose de plus que la lentille est en crown (indice  $n = \frac{3}{2}$ ),  $f = R$ . On voit que dans ce cas particulier les foyers principaux coïncident avec les centres de courbure.

**DÉTERMINATION EXPÉRIMENTALE DE LA DISTANCE FOCALE PRINCIPALE.** — On peut obtenir *approximativement* la distance focale principale d'une lentille convergente en l'orientant de manière que son axe principal soit dirigé vers le centre du soleil et en cherchant avec un petit écran blanc et opaque la région où l'image du soleil se forme avec netteté. Cette image est un petit cercle perpendiculaire à l'axe principal; son centre est le foyer principal de la lentille.

La distance focale d'une lentille se mesure avec précision à l'aide d'instruments appelés *focomètres* (74).

**II. Rayons non parallèles à l'axe principal.** — Avant d'étudier la réfraction de ces rayons, nous allons montrer qu'il existe, dans toute lentille d'épaisseur négligeable, un point jouissant de cette propriété que, pour tout rayon incident dont la direction passe par ce point, le rayon émergent est dans le prolongement du rayon incident. Ce point, situé sur l'axe principal, est appelé le *centre optique* de la lentille.

Menons dans le plan d'une section principale d'une lentille biconvexe deux rayons de courbure parallèles  $CI$  et  $CI'$

(fig. 120), et joignons les points I et I'. La droite II' coupe l'axe principal en un certain point O. Les éléments des plans tangents en I et en I' sont parallèles entre eux

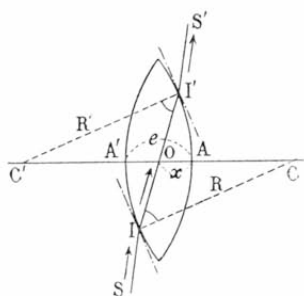


Fig. 120. — Détermination du centre optique d'une lentille convergente.

comme étant perpendiculaires à deux droites parallèles. D'après cela, un rayon qui rencontre la lentille de manière à la traverser suivant II' se comporte comme s'il traversait une lame à faces parallèles. Il émerge dans une direction S'I' parallèle à SI et ne subit qu'un simple déplacement latéral ; c'est un rayon *sans déviation*.

Les triangles semblables COI et C'O'I' donnent

$$\frac{CO}{C'O} = \frac{R}{R'}$$

On voit que la distance des centres est divisée par le point O en deux segments proportionnels aux rayons de courbure ; la position de ce point est donc *indépendante* de la direction particulière donnée aux deux rayons de courbure considérés. Par suite, tout rayon qui traverse la lentille en passant par le point O sort sans déviation et ne subit qu'un déplacement latéral. Si la lentille est très mince, le déplacement latéral est négligeable et le rayon émergent peut être considéré comme le *prolongement* du rayon incident.

On peut déterminer facilement la position du centre optique d'une lentille biconvexe. Posons  $OA = x$ ,  $AA' = e$  ; on a  $CO = R - e + x$ ,  $C'O = R' - x$ . Portons ces valeurs dans la proportion précédente ; elle devient

$$\frac{R - e + x}{R' - x} = \frac{R}{R'}$$

d'où 
$$x = \frac{R'e}{R + R'}$$

Dans une lentille infiniment mince,  $x$  est négligeable et le centre optique se confond avec A et A'.

**PLANS FOCaux.** — Si l'on fait tomber sur une lentille convergente un faisceau de rayons parallèles de direction quelconque, mais peu inclinés sur l'axe principal, ils vont converger, après réfraction, en un foyer unique, situé sur le rayon qui passe par le centre optique.

En effet, ce rayon traverse la lentille sans déviation (fig. 121); c'est l'axe *secondaire* du faisceau considéré. D'un autre côté, le rayon qui passe par le foyer principal F' sort parallèlement à l'axe principal; le point F<sub>1</sub> où il coupe

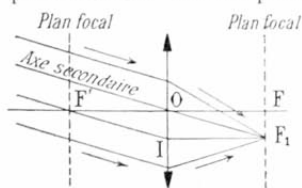


Fig. 121. — Réfraction de rayons parallèles peu inclinés sur l'axe principal.

l'axe secondaire est le foyer cherché. La figure F'OF<sub>1</sub>I étant un parallélogramme, on a IF<sub>1</sub> = OF' = OF. Le point F<sub>1</sub> se trouve donc dans le plan mené par F perpendiculairement à l'axe principal. Ce plan contient les foyers de tous les axes secondaires qui passent en O;

c'est un *plan focal*. Un second plan focal, réel également, passe par le foyer F' de l'autre côté de la lentille.

Les deux plans focaux d'une lentille convergente jouissent de la propriété suivante : tous les rayons issus d'un point lumineux situé dans un de ces plans émergent de la lentille parallèlement à l'axe secondaire qui passe par le centre optique et le point lumineux.

**74. Réfraction des faisceaux divergents.** — Nous suivrons, dans cette étude, la même marche que pour les miroirs sphériques concaves.

**I. Point lumineux situé sur l'axe principal.** — Lorsqu'une lentille convergente reçoit un faisceau de rayons divergents issus d'un point lumineux P situé sur l'axe

principal, l'expérience et le calcul montrent encore qu'ils vont très sensiblement converger, après réfraction, en un point unique  $P'$  situé sur l'axe principal. Ce point est le *foyer conjugué* du point  $P$ . Si le point lumineux était porté en  $P'$ , son conjugué serait en  $P$  : les points  $P$  et  $P'$  sont donc des *points conjugués*.

Le foyer conjugué d'un point lumineux  $P$  situé sur l'axe principal est à l'intersection de cet axe et d'un rayon réfracté. Pour trouver géométriquement la position de ce foyer, on considère un rayon incident quelconque  $PI$

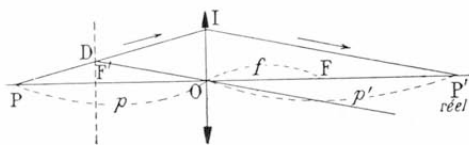


Fig. 122. — Construction géométrique du foyer conjugué d'un point lumineux situé sur l'axe principal.

(fig. 122), et on mène le plan focal du même côté de la lentille. Le rayon  $PI$  se comporte comme s'il par-

tait du point  $D$  situé sur le plan focal ; il émergera donc parallèlement à  $DO$ . Le point  $P'$  où le rayon émergent coupe l'axe principal est le foyer conjugué du point  $P$ . — On voit d'après cette construction que, pour un même point d'incidence  $I$ , plus le point  $P$  se rapproche de  $F'$ , plus le point  $D$  s'en rapproche aussi. La droite  $DO$  fait donc avec l'axe principal un angle de plus en plus petit et, comme il en est de même de la parallèle  $IP'$ , le point  $P'$  s'éloigne de plus en plus de la lentille. Si le point  $P$  arrive au foyer  $F'$ , tous les rayons réfractés sont parallèles à l'axe principal. S'il dépasse le foyer  $F'$ , le conjugué  $P'$  se trouve du même côté de la lentille que  $P$  et il est *virtuel*.

Soit en effet un rayon  $PI$  issu d'un point lumineux  $P$  situé entre la lentille et l'un de ses foyers  $F'$  (fig. 123). Prolongeons ce rayon jusqu'à la trace du plan focal pas-

sant par  $F'$ . Le rayon réfracté sera  $IP'$  parallèle à l'axe secondaire  $DO$ . Le point  $P'$  est le conjugué *virtuel* du point  $P$ .

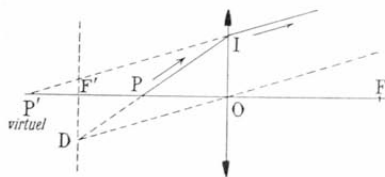


Fig. 123. — Construction géométrique du foyer conjugué d'un point lumineux situé entre la lentille et l'un de ses foyers.

ÉQUATION AUX FOYERS CONJUGUÉS. —

POSONS  $OP = p$ ,  
 $OP' = p'$ ,  $OF = f$   
 (fig. 122).

Les triangles semblables  $POD$  et  $PP'I$  donnent la relation

$$\frac{p}{p + p'} = \frac{OD}{P'I}.$$

Les triangles  $OF'D$  et  $P'IO$  sont aussi semblables et donnent

$$\frac{f}{p'} = \frac{OD}{P'I}.$$

On a, par suite,

$$\frac{p}{p + p'} = \frac{f}{p'},$$

d'où

$$p'f + pf = pp'.$$

Divisant les deux membres par le produit  $pp'f$ , il vient

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}.$$

Or,  $p$  étant constant ainsi que  $f$ ,  $p'$  est aussi constant. Donc la position de  $P'$  est *indépendante* de la direction du rayon considéré.

La relation précédente s'appelle l'*équation aux foyers conjugués*. Elle est générale pour les lentilles minces, à condition de compter les distances  $p$ ,  $p'$  et  $f$  *positivement*

quand elles se rapportent à des points réels, *négativement* quand elles se rapportent à des points virtuels.

De l'équation aux foyers conjugués on tire

$$p' = \frac{f}{1 - \frac{f}{p}}.$$

Cette formule peut être discutée en donnant à  $p$  diverses valeurs et cherchant les valeurs correspondantes de  $p'$ . Dans le cas où  $f > p > 0$ , il faut, d'après la convention établie plus haut, compter  $p'$  négativement. On est ainsi conduit à la formule

$$p' = \frac{f}{\frac{f}{p} - 1},$$

qui donne pour  $p'$  des valeurs positives et parfaitement admissibles pour toutes les valeurs de  $p$  inférieures à  $f$ .

Si, au lieu de compter les distances des points conjugués au centre optique de la lentille, on les compte à partir des foyers, on retrouve la formule de Newton :  $dd' = f^2$  (43).

## II. Point lumineux situé hors de l'axe principal. —

L'expérience montre que le foyer conjugué d'un point lumineux situé hors de l'axe principal est situé sur son axe secondaire, à l'intersection de cet axe secondaire et d'un rayon réfracté.

Pour trouver géométriquement la position du conjugué

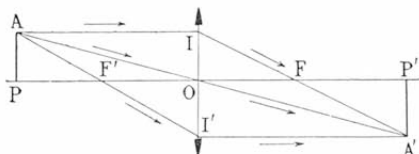


Fig. 124. — Construction géométrique du foyer conjugué d'un point lumineux situé hors de l'axe principal.

d'un point lumineux A (fig. 124), on mène d'abord l'axe secondaire AO, puis un rayon AI parallèle à l'axe principal. Le

rayon AI passe, après réfraction, par le foyer F; son intersection A' avec l'axe AO détermine le conjugué du point A. On pourrait aussi considérer le rayon passant



par  $F'$  : il émerge parallèlement à l'axe principal et aboutit également au point  $A'$ .

**DROITES CONJUGUÉES.** — Abaissons des points  $A$  et  $A'$  les perpendiculaires  $AP$  et  $A'P'$  sur l'axe principal. Les triangles semblables  $I'OF'$  et  $I'IA$ ,  $IOF$  et  $II'A'$  donnent les relations

$$\frac{f}{AI} = \frac{OI'}{II'} \quad \text{et} \quad \frac{f}{A'I'} = \frac{OI}{II'}$$

En ajoutant ces relations, il vient

$$\frac{f}{AI} + \frac{f}{A'I'} = \frac{OI + OI'}{II'} = \frac{II'}{II'}$$

ou

$$\frac{1}{AI} + \frac{1}{A'I'} = \frac{1}{f}$$

Or, la distance  $AI$  étant constante pour tout point pris sur la droite  $AP$ , la distance  $A'I'$  est aussi constante et le foyer conjugué d'un point pris sur  $AP$  doit se trouver sur  $A'P'$ . Inversement, les points  $A$  et  $A'$  étant conjugués deux à deux, tout point pris sur  $A'P'$  a son conjugué sur  $AP$ . Les droites  $AP$  et  $A'P'$  sont des *droites conjuguées*. La figure 124 montre qu'elles sont vues du centre optique sous le même angle.

Le *grossissement linéaire*  $\frac{A'P'}{AP}$  se définit comme pour les miroirs. D'après les triangles semblables  $OAP$  et  $OA'P'$ , il est égal à  $\frac{p'}{p}$ .

**PLANS CONJUGUÉS.** — Si l'on fait tourner le plan de la figure autour de l'axe principal, les droites  $AP$  et  $A'P'$  engendrent deux plans perpendiculaires à l'axe principal. Ces plans sont *conjugués* : toute figure prise dans l'un a son image dans l'autre. Entre les dimensions superficielles de la figure et de son image, on a la relation

$$\frac{s'}{s} = \frac{p'^2}{p^2}$$

III. Images produites par les faisceaux divergents. — Nous considérerons encore le cas le plus simple, celui où l'objet est une petite droite  $AP$  perpendiculaire à l'axe principal et limitée à cet axe. Il suffira pour avoir l'image de déterminer le foyer conjugué  $A'$  du point  $A$ , et d'abaisser une perpendiculaire du point  $A'$  sur l'axe principal, car l'image de  $AP$  est une droite perpendiculaire à l'axe principal.

1° *La distance de l'objet  $AP$  à la lentille est plus grande que le double de la distance focale principale.* — La construction géométrique

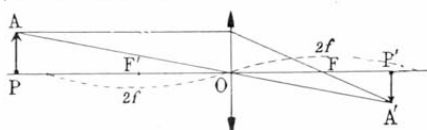


Fig. 125. — Construction géométrique de l'image d'un objet placé au delà du double de la distance focale principale.

montre que l'image est réelle, renversée, plus petite que l'objet (fig. 125); sa distance

à la lentille est supérieure à la distance focale principale, mais inférieure au double de cette distance.

Si la distance de l'objet  $AP$  à la lentille diminue, l'image  $AP'$  s'éloigne de la lentille et grandit.

2° *La distance de l'objet  $AP$  à la lentille est égale à  $2f$ .* — En faisant une construction analogue à la précédente, on verrait que, dans ce cas, l'image est réelle, renversée, égale à l'objet, symétrique de l'objet par rapport au centre optique.

3° *La distance de l'objet  $AP$  à la lentille, tout en étant supérieure à  $f$ , est inférieure à  $2f$ .* — C'est la réciproque du premier cas. L'image est encore réelle, renversée par rapport à l'objet, mais elle est plus grande que l'objet. A mesure que  $AP$  se rapproche du plan focal, son image s'éloigne de la lentille et grandit.

4° *La distance de l'objet  $AP$  à la lentille est égale à  $f$ .*

— L'image est à une *distance infinie*, ou plutôt il n'y a plus d'image, à proprement parler. Les rayons issus du point A, par exemple, émergent de la lentille parallèlement à l'axe secondaire de ce point.

5° L'objet AP est placé entre la lentille et le foyer principal F'. — L'image est alors virtuelle, droite et plus grande que l'objet (fig. 126).

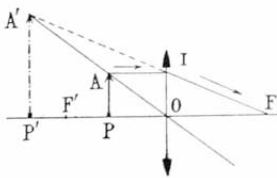


Fig. 126. — Construction géométrique de l'image d'un objet placé entre la lentille et le foyer F'.

D'après la construction générale, on voit que IA étant inférieur à OF', les prolongements de l'axe secondaire OA et du rayon réfracté IF se coupent du même côté que l'objet et au-delà du point A.

L'image ne peut être reçue sur un écran ; on l'aperçoit en plaçant l'œil du côté du foyer F, sur le trajet des rayons divergents. Plus l'objet se rapproche de la lentille, plus l'image s'en rapproche aussi. Enfin, si l'objet est placé contre la lentille, l'image se forme contre la lentille et elle est égale à l'objet.

Tous ces résultats sont résumés dans le tableau suivant :

OBJET AP Position	IMAGE A'P'			
	Position	Nature	Direction	Grandeur
$p = \infty$	$p' = f$	Réelle.	Renversée.	Infin <sup>t</sup> diminuée.
$\infty > p > 2f$	$f < p' < 2f$	Id.	Id.	Plus petite.
$p = 2f$	$p' = 2f$	Id.	Id.	Egale.
$2f > p > f$	$2f < p' < \infty$	Id.	Id.	Plus grande.
$p = f$	$p' = \pm \infty$	Réelle.	Renversée.	Infin <sup>t</sup> agrandie.
$f > p > 0$	$p' < 0$	Virtuelle.	Droite.	Plus grande.
$p = 0$	$p' = 0$	Id.	Id.	Egale.

IV. Verifications expérimentales. — Les lentilles destinées aux expériences de cours se construisent, comme



Fig. 127. — Lentille destinée aux expériences de cours.

les prismes, en crown ou en flint. Leur monture est ordinairement en laiton. Le plus souvent on les assujettit dans une bague (*fig. 127*) qui est fixée dans un demi-cercle de manière à permettre d'orienter la lentille dans un plan quelconque. Le demi-cercle est fixé lui-même à une colonne que l'on peut élever ou abaisser à volonté à l'intérieur d'un pied lourd.

Pour vérifier approximativement les résultats relatifs aux images formées par les faisceaux divergents, on se sert, comme pour les miroirs concaves, d'un écran blanc opaque et d'une source lumineuse quelconque (bougie, bec de gaz, lampe à pétrole).

La flamme étant disposée de manière que son milieu se

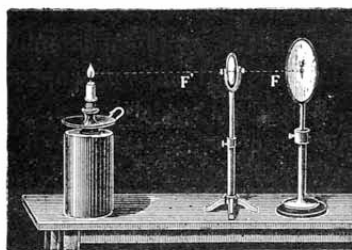


Fig. 128. — Image réelle donnée par une lentille convergente (image plus petite que l'objet).

trouve sensiblement sur l'axe principal de la lentille convergente, on cherche par tâtonnement avec l'écran, de l'autre côté de la lentille, le lieu où l'image se forme avec le plus de netteté. On constate ainsi que, la flamme étant

éloignée le plus possible, l'image formée sur l'écran est petite et renversée (*fig. 128*). Si la flamme est approchée jusqu'au double de la distance focale, l'image est de même grandeur. En conduisant peu à peu la flamme jus-

qu'au foyer, on constate que la distance de l'écran à la

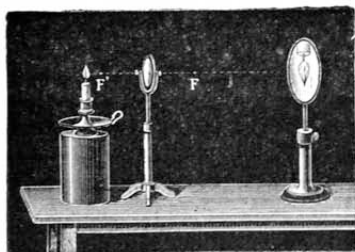


Fig. 129. — Image réelle donnée par une lentille convergente (image plus grande que l'objet).

distance de l'écran à la lentille doit être plus grande que  $2f$  pour qu'on ait une image nette, laquelle est renversée et agrandie (fig. 129). Enfin, quand la distance de la flamme est inférieure à  $f$ , il ne se forme plus d'image réelle; mais l'œil placé au delà de la lentille sur

le trajet des rayons divergents voit une image virtuelle, droite et agrandie.

Il faut remarquer que, dans tous les cas où les images sont

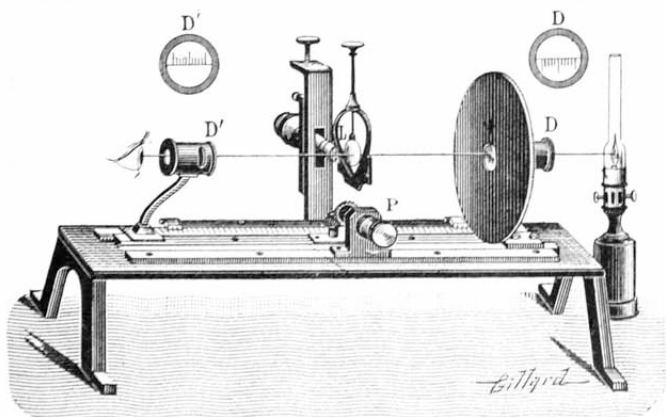


Fig. 130. — Focomètre de Silbermann.

réelles, on peut supprimer l'écran et les regarder directement. L'œil doit alors être placé dans le cône des rayons lumineux qui divergent au delà de l'image. Les images vues ainsi directement (images *aériennes*) ne sont pas vues en

dehors de ce cône, tandis que les images réelles reçues sur un écran sont visibles par diffusion dans toutes les directions.

**DÉTERMINATION EXACTE DE LA DISTANCE FOCALE PRINCIPALE D'UNE LENTILLE CONVERGENTE.** — On détermine avec précision cette distance à l'aide des *focomètres*. Ils sont fondés sur ce fait qu'un objet lumineux placé perpendiculairement à l'axe principal à une distance  $2f$  d'une lentille donne de l'autre côté, à la même distance  $2f$ , une image égale et renversée.

La figure 130 représente le focomètre de Silbermann, modèle perfectionné construit par Pellin. Il se compose d'une table portant une règle graduée le long de laquelle sont montés deux supports : ces supports peuvent être déplacés en même temps par un pignon P actionnant deux crémaillères ; ils soutiennent des bonnettes renfermant chacune une lentille convergente et un demi-disque en verre dépoli divisé en dixièmes de millimètres. Les divisions des demi-disques sont identiques, mais disposées en sens inverses. La lentille L dont on veut déterminer la distance focale est maintenue par un support fixe. On éclaire le demi-disque D avec une lampe, puis on déplace à la fois les supports des demi-disques en les maintenant à égale distance de la lentille jusqu'à ce que les traits du demi-disque D soient exactement dans le prolongement de ceux du demi-disque D'. La distance entre les deux demi-disques est alors égale à  $4f$  ; elle se mesure sur la règle graduée.

**75. Réfraction des faisceaux convergents.** — Considérons un faisceau de rayons convergents qui, s'ils étaient

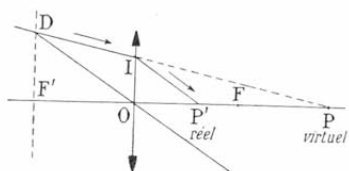


Fig. 131. — Construction géométrique du conjugué du sommet d'un faisceau de lumière convergente.

libres, iraient converger en un point P situé sur l'axe principal d'une lentille convergente (fig. 131). La construction ordinaire montre que ces rayons, devenus plus convergents après ré-

fraction, vont converger en un point P' situé entre la lentille et le foyer F.



plaçant devant la surface des lentilles des diaphragmes noirs percés d'une ouverture qui ne laisse passer que les rayons centraux. On arrive même à détruire complètement l'aberration en accolant deux lentilles convenablement choisies ; le système ainsi obtenu est dit *aplanétique*.

Dans la pratique, on obtient un aplanétisme très suffisant par l'emploi des *lentilles à échelons* (77).

**77. Applications des lentilles convergentes.** — Les lentilles convergentes constituent la partie essentielle de presque tous les instruments d'optique tels que loupes, microscopes, lunettes, appareils de projection, appareils photographiques, etc. On les utilise sous la forme de *lentilles à échelons* pour concentrer en un même point la chaleur solaire et, dans les phares, pour envoyer des rayons parallèles à de grandes distances.

Les lentilles à échelons comprennent une lentille centrale plan-convexe, entourée d'une série de couronnes concentriques en verre également

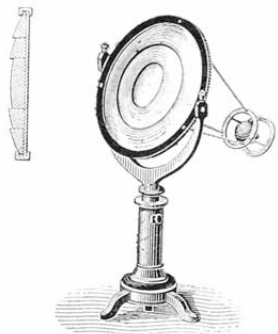


Fig. 133. — Lentille à échelons destinée à concentrer la chaleur solaire.

plan-convexes (*fig. 133*) soudées entre elles avec de la colle de poisson. La face plane de chaque couronne est située du même côté que la face plane de la lentille centrale, et la courbure de la face opposée est calculée de telle sorte que le foyer de la couronne coïncide avec le foyer de cette lentille.

La figure 133 représente une lentille à échelons montée sur pied et munie d'un porte-crauset pour la fusion des métaux.

**Phares.** — Dans les *phares*, la source lumineuse, ordinairement un arc voltaïque, est placée au foyer commun de plusieurs systèmes de lentilles à échelons (*fig. 134*). Tous les rayons émergents sont parallèles entre eux et l'éclairement qu'ils produisent peut être transmis à une grande distance.



Un mécanisme d'horlogerie fait mouvoir le système de lentilles d'un mouvement uniforme autour de la source lumineuse de manière à éclairer successivement tous les points de l'horizon. Suivant la rapidité

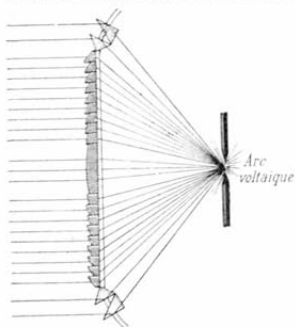


Fig. 134. — Coupe de l'une des lentilles à échelons d'un phare.

du mouvement, la durée des éclipses intermittentes qui se produisent pour un même point de l'horizon est plus ou moins grande, et c'est cette durée qui sert à distinguer les phares entre eux ou bien d'avec un feu accidentel. Dans beaucoup de phares on place d'ailleurs des verres colorés devant les systèmes de lentilles. Les colorations des feux, ainsi que les intervalles de leurs éclipses,

sont réglementés pour chaque phare et connus des marins.

On ajoute ordinairement aux lentilles des phares une série de prismes à réflexion totale convenablement inclinés (fig. 134). Ces prismes ont pour but de recevoir les rayons lumineux qui passeraient au-dessus ou au-dessous des lentilles à échelons et de les ramener par réflexion dans la direction des autres.

REMARQUES. — 1° Depuis quelques années, on a reconnu qu'il est possible de réduire considérablement la durée des apparitions du feu sans qu'il cesse pour cela d'être perçu intégralement. C'est ainsi que le phare d'Eckmühl, qui vient d'être érigé à la pointe de Penmarch, donne toutes les demi-minutes un éclat dont la durée est de cinq secondes seulement. On a reconnu également qu'il est préférable d'avoir deux foyers voisins au lieu d'un seul d'intensité double. La lanterne du phare d'Eckmühl est donc munie de deux lampes électriques ; ces lampes sont placées au foyer d'un système optique formant une sorte de cage dont les quatre côtés sont constitués par des lentilles à échelons.

2° La portée des phares est très variable. Elle est faible dans les phares qui éclairent encore avec des lampes à pétrole ; elle a été considérablement augmentée par la substitution de la lumière électrique aux lampes à pétrole.

L'intensité maxima du feu du phare d'Eckmühl est de 3 000 000 de becs Carcel (149) ; la portée de ce phare est de 400<sup>km</sup> la nuit, mais à cause de la sphéricité de la terre, les marins ne peuvent l'apercevoir directement qu'à une distance inférieure à 50<sup>km</sup> ; au delà, ils voient simplement au-dessus d'eux la lueur du faisceau lumineux.

### LENTILLES DIVERGENTES

**78. Considérations générales.** — Parmi les lentilles divergentes, nous étudierons spécialement les lentilles biconcaves.

Considérons un rayon lumineux  $SI$  dans le plan d'une section principale (*fig. 135*). Les deux réfractions succes-

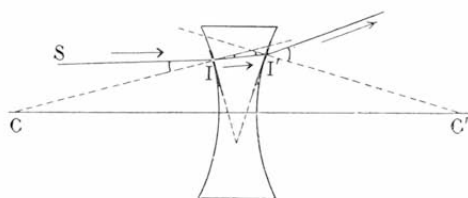


Fig. 135. — Marche générale d'un rayon dans une lentille divergente.

sives qu'il subit, à l'entrée et à la sortie de la lentille, ont pour effet l'une et l'autre de l'écartier de l'axe principal.

Si l'on mène aux points d'incidence et d'émergence des plans tangents aux surfaces courbes, ils se rencontrent du côté de l'axe, et tout se passe comme si le rayon avait traversé le prisme constitué par ces plans.

Une lentille divergente est donc assimilable à un ensemble de prismes dont les bases sont dirigées du côté opposé à l'axe principal. Ces prismes dévient les rayons réfractés vers leurs bases et tendent, par suite, à les écarter de l'axe principal.

La théorie élémentaire des lentilles divergentes s'établit, comme celle des lentilles convergentes, en admettant

que l'épaisseur est négligeable et que les rayons centraux seuls peuvent traverser la lentille.



Nous représenterons une lentille divergente par une simple ligne droite, terminée, comme ci-contre, par un symbole inverse de celui des lentilles convergentes.

**79. Réfraction des faisceaux de rayons parallèles.** — Lorsque des rayons tombent sur une lentille divergente parallèlement à l'axe principal, ils sortent de la lentille en s'écartant de cet axe (fig. 136).

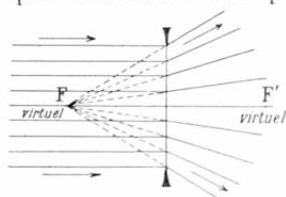


Fig. 136. — Réfraction d'un faisceau de rayons parallèles à l'axe principal.

*virtuel*. Sa distance à la

lentille est la *distance focale principale*. Les prolongements géométriques des rayons émergents viennent rencontrer l'axe principal en un point F, situé du même côté de la lentille que les rayons incidents. Ce point F est un *foyer principal*

*virtuel*. Sa distance à la

lentille est la *distance focale principale*. Une lentille divergente possède deux foyers principaux virtuels F et F', situés de part et d'autre de la lentille à égale distance, si les deux faces sont baignées par un même milieu.

Pour constater l'existence des foyers principaux virtuels, on oriente la lentille de façon que son axe principal prolongé passe sensiblement par le centre du soleil. En plaçant l'œil dans le faisceau divergent qui sort de la lentille, on voit un petit cercle très brillant situé du côté de la face d'entrée des rayons lumineux.

**PUISSANCE D'UNE LENTILLE DIVERGENTE.** — La puissance ou convergence (73) d'une lentille divergente est négative. On a donc

$$P = -\frac{1}{f}.$$

D'après cela, la puissance d'une lentille divergente ayant 0<sup>m</sup>,10 de distance focale est de  $-\frac{1}{0,10} = -10$  dioptries.

L'équation au pouvoir convergent pour une lentille biconcave est

$$-\frac{1}{f} = (n - 1) \left( \frac{1}{R} + \frac{1}{R'} \right).$$

**CENTRE OPTIQUE.** — Toute lentille divergente possède un centre optique (73). Si la lentille est infiniment mince, le centre optique est à l'intersection de la lentille avec l'axe principal. Un rayon quelconque qui traverse la lentille en passant par ce point continue sa marche en ligne droite.

**PLANS FOCaux.** — Les plans focaux d'une lentille divergente sont *virtuels*; ce sont les plans menés par les foyers F et F' perpendiculairement à l'axe principal.

**Détermination expérimentale de la distance focale principale.** — On recouvre l'une

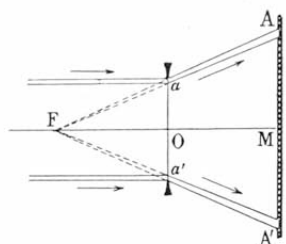


Fig. 137. — Mesure de la distance focale d'une lentille divergente.

des faces de la lentille d'une feuille de papier noir percée de deux petits cercles *a* et *a'* (fig. 137), dans une même section principale et à égale distance de l'axe principal, puis on fait tomber sur l'autre face un faisceau de rayons solaires parallèles à l'axe principal. On coupe alors les deux petits faisceaux divergents qui sortent de la lentille par un écran, que l'on déplace

jusqu'à ce que la distance des deux taches lumineuses A et A' soit double de la distance *aa'*.

Les triangles semblables *Faa'* et *FAA'* donnent

$$\frac{FO}{FM} = \frac{Oa}{MA} = \frac{1}{2},$$

d'où  $FO = \frac{FM}{2}$ .

La distance de la lentille à l'écran est donc, dans ce cas, égale à la distance focale principale.

**80. Réfraction des faisceaux divergents.** — Le foyer conjugué d'un point lumineux situé sur l'axe principal

d'une lentille divergente est *virtuel* : il est situé sur cet axe, entre la lentille et son premier foyer principal.

Menons un rayon incident quelconque PI (*fig. 138*), et

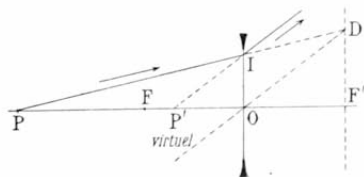


Fig. 138. — Construction géométrique du foyer conjugué d'un point lumineux situé sur l'axe principal.

prolongeons-le jusqu'au plan focal passant par F'. Il émergera parallèlement à DO. L'intersection P' du rayon émergent prolongé et de l'axe principal détermine la position du conjugué de

P. On voit d'après la construction que plus le point lumineux se rapproche de la lentille, plus son conjugué s'en rapproche aussi.

L'équation aux foyers conjugués applicable dans ce cas est, d'après la convention,

$$\frac{1}{p} - \frac{1}{p'} = -\frac{1}{f},$$

d'où l'on tire

$$p' = \frac{f}{1 + \frac{f}{p}}$$

La discussion de cette formule conduit aux résultats suivants :

$$\begin{array}{ll} p = \infty, & p' = f; \\ p \text{ diminue,} & p' < f; \\ p = 0, & p' = 0. \end{array}$$

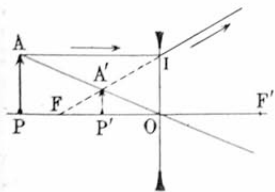


Fig. 139. — Construction géométrique du foyer conjugué d'un point lumineux situé hors de l'axe principal.

Si le point lumineux A est situé hors de l'axe principal, son foyer conjugué est à l'intersection A' de son axe secondaire et du rayon réfracté correspondant au rayon parallèle AI (*fig. 139*). On démontrerait, comme pour les lentilles

l'axe principal.

convergentes, que l'image d'une petite droite  $AP$  perpendiculaire à l'axe principal est une droite perpendiculaire à cet axe. Ces deux droites sont *conjuguées*; le rapport  $\frac{A'P'}{AP}$  de leurs dimensions est encore égal à  $\frac{p'}{p}$ .

**Images produites par les faisceaux divergents.** — Il résulte des considérations précédentes que tout objet lumineux placé devant une lentille divergente donne une image *virtuelle, droite et plus petite* que l'objet. Cette image semble se former entre la lentille et le foyer situé

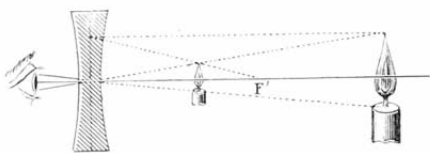


Fig. 140. — Image d'un objet réel donnée par une lentille divergente.

du même côté que l'objet; on ne peut la voir qu'en plaçant l'œil dans la direction du faisceau émergent (fig. 140). A mesure

que l'objet se rapproche de la lentille, l'image s'en rapproche aussi.

#### 81. Réfraction des faisceaux convergents. — Il y a lieu

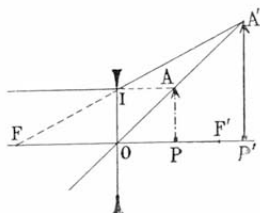


Fig. 141. — Construction géométrique de l'image d'une droite virtuelle située entre la lentille et son second foyer.

de considérer le cas de la lumière convergente qui, si elle était libre, irait converger entre la lentille et le second foyer principal  $F'$ , et celui de la lumière convergente qui irait converger au delà du second foyer.

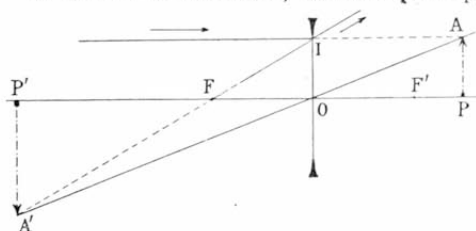
**1<sup>er</sup> CAS.** — Soit  $AP$  une petite droite qui serait formée par la lumière convergente si cette lumière n'était arrêtée par la lentille divergente (fig. 141). L'image  $A'P'$ , obtenue par la construction ordinaire,

est *réelle, droite, plus grande* que la droite virtuelle  $AP$ .

La formule correspondant à ce cas est

$$-\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = -\frac{1}{f}.$$

2° CAS. — La droite AP, virtuelle par rapport à la lentille,



se formerait au delà du foyer  $F'$  (fig. 142). La construction montre que l'image  $A'P'$  est virtuelle et renversée. Ce cas se présente dans la lunette de Galilée (102).

Fig. 142. — Construction géométrique de l'image d'une droite virtuelle située au delà du second foyer.

La formule à employer pour discuter les positions relatives de l'objet et de l'image est

$$-\frac{1}{p} - \frac{1}{p'} = -\frac{1}{f}.$$

**82. Applications des lentilles divergentes.** — Les lentilles divergentes sont beaucoup moins employées que les lentilles convergentes. On les utilise dans quelques instruments d'optique, comme la lunette de Galilée. On les accole aux lentilles convergentes pour former des systèmes *achromatiques*, c'est-à-dire des systèmes au travers desquels la lumière blanche est réfractée sans être décomposée (144).

**83. Puissance d'un système de deux lentilles accolées.** — Lorsque deux lentilles sont accolées de manière que leurs axes principaux coïncident, la puissance du système qu'elles forment est égale à la somme algébrique des puissances des lentilles qui le composent.

Considérons d'abord deux lentilles convergentes minces accolées et soient  $f$  et  $f'$  leurs distances focales principales. Si nous plaçons un objet lumineux à une distance  $p$  du système ( $p$  étant supérieur à  $f$ ), la première lentille formerait une image à une distance  $p_1$  telle que

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p_1} = \frac{1}{f}.$$

Pour la seconde lentille, tout se passe comme si la première image était un objet virtuel ; donc  $p_1$ , pour cette lentille, est la distance de l'objet à la lentille, et la nouvelle image devra se former à la distance  $p'$  donnée par l'équation

$$-\frac{1}{p_1} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f'}.$$

En ajoutant membre à membre les deux égalités obtenues, il vient

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f} + \frac{1}{f'}.$$

Le système fonctionne comme une seule lentille convergente dont la puissance  $\frac{1}{F}$  serait égale à  $\frac{1}{f} + \frac{1}{f'}$ .

Si l'une des lentilles était divergente, il suffirait d'affecter du signe — la puissance correspondante.

### RÉSUMÉ DU CHAPITRE VIII

Les lentilles sont limitées par deux surfaces sphériques ou par une surface sphérique et une surface plane. Les lentilles *convergentes* (lentille biconvexe, lentille plan-convexe, ménisque convergent) sont à bords minces ; elles se comportent comme une série de prismes dont les bases sont toujours du côté de l'axe et font converger les rayons vers l'axe. Les lentilles *divergentes* (lentille biconcave, lentille plan-concave, ménisque divergent) sont à bords épais ; elles se comportent comme une série de prismes dont les bases sont toujours opposées à l'axe et tendent à écarter les rayons de l'axe.

Pour établir la théorie élémentaire des lentilles, on suppose qu'elles sont infiniment minces et qu'elles ne reçoivent que des rayons centraux.

Lorsqu'une lentille convergente reçoit des rayons parallèles à l'axe principal, ils vont converger, après réfraction, en un foyer situé sur l'axe principal au delà de la lentille. Il y a deux *foyers principaux*, situés de part et d'autre à la même distance de la lentille. La *puissance* de la lentille est, par définition, l'inverse  $\frac{1}{f}$  de sa distance focale. Le *centre optique* est un point tel que tout rayon qui passe par ce point ne subit pas de déviation : le rayon émergent est parallèle au rayon incident. Si l'épaisseur de la lentille est négligeable, le déplacement est négligeable, le centre optique est à l'intersection de la lentille avec l'axe, et le rayon qui passe par ce point continue sa marche en ligne droite.

Un point lumineux situé sur l'axe principal d'une lentille convergente a son *foyer conjugué* sur cet axe. Si la distance du point



lumineux au centre optique est supérieure à  $f$ , le foyer conjugué est réel, et sa distance  $p'$  au centre optique est définie par la relation  $\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}$ . Si le point lumineux est situé entre la lentille et un de ses foyers principaux, le foyer conjugué est virtuel et situé du même côté de la lentille. La relation à appliquer dans ce cas est  $\frac{1}{p} - \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}$ .

Le foyer conjugué d'un point lumineux situé hors de l'axe principal est à l'intersection de l'axe secondaire du point lumineux et du rayon réfracté correspondant à un rayon incident parallèle à l'axe principal. Les perpendiculaires abaissées du point lumineux et de son foyer conjugué sur l'axe principal sont des droites conjuguées, dont les longueurs sont entre elles dans le rapport  $\frac{p'}{p}$ .

Les lentilles convergentes donnent des images *réelles* ou des images *virtuelles* suivant que la distance de l'objet au centre optique est supérieure ou inférieure à  $f$ . Les images réelles sont renversées : elles sont plus petites que l'objet quand  $p > 2f$ , égales à l'objet quand  $p = 2f$ , plus grandes que l'objet quand  $2f > p > f$ . Les images virtuelles sont droites et agrandies. Si la lumière qui rencontre la lentille est formée de rayons convergents, l'image est réelle, droite, plus petite que l'objet.

Les lentilles convergentes sont employées dans presque tous les instruments d'optique. On les utilise, dans les phares, sous forme de lentilles à échelons.

Lorsque des rayons qui rencontrent une lentille divergente sont parallèles à l'axe principal, ils s'écartent de cet axe, et les prolongements des rayons réfractés se coupent en un point situé du côté d'où est venue la lumière. Ce point est un *foyer principal virtuel*. Les deux foyers principaux d'une lentille divergente sont virtuels.

Tout objet lumineux placé devant une lentille divergente donne une image *virtuelle*, droite et plus petite que l'objet. En plaçant l'œil dans la direction du faisceau émergent, on voit cette image entre la lentille et le foyer situé du même côté que l'objet.

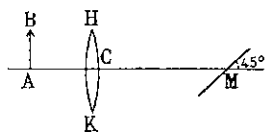
### EXERCICES SUR LE CHAPITRE VIII

26. A 5<sup>cm</sup> d'une lentille convergente on place une petite droite perpendiculaire à l'axe principal. L'image de la droite est virtuelle et grossie 2 fois. Quelle est la distance focale principale de la lentille ?

27. Soit  $D$  la distance d'un objet lumineux à un écran. On cherche les deux positions qu'il faut donner à une lentille convergente pour projeter l'image de l'objet sur l'écran. Soit  $d$  la distance de ces deux positions successives. Calculer la distance focale de la lentille.

28. L'œil est placé à une distance invariable  $d$  d'un objet dont la grandeur est  $o$ . Entre l'œil et l'objet et à une distance  $x$  de l'objet, on place une lentille convergente dont la distance focale est  $2d$ . On demande : 1° de construire l'image de l'objet ; 2° de trouver la grandeur de cette image ; 3° de calculer la tangente de l'angle sous lequel l'œil voit cette image.

29. Une droite lumineuse AB, de hauteur  $a$ , est placée à la distance  $\frac{3}{2}f$  d'une lentille convergente HCK, de distance focale  $f$  ; au delà de la lentille est placé un miroir plan incliné de  $45^\circ$  sur



l'axe principal AC, et le point de rencontre M de la surface réfléchissante avec AC est à une distance  $2f$  du point C. On demande :

De construire géométriquement l'image A'B' formée par les rayons lumineux qui, issus de AB, ont traversé la lentille

et se sont réfléchis sur le miroir ;

De tracer la marche des rayons AH et AK ;

De calculer la grandeur de l'image A'B' et la distance MA' ;

Et d'indiquer les angles que font avec ACM les directions MA' et A'B'.

30. On donne une lentille convergente de distance focale  $f$ , dont la moitié inférieure AB est argentée de façon à former un miroir convexe. On place devant la lentille un objet O perpendiculaire à l'axe principal et on demande :

1° La relation qui existe entre les distances à la lentille des deux images de l'objet O fournies par ce système ;

2° Pour quelle valeur de  $p = AO$  ces deux images sont égales.

On suppose connu le rayon de courbure R de la face AB.

31. On a disposé deux lentilles à  $30\text{cm}$  l'une de l'autre, de manière que leurs axes coïncident. La première est convergente et a une distance focale de  $30\text{cm}$  ; la deuxième est divergente et sa distance focale est de  $15\text{cm}$ .

Un disque circulaire lumineux est placé perpendiculairement à l'axe, à  $60\text{cm}$  de la lentille convergente.

Décrire la marche des rayons lumineux ; calculer le rapport des grandeurs de l'image et de l'objet.

## CHAPITRE IX

## ÉTUDE SOMMAIRE DE L'ŒIL ET DE LA VISION

84. **Description de l'œil.** — L'œil est une sorte de chambre noire sphéroïdale, formée de membranes et de milieux transparents. Il occupe la partie antérieure d'une cavité osseuse, l'*orbite*, et peut exécuter des mouvements variés sous l'influence de muscles au nombre de six.

L'ensemble de l'œil est constitué par la *sclérotique*

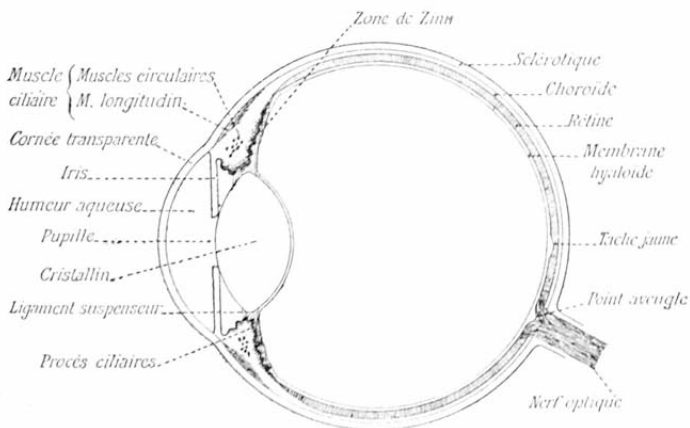


Fig. 143. — Coupe théorique de l'œil.

(fig. 143), membrane blanche, fibreuse et résistante, qui donne insertion aux muscles. Cette membrane présente à la partie postérieure une ouverture pour le passage du *nerf optique* ; elle forme en avant une calotte transparente, de courbure un peu plus forte ; c'est la *cornée transparente*.

Derrière la cornée transparente et à une petite distance se trouve un diaphragme vertical de nature musculaire l'*iris*, percé en son centre d'une ouverture circulaire appelée *pupille*. Des fibres musculaires situées dans l'épaisseur de l'iris dilatent la pupille ou la rétrécissent de manière à régler la quantité de lumière qui pénètre dans l'œil. L'espace compris entre l'iris et la cornée transparente est la *chambre antérieure* de l'œil ; il est rempli par un liquide transparent, l'*humeur aqueuse*.

L'iris est le prolongement d'une seconde membrane, la *choroïde*, qui tapisse intérieurement la sclérotique. La choroïde est très riche en vaisseaux sanguins ; sa partie interne est formée de cellules contenant un pigment noir qui rend obscur tout le fond de l'œil. Vers la partie antérieure, la choroïde se renfle pour former la *région ciliaire*, qui comprend deux couches : une couche externe (*muscle ciliaire*) composée de fibres lisses ; une couche interne se présentant comme une couronne de plis vasculaires (*procès ciliaires*).

Immédiatement derrière l'iris se trouve le *cristallin*, lentille biconvexe transparente dont la face postérieure est plus bombée que la face antérieure et dont l'axe principal se confond avec l'axe antéro-postérieur de l'œil. Il est

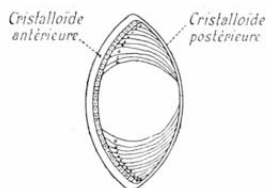


Fig. 144. — Structure du cristallin,

enfermé dans une membrane mince transparente, la *crystalloïde* ou *capsule cristalline*, et se trouve maintenu en place par le *ligament suspenseur*. Le cristallin n'est pas homogène ; il est formé, à la partie antérieure, de cellules cubiques (fig. 144) ; à la partie postérieure, de cellules

allongées et disposées concentriquement. Son indice de réfraction augmente de la périphérie au centre.

Une troisième membrane, la *rétine*, tapisse la face interne de la choroïde; elle est formée par l'épanouissement du nerf optique. Sa structure est très compliquée et nous renverrons, pour sa description exacte, au cours d'histoire naturelle; nous dirons seulement que la rétine présente, au point où arrive le nerf optique, une saillie appelée *point aveugle* ou *papille optique*, complètement insensible à la lumière, et, au centre du fond de l'œil, une petite dépression appelée *tache jaune*, très sensible à la lumière.

Tout l'espace compris entre le cristallin et la rétine (*chambre postérieure* de l'œil) est rempli par une substance gélatineuse transparente appelée *humeur vitrée*. Une membrane mince transparente, la *membrane hyaloïde*, enveloppe l'humeur vitrée; elle s'épaissit dans la région ciliaire pour donner la *zone de Zinn*.

En résumé, l'œil peut être considéré comme composé de trois membranes : la sclérotique, la choroïde, la rétine, et de trois milieux réfringents principaux d'indices différents : l'humeur aqueuse (indice 1,336), le cristallin (indice moyen 1,384), l'humeur vitrée (indice 1,330).

**85. Rôle optique de l'œil.** — Les milieux réfringents de l'œil sont limités par des surfaces sensiblement sphériques centrées sur un même axe et se comportent, dans leur ensemble, comme un système optique convergent ayant un centre optique situé à une petite distance de la face postérieure du cristallin et dont le second plan focal est, en général, peu écarté de la position occupée par la rétine

En effet, les rayons lumineux émis sur l'œil par un point extérieur subissent une première déviation vers l'axe en traversant l'humeur aqueuse, qui est plus réfringente que l'air. Les rayons les plus écartés de l'axe sont arrêtés par l'iris ; les autres passent par la pupille et rencontrent le cristallin, qui augmente encore leur convergence. Ils subissent une dernière déviation dans l'humeur vitrée et tombent enfin sur la rétine. Cette membrane est sensible à la lumière ; elle semble recevoir une impression photographique qui donne naissance à la sensation lumineuse.

En tenant compte des indices de réfraction, des courbures et des épaisseurs des différents milieux de l'œil et en appliquant les principes de la théorie des lentilles épaisses, on trouve que l'œil est assimilable, non à une lentille mince, mais à un *dioptre*, c'est-à-dire à un système optique constitué par une surface sphérique séparant deux milieux inégalement réfringents. Le dioptre par lequel on peut remplacer l'œil

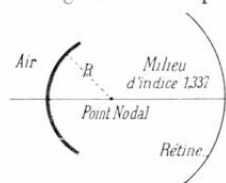


Fig. 145. — Œil réduit de Listing.

s'appelle l'*œil réduit de Listing* (fig. 145). La surface sphérique appartenant à ce dioptre a pour centre le centre optique de l'œil ; son rayon de courbure est égal à  $5^{\text{mm}},423$  ; le milieu situé du côté de sa convexité est l'air ; le milieu situé du côté de sa concavité a un indice égal à  $1,337$ , c'est-à-dire sensiblement l'indice de l'eau. Tout rayon lumineux qui passe par le centre optique de l'œil traverse l'œil sans être dévié ; afin d'éviter toute confusion, nous appellerons ce point le *point nodal* de l'œil.

**86. Formation des images sur la rétine.** — D'après les considérations précédentes, l'œil doit donner des objets extérieurs des images réelles et renversées qui se forment sur la rétine si l'œil est bien conformé. C'est ce que l'expérience vérifie. Si l'on place une bougie en face d'un

œil de bœuf dont on a enlevé la sclérotique et la choroïde

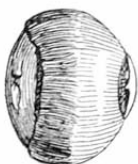


Fig. 146. — Expérience de Magendie.



dans la moitié postérieure, on voit se peindre sur la rétine l'image renversée de la bougie (fig. 146).

Pour que les images soient nettes, il faut qu'elles viennent se former *exactement* sur la rétine ; autrement dit, il faut que la rétine soit le plan conjugué de l'objet. Or, comme la distance de la rétine au point nodal de l'œil est invariable, l'image d'un objet ne peut se former sur la rétine, *l'œil ne modifiant pas ses milieux réfringents*, que si la distance de l'objet au point nodal reste constante. Soit un objet A ayant son image exactement sur la rétine ; cette image est nette. Si l'objet se rapproche de l'œil, l'image se formera en arrière de la rétine ; si l'objet s'éloigne, l'image se formera en avant de la rétine ; dans les deux cas, elle manquera de netteté. Donc l'œil, pour forcer les images à se former sur la rétine, doit modifier la convergence de son système optique : il doit *s'accommoder* aux distances variables des objets. Cette *accommodation* consiste en un changement de courbure de la face antérieure du cristallin, changement qui se produit sous l'influence du muscle et des procès ciliaires.

**87. ŒIL normal ou emmétrope.** — On appelle *œil normal* ou *emmétrope* un œil constitué de manière à donner *sans accommodation* une image rétinienne nette d'un objet éloigné ; il peut voir nettement aussi, mais *en accommodant*,

les objets rapprochés qui sont cependant encore à une certaine distance de lui (environ 15<sup>cm</sup>).

Ainsi, pour un œil emmétrope dont le cristallin a sa courbure normale, les objets très éloignés apparaissent avec des contours bien arrêtés ; les étoiles sont vues comme des points brillants. A mesure que l'objet se rapproche, la face antérieure du cristallin se courbe progressivement pour éviter le déplacement de l'image rétinienne, et l'objet est encore vu nettement. Mais il y a une limite à l'accommodation ; la courbure du cristallin ne peut dépasser une certaine valeur, et lorsque l'objet se trouve à une distance de l'œil inférieure à 15<sup>cm</sup> environ, l'œil est incapable de le voir nettement, quelque effort qu'il fasse. Cette distance limite de 15<sup>cm</sup> s'appelle la *distance minima de la vision distincte* ; nous la représenterons par  $\delta$ . Le point le plus rapproché que l'œil peut voir nettement s'appelle le *punctum proximum*.

**88. Œil myope.** — On dit qu'un œil est myope lorsqu'il ne peut voir nettement les objets placés au delà d'une certaine distance, qui s'appelle la *distance maxima de la vision distincte* ; elle est généralement inférieure à quelques mètres. Le point le plus éloigné que l'œil myope peut voir avec netteté est le *punctum remotum*.

La myopie est due à ce que l'axe antéro-postérieur de l'œil est trop long ; l'image d'un objet très éloigné se forme alors en avant de la rétine. Quand l'objet occupe la position du *punctum remotum*, l'image vient se former sur la rétine et la vision devient nette. Si l'objet se rapproche davantage, l'œil peut encore voir nettement en *accommodant* jusqu'à ce que l'objet ait dépassé la position du *punctum proximum*. Le *punctum proximum* est plus



rapproché pour un œil myope que pour un œil emmétrope ; il peut n'être qu'à quelques millimètres de l'œil. La distance qui sépare le *punctum proximum* du *punctum remotum* a reçu le nom de *parcours* ou *latitude de l'accommodation*.

La myopie est une véritable maladie de l'œil, quelquefois héréditaire, mais le plus souvent acquise. Elle provient alors d'efforts répétés pendant quelque temps pour regarder de très près de petits objets ; aussi est-elle surtout répandue dans la classe studieuse. On la corrige par l'emploi de lentilles biconcaves, qui font diverger les rayons arrivant à l'œil et reportent l'image en arrière sur la rétine si leur distance focale est convenablement choisie.

Soit en effet N le point nodal de l'œil (*fig. 147*). Appliquons

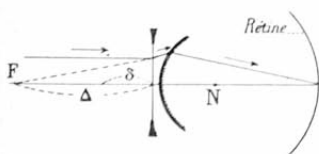


Fig. 147. — Correction de la myopie.

contre l'œil une lentille biconcave dont la distance focale est égale à la distance maxima  $\Delta$  de la vision distincte ; cette lentille donne dans son plan focal une image virtuelle et droite d'un objet situé à l'infini. L'image ainsi produite étant à une distance  $\Delta$  de l'œil, sera vue nettement.

D'après les propriétés des lentilles divergentes, les objets plus rapprochés de l'œil donnent des images qui se forment à une distance de la lentille biconcave inférieure à  $\Delta$  ; en accommodant, l'œil pourra les voir nettement aussi tant que ces images ne se formeront pas en deçà du *punctum proximum*.

**89. Œil presbyte.** — Un œil presbyte voit nettement les objets éloignés, à peu près comme un œil emmétrope, mais il s'en distingue en ce que le *punctum proximum* est situé à une distance notablement supérieure à 15<sup>cm</sup>.

La presbytie est un défaut d'accommodation dû à l'affaiblissement du muscle ciliaire. A mesure que l'on avance

en âge, la puissance d'accommodation diminue et le punctum proximum s'éloigne de plus en plus de l'œil ; aussi les vieillards sont-ils obligés de placer à 50<sup>cm</sup> ou même à 1<sup>m</sup> des caractères d'imprimerie pour les voir nettement.

Pour corriger la presbytie, on fait usage de lentilles biconvexes, qui diminuent la divergence des rayons lumineux et ramènent les images sur la rétine.

Soit un point lumineux P situé en deçà du punctum proximum d'un œil presbyte (fig. 148). Appliquons devant l'œil une lentille biconvexe dont la distance focale soit supérieure à OP. Cette lentille fonctionnera comme loupe et, si sa distance focale est convenablement choisie, elle reportera

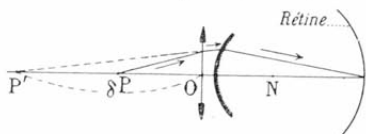


Fig. 148. — Correction de la presbytie.

l'image du point P à la distance  $\delta$  du même côté de la lentille. Comme les distances OP et  $\delta$  doivent être conjuguées, il suffit d'appliquer l'équation  $\frac{1}{OP} - \frac{1}{\delta} = \frac{1}{f}$  pour avoir la valeur de  $f$ .

**90. Œil hypermétrope.** — L'hypermétropie est l'inverse de la myopie. L'axe antéro-postérieur de l'œil hypermétrope est très court, de sorte que l'image d'un objet situé à l'infini se fait en arrière de la rétine. Aucune vision nette n'est donc possible, sans accommodation, ni des objets situés à l'infini, ni, à plus forte raison, des objets situés à une distance finie. L'œil hypermétrope ne peut voir nettement que les objets virtuels ; autrement dit, la rétine ne reçoit une image que si l'œil est frappé par des faisceaux convergents. Lorsque l'hypermétropie est peu développée, elle passe inaperçue, car l'œil hypermétrope peut accommoder de manière à voir les objets extrêmement éloignés. La distance minima de la vision distincte est toujours supérieure à celle d'un œil emmétrope.

On remédie à l'hypermétropie par l'usage de lentilles biconvexes de distance focale convenable ; ces lentilles font converger les rayons lumineux et ramènent l'image en avant sur la rétine.

**91. Diamètre apparent d'une dimension linéaire.** — On appelle *diamètre apparent d'une dimension linéaire*, dans une position déterminée, l'angle formé par les droites menées du point nodal de l'œil aux extrémités de cette dimension.

Soit AP une dimension linéaire (fig. 149) ; son diamètre apparent est l'angle ANP. Comme  $\widehat{ANP} = \widehat{A'NP'}$  et que

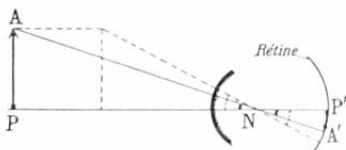


Fig. 149. — Diamètre apparent d'une dimension linéaire dans une position déterminée.

la distance du point nodal à la rétine est sensiblement constante, la grandeur de l'image rétinienne dépend uniquement de la valeur du diamètre apparent de la

dimension linéaire. Quand la dimension AP se rapproche de l'œil, son diamètre apparent augmente progressivement ainsi que la grandeur de l'image rétinienne ; les détails de AP deviennent de plus en plus distincts. D'après cela, si l'on veut apercevoir un objet de grandeur déterminée avec le plus de détails possible, il faut le placer à la distance *minima* de la vision distincte. Plus le punctum proximum est rapproché de l'œil, mieux l'œil est capable de distinguer les petits détails d'un objet. C'est pour cela qu'un œil myope voit plus gros les petits objets qu'un œil emmétrope.

**92. Estimation des grandeurs et des distances des objets.** — Les données qui nous sont fournies par les diamètres apparents des objets ne nous permettent que d'apprécier les rapports de grandeur de deux objets *situés à une même distance* de l'œil, car alors seulement le rapport des diamètres apparents est sensiblement égal au

rapport des grandeurs des objets eux-mêmes. Si l'on veut apprécier avec quelque précision, soit la grandeur absolue d'un objet, soit les rapports de grandeur de plusieurs objets situés à des distances différentes, il faut ajouter à la notion de diamètre apparent la notion des distances.

Pour observer un objet dans les meilleures conditions possibles, l'œil s'oriente de manière que les images se forment sur la tache jaune (\*). On appelle *axe visuel* la droite qui passe par le centre de la tache jaune et par le point nodal de l'œil. — Quand on regarde un même point avec les deux yeux, on dirige vers ce point les axes visuels des deux yeux. On donne alors le nom d'*angle optique* ou d'*angle visuel* à l'angle que font entre eux ces axes visuels.

Cela posé, si l'on regarde avec les deux yeux des points placés à des distances diverses, l'angle optique est d'autant plus grand que l'objet observé est plus rapproché (*fig. 150*) ; dès lors, c'est la grandeur de cet angle qui nous fait apprécier

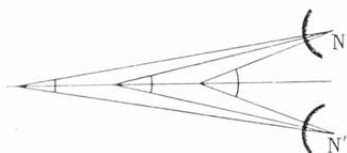


Fig. 150. — Variation de l'angle optique avec les distances.

la distance à laquelle nous nous trouvons de l'objet. Cette appréciation résulte d'une sorte d'éducation du sens de la vue, éducation qui a été faite par le sens du toucher et par les efforts nécessaires pour faire converger les deux

axes visuels. Mais dès que les objets s'éloignent au delà d'une centaine de mètres, l'angle optique devient très petit et ne varie plus que de quantités insensibles avec la distance. Ce sont alors d'autres éléments qui interviennent dans le jugement de la distance : éclat relatif des objets, diminution du diamètre apparent des objets connus, disparition des petits détails, etc. Chaque observateur, pourvu que l'air ne présente pas une transparence très différente de celle à laquelle il est accoutumé, arrive ainsi à une sûreté d'appréciation plus ou moins grande suivant l'expérience qu'il a acquise.

(\*) Toutefois les marins regardent certains signaux un peu obliquement, ce qui indiquerait que la périphérie de la rétine est plus sensible que la tache jaune.

**93. Persistance des impressions lumineuses sur la rétine.** — L'action de la lumière sur la rétine peut être très courte, mais l'impression qu'elle produit persiste pendant  $\frac{1}{10}$  de seconde après la disparition du corps lumineux. Si les images rétinienne se succèdent plus vite qu'elles ne s'effacent, on a une sensation unique. Tout le monde sait, par exemple, qu'un charbon ardent que l'on fait tourner rapidement donne l'impression d'un cercle lumineux. La persistance des impressions lumineuses sur la rétine fait que l'œil voit à la fois le charbon dans toutes ses positions.

**Applications.** — Cette propriété de la rétine conduit à des

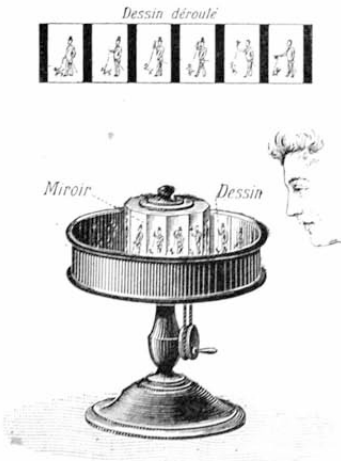


Fig. 451. — Praxinoscope.

applications très variées. Elle permet de reconstituer la lumière blanche à l'aide du disque de Mus-senbroeck (110). Elle sert de base à une foule d'appareils usités principalement comme jouets d'enfants (*phénakisticopes*, *kinétoscopes*, *praxinoscopes* (fig. 451) etc. Enfin, le *cinématographe* (107) est construit sur ce principe de la persistance des impressions lumineuses.

La disposition générale de tous ces appareils est analogue : une série de dessins ou de photographies non identiques, mais représentant les positions successives qu'occupe un même objet mobile, défilent devant l'œil, soit directement, soit en projection. Si ce défilé est suffisamment rapide pour

que les impressions discontinues qui en résultent pour l'œil se reproduisent au bout d'un temps moindre que  $\frac{1}{10}$  de seconde, l'œil, réunissant l'une à l'autre ces diverses impressions, a l'illusion du mouvement.

**94. Vision binoculaire. — Sensation du relief. —** Lorsqu'on regarde un objet éloigné ou une figure plane, les deux images rétiniennees sont très sensiblement identiques. Mais si les objets sont à trois dimensions et ne sont pas très éloignés, les vues qu'en ont les deux yeux diffèrent un peu entre elles, l'œil droit voyant un peu plus de la partie droite de l'objet, l'œil gauche un peu plus de la partie gauche. Pour s'en rendre compte, il suffit de fixer successivement de l'œil droit et de l'œil gauche, sans déplacer la tête, des objets aux contours bien arrêtés, comme une pyramide, un dé à jouer, etc. Ces objets ne sont cependant pas vus doubles. Cela tient à ce que les deux images occupent sur la rétine des positions rigoureusement correspondantes et que l'éducation de l'œil nous a habitués à confondre ces positions en une seule ; il n'y a qu'une seule impression nerveuse dans l'encéphale. La sensation du relief résulte précisément de la superposition cérébrale de ces deux images un peu différentes.

**Applications. —** L'appréciation du relief par les deux yeux (vision binoculaire) est utilisée dans les *microscopes binoculaires* (98) et dans les appareils connus sous le nom de *stéréoscopes* et de *pseudoscopes*.

**STÉRÉOSCOPE. —** Le stéréoscope, imaginé par Wollaston, se compose d'une sorte de boîte (*fig. 152*) dans le fond de laquelle on place côte à côte deux photographies d'un même objet qui ont été prises par deux appareils disposés comme le seraient les deux yeux. Ces photographies sont un peu différentes : celle qui reproduit une plus grande partie de la droite de l'objet est placée devant l'œil droit, celle qui repro-

duit une plus grande partie de la gauche devant l'œil gauche. Entre chaque œil et la photographie correspondante est disposée une portion de lentille convergente formant



Fig. 152. — Stéréoscope ordinaire et stéréoscope forme jumelle.

une sorte de prisme à face convexe (fig. 153) ; les arêtes de ces prismes sont tournées l'une vers l'autre.

Si l'on considère deux points A et A' des deux photographies qui représentent le même

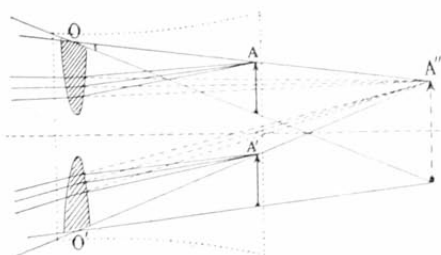


Fig. 153. — Marche des rayons dans le stéréoscope.

point de l'objet et si l'on mène par ces points les axes secondaires OA et O'A', on voit qu'ils se coupent en un point A''. Or, la distance

des lentilles aux photographies est telle que les lentilles en donnent des images virtuelles précisément dans le plan parallèle aux photographies et contenant le point A''. Les deux images virtuelles seront donc superposées, et la simultanéité des impressions donnera une vive sensation de relief.

## RÉSUMÉ DU CHAPITRE IX

L'œil est une sorte de chambre noire formée de membranes et de milieux réfringents transparents. Les membranes sont, de dehors en dedans : la *sclérotique*, qui forme en avant la cornée transparente ; la *choroïde*, membrane vasculaire à pigment noir, qui se termine à la partie antérieure par un diaphragme (iris) percé d'une ouverture centrale (pupille) ; la *rétine*, formée par l'épanouissement du nerf optique. Les milieux réfringents sont l'*humeur aqueuse*,

située entre l'iris et la cornée transparente ; le *crystallin*, sorte de lentille biconvexe placée derrière l'iris ; l'*humour vitrée*, occupant toute la partie postérieure de l'œil. Ces milieux se comportent, dans leur ensemble, comme un système optique convergent dont le centre optique (point nodal de l'œil) serait voisin de la face postérieure du cristallin.

L'œil donne des objets extérieurs des images réelles et renversées qui doivent se former exactement sur la rétine pour être perçues nettement. Il ne peut voir simultanément un objet rapproché et un objet lointain, mais il peut les voir successivement en modifiant la courbure de la face antérieure du cristallin (*accommodation*).

Un œil est *normal* ou *emmétrope* lorsqu'il donne sans accommodation une image rétinienne nette des objets éloignés ; en accommodant, il peut voir nettement aussi les objets rapprochés qui sont cependant encore à une distance d'environ 15<sup>cm</sup> (distance minima de la vision distincte).

Un œil est *myope* lorsqu'il ne peut voir nettement les objets placés au delà d'une certaine distance qu'on appelle distance maxima de la vision distincte ; la distance minima est moindre que pour un œil emmétrope. La myopie est due à une trop grande convergence du système optique de l'œil ; on la corrige par l'emploi de lentilles biconcaves.

Un œil *presbyte* se distingue d'un œil emmétrope en ce que la distance minima de la vision distincte est supérieure à 15<sup>cm</sup>. La presbytie est un défaut d'accommodation qui est dû à l'affaiblissement du muscle ciliaire et croît régulièrement avec l'âge. On remédie à ce défaut par l'emploi de lentilles biconvexes.

On appelle *diamètre apparent* d'une dimension linéaire d'un objet, dans une position déterminée, l'angle formé par les droites menées du point nodal de l'œil aux extrémités de cette dimension. Le diamètre apparent croît à mesure que la distance à l'œil diminue. Il est insuffisant pour nous permettre d'apprécier la grandeur absolue des objets et la distance qui nous en sépare ; il faut y ajouter la notion des distances, notion qui, pour des objets peu éloignés, résulte de l'évaluation plus ou moins consciente de l'angle visuel.

L'impression produite par la lumière sur la rétine persiste pendant  $\frac{1}{10}$  de seconde après la disparition du corps lumineux.

On utilise cette propriété de la rétine dans le disque de Mussenbroeck, dans les phénakisticopes, le cinématographe, etc.

La sensation du *relief* pour les objets peu éloignés ne s'obtient qu'en regardant l'objet avec les deux yeux. Cela tient à ce que chaque œil voit l'objet d'une façon un peu différente. La preuve en est donnée par le stéréoscope.

---



## CHAPITRE X

## INSTRUMENTS D'OPTIQUE

**95. Définition et classification.** — On appelle instruments d'optique des systèmes de milieux réfringents ou de surfaces réfléchissantes disposés de manière à changer la direction ou la convergence des faisceaux lumineux. Leur but est de substituer aux objets des images réelles ou virtuelles, dans des conditions plus favorables pour la vision que celles où se trouvent les objets eux-mêmes.

Dans les instruments d'optique, on donne le nom d'*objectif* à tout système optique destiné à donner d'un objet une image réelle. Les objectifs sont des systèmes convergents; ils peuvent être constitués soit par un miroir concave, soit par une ou plusieurs lentilles convergentes. On donne le nom d'*oculaire* à tout système optique destiné à donner d'un objet une image virtuelle. Les oculaires sont toujours constitués par des lentilles; ils peuvent être convergents ou divergents.

Suivant les usages auxquels on les destine, les instruments d'optique peuvent se diviser en trois groupes : les *microscopes*, les *télescopes* et les *instruments de projection*.

## MICROSCOPES.

**96. Considérations générales.** — Les microscopes sont des instruments qui ont pour but d'amplifier les images des objets que leurs petites dimensions ne permettent pas d'observer suffisamment à l'œil nu. Ils donnent des images

*virtuelles*. Les uns ne comprennent qu'un oculaire et donnent des images droites; ce sont les microscopes simples, que l'on désigne plus spécialement sous le nom de *loupes*. Les autres sont formés d'un objectif et d'un oculaire et donnent des images renversées; ce sont les *microscopes composés* ou microscopes proprement dits.

**97. Loupe.** — La loupe est un oculaire convergent qui, donnant des petits objets des images virtuelles agrandies, permet de mieux distinguer les détails de ces objets que par l'observation directe.

**Marche des rayons.** — Supposons la loupe constituée par une lentille convergente d'épaisseur négligeable et ne pouvant être traversée que par des rayons centraux.

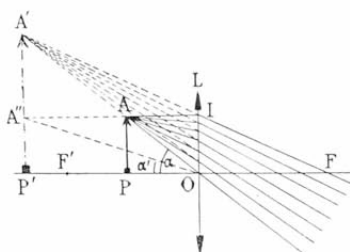


Fig. 154. — Marche des rayons dans la loupe.

Soient  $F$  et  $F'$  ses foyers principaux (*fig. 154*). Pour qu'un objet ait une image virtuelle, il faut, comme nous l'avons vu, qu'il soit placé entre la lentille et l'un de ses foyers. Soit donc  $AP$  une dimension linéaire de l'objet, limitée par

l'axe principal. La construction ordinaire montre que son image  $A'P'$  est *virtuelle, droite, agrandie* linéairement. Si l'œil est placé derrière la loupe et dans son voisinage immédiat, il recevra la plus grande partie des rayons émis sur la lentille par les divers points de la droite  $AP$ , comme s'ils émanaient des points correspondants de l'image  $A'P'$ .

Pour faire usage d'une loupe, on la place habituelle-

ment contre l'œil, puis on met au point en diminuant progressivement la distance de l'objet à la lentille jusqu'à ce que l'image apparaisse le plus distinctement possible. La distance de l'image à l'œil est alors sensiblement égale à la distance minima de la vision distincte. La loupe étant supposée placée contre l'œil, le diamètre apparent  $\alpha$  de l'image est le même que celui de l'objet ; mais, sans le secours de la loupe, on ne verrait l'objet que s'il était placé en  $A'P'$ , à la distance minima de la vision distincte. Il serait vu alors sous un diamètre apparent  $\alpha'$  inférieur à  $\alpha$ . On s'explique ainsi pourquoi une loupe permet d'apercevoir des détails qui échapperaient à l'observation directe.

**Puissance d'une loupe.** — L'effet utile d'une loupe est d'autant plus grand qu'elle permet de distinguer nettement de plus petits détails d'un objet ou, en d'autres termes, qu'elle permet de voir une dimension linéaire déterminée d'un objet sous un diamètre apparent plus grand. L'élément qui mesure cet effet utile s'appelle la puissance de la loupe.

La puissance d'une loupe est l'angle sous lequel elle fait apercevoir l'image de l'unité de longueur à la distance minima de la vision distincte. On l'évalue en dioptries (73). Pour une loupe à court foyer, la puissance est à peu près égale à la puissance  $\frac{1}{f}$  de la lentille ; elle est, par suite, sensiblement indépendante de la vue de l'observateur.

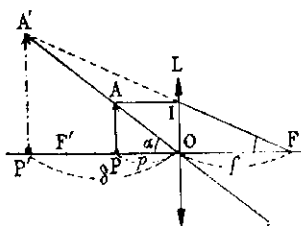


Fig. 453. — Figure pour le calcul de la puissance d'une loupe.

Supposons, pour simplifier, le point nodal de l'œil confondu avec le centre optique de la loupe (*fig. 155*), et soit AP une petite dimension linéaire dont l'image AP' est mise au point à la distance minima  $\delta$  de la vision distincte. La longueur AP étant vue à travers la loupe sous l'angle A'OP', l'unité de longueur, comme on ne considère que de petits angles, serait vue sous l'angle  $\frac{A'OP'}{AP}$ . Désignons par P la puissance de la loupe et posons  $OP = p$ . En prenant comme mesure de l'angle A'OP' sa tangente, qui a pour valeur très approchée le rapport  $\frac{AP'}{OP'}$  ou  $\frac{AP}{p}$ , on a

$$P = \frac{AP}{\Delta P} = \frac{1}{p}.$$

Or l'équation aux foyers conjugués, appliquée à la loupe, donne

$$\frac{1}{p} = \frac{1}{f} + \frac{1}{\delta}.$$

Donc

$$P = \frac{1}{f} + \frac{1}{\delta}.$$

Des deux termes qui représentent la valeur de P, le premier est ordinairement le plus grand. Si la loupe est à court foyer (1<sup>cm</sup> au plus), la fraction  $\frac{1}{\delta}$  pourra être considérée comme négligeable par rapport à  $\frac{1}{f}$ , et la puissance sera mesurée d'une façon suffisamment approchée par l'inverse de la distance focale de la lentille.

Comme application, soit une loupe ayant 0<sup>m</sup>,01 de dis-

tance focale : sa puissance est  $\frac{1}{0,01} = 100$  dioptries. Une dimension linéaire de 2<sup>mm</sup> sera vue à travers cette loupe sous un angle mesuré approximativement par

$$0,002 \times 100 = 0,2.$$

En général, une petite dimension linéaire  $l$  d'un objet (évaluée en mètres) est vue à travers une loupe sous un angle qui est mesuré approximativement par le produit  $Pl$ .

Dans le cas où l'œil n'est pas placé contre la loupe, on trouverait facilement que la puissance  $P$  a pour expression

$$P = \frac{1}{f} \left( 1 + \frac{f-d}{\delta} \right),$$

$d$  représentant la distance du point nodal de l'œil à la lentille.

On voit d'après cette formule que  $P$  est maximum quand  $d = 0$ , c'est-à-dire quand la loupe est placée contre l'œil. Si l'œil est placé au foyer  $F$  de la loupe,  $d = f$ ; la puissance est représentée uniquement par  $\frac{1}{f}$  et elle est complètement indépendante de la vue de l'observateur. Il en résulte que l'œil voit alors l'image  $A'P'$  sous l'angle  $A'FP'$  (fig. 155), quelle que soit la distance de l'objet  $AP$  à la loupe; par suite, si l'objet que l'on examine a un certain relief, ses différentes parties, quoique inégalement distantes de la loupe, seront vues à travers la loupe sous des angles égaux et l'objet ne paraîtra pas déformé.

**Grossissement d'une loupe.** — On appelle grossissement d'une loupe, pour un observateur déterminé, le rapport des diamètres apparents sous lesquels cet observateur voit deux dimensions linéaires homologues de l'image et de l'objet, l'image et l'objet étant examinés tous deux à la distance minima de sa vue.

L'angle sous lequel une dimension linéaire  $l$  d'un objet est vue à travers la loupe est mesuré sensiblement par le produit  $Pl$ ,  $P$  désignant la puissance de la loupe.

Pour un observateur déterminé, l'angle sous lequel cette même dimension  $l$ , placée à la distance minima  $\delta$ , est vue directement, est mesuré sensiblement par le rapport  $\frac{l}{\delta}$ .

Le grossissement  $G$ , pour l'observateur dont il s'agit, est le rapport entre ces deux angles. On a donc

$$G = \frac{Pl}{l} = P\delta = \left(\frac{1}{f} + \frac{1}{\delta}\right)\delta = 1 + \frac{\delta}{f}.$$

Si la loupe est à court foyer, l'unité peut être considérée comme négligeable devant le rapport  $\frac{\delta}{f}$ , et on a

$$G = \frac{\delta}{f}.$$

Ainsi le grossissement dépend à la fois de l'inverse de la distance focale de la loupe, c'est-à-dire de la puissance de la lentille, et de la vue de l'observateur; pour une loupe de puissance déterminée, il est plus faible pour les vues myopes que pour les vues normales. En somme, le grossissement représente en quelque sorte l'*avantage* que l'on a à se servir d'une loupe: un presbyte gagne plus qu'un myope à faire usage de la loupe, mais d'un autre côté, le presbyte, quand il observe à l'œil nu, doit placer les objets à une distance  $\delta$  plus grande que le myope et il ne voit pas les détails aussi distinctement que ce dernier.

Le grossissement que nous venons de considérer est le grossissement *linéaire*; le grossissement *superficiel* aurait pour expression  $\left(1 + \frac{\delta}{f}\right)^2$  ou sensiblement  $\left(\frac{\delta}{f}\right)^2$ .

**Applications.** — Les loupes sont d'une grande utilité en botanique, en minéralogie, en entomologie; on les emploie pour faciliter les dissections, pour graver, pour lire les cartes, observer les miniatures, compter les fils des étoffes, etc.

Les *loupes à main* ont ordinairement une monture en maillechort avec un manche en bois noir (fig. 156) ou une monture en buffle. Dans les loupes à recouvrement (fig. 157), on monte souvent à la fois plusieurs lentilles de puissances croissantes (biloupes, triloupes). Enfin la loupe dite de Stan-



Fig. 156. — Loupe simple à main.



Fig. 157. — Loupe à recouvrement (triloupe).



Fig. 158. — Loupe de Stanhope.

hope (fig. 158), usitée surtout en botanique, est formée d'un cylindre de verre, terminé d'un côté par une surface convexe, de l'autre par une surface plane sur laquelle on colle l'objet à examiner; elle donne des images fortement grossies, mais un peu déformées.

Les *loupes des horlogers et des graveurs* sont montées à l'extrémité d'un petit tube dont on maintient l'extrémité avec l'arcade sourcilière. La longueur du tube étant égale à la distance focale de la loupe, les objets doués de relief sont vus à travers la loupe sans déformation.

Enfin on appelle spécialement *microscopes simples* des loupes montées sur pied (fig. 159) et destinées à faciliter les dissections. La loupe est constituée par un système de deux lentilles convergentes associées (doublet), choisies de manière à détruire en grande partie les irisations que donne toujours aux images l'emploi d'une seule lentille. L'objet se place sur une platine large à disque de verre, munie quelquefois de supports latéraux sur lesquels s'appuient les mains de l'observateur quand il veut disséquer. Le pied qui supporte la loupe est

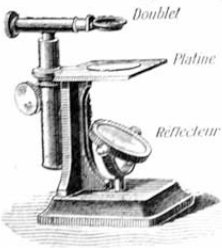


Fig. 159. — Microscope simple.

à crémaillère et peut s'abaisser ou s'élever pour permettre la mise au point. Enfin un miroir concave, placé sur le pied de l'instrument, concentre sur le disque de la platine la lumière du jour et éclaire vivement l'objet.

**98. Microscope composé.** — Le microscope composé est destiné principalement à faciliter la vision d'objets que leur petitesse ne permet pas d'observer à la loupe. Il est formé essentiellement d'un *objectif* convergent, qui donne d'un petit objet une image réelle, renversée, agrandie, et d'un *oculaire* également convergent, qui joue par rapport à cette image le rôle de loupe et lui substitue une image virtuelle, droite et agrandie. L'image observée à travers l'oculaire est donc renversée par rapport à l'objet.

**Marche des rayons.** — La figure 160 représente la cons-

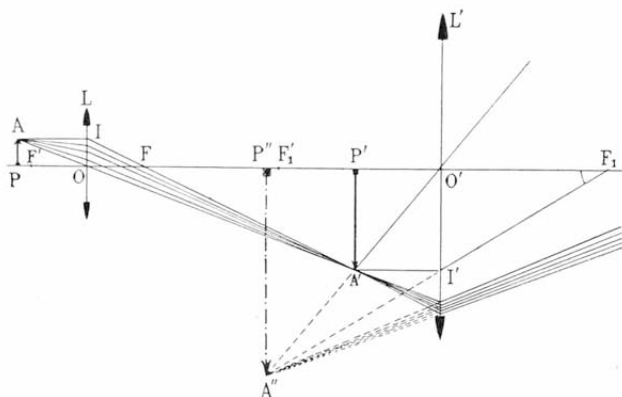


Fig. 160. — Construction des images dans le microscope simplifié.

truction des images dans un microscope simplifié, c'est-à-dire supposé réduit à deux lentilles seulement. Une petite dimension linéaire  $AP$ , placée à une distance de l'objectif  $L$  un peu supérieure à la distance focale principale  $F'O$ , donne l'image renversée  $P'A'$ . Cette image réelle



constitue ici une image aérienne (74), que l'on observe à travers l'oculaire  $L'$ , disposé de manière à jouer le rôle de loupe.

L'objet à examiner repose sur un support fixe. L'objectif et l'oculaire, invariablement liés entre eux, sont assujettis aux deux extrémités d'un tube. On met au point en déplaçant le tube tout entier par rapport à l'objet, de manière que l'image virtuelle  $P''A''$  vienne se former sensiblement à la distance minima de la vision distincte. L'œil de l'observateur doit être placé, pour une raison que nous verrons plus loin, au foyer  $F_1$  de l'oculaire.

**Puissance d'un microscope.** — *La puissance d'un microscope se définit, comme celle d'une loupe, l'angle sous lequel le microscope fait apercevoir l'image de l'unité de longueur à la distance minima de la vision distincte.*

Supposons le point nodal de l'œil confondu avec le foyer  $F_1$  de l'oculaire. La dimension linéaire  $AP$  étant vue sous l'angle  $P''F_1A''$ , la puissance du microscope est très sensiblement représentée par l'angle  $\frac{P''F_1A''}{AP}$ . On a donc, en confondant toujours l'angle avec sa tangente,

$$P = \frac{P''A''}{\frac{P''F_1A''}{AP}};$$

or  $\frac{P''A''}{P''F_1} = \frac{O'I}{O'F_1} = \frac{P'A'}{f}$ ,  $f$  désignant la distance focale principale de l'oculaire.

$$\text{Par suite, } P = \frac{\frac{P'A'}{f}}{\frac{P'A'}{AP}} = \frac{1}{f} \cdot \frac{P'A'}{AP}.$$

De ces deux facteurs, le premier représente la puis-

sance  $p$  de l'oculaire ; le second représente l'agrandissement, par rapport à l'objet, de l'image réelle formée par l'objectif, c'est-à-dire le grossissement  $g$  dû à l'objectif. On peut donc écrire

$$P = p \times g.$$

La puissance d'un microscope est le produit de la puissance de l'oculaire par le grossissement de l'objectif.

Il est facile de calculer l'expression de la puissance en fonction des distances focales  $F$  et  $f$  de l'objectif et de l'oculaire, et de la distance  $d$  des deux lentilles. En appliquant à l'objectif l'équation aux foyers conjugués, on trouve

$$\frac{P'A'}{AP} = \frac{d-a}{F} - 1,$$

$a$  désignant la distance de l'image  $P'A'$  à l'oculaire. Il en résulte

$$P = \frac{1}{f} \left( \frac{d-a}{F} - 1 \right),$$

et comme  $a$  est ordinairement très petit par rapport à  $d$ , on a pour  $P$  la valeur très approchée

$$P = \frac{d-F}{Ff}.$$

D'après cette formule il faut, pour avoir une grande puissance : 1° que le tube aux extrémités duquel sont montés l'objectif et l'oculaire soit très long ; 2° que l'objectif soit à très court foyer ; 3° que l'oculaire ait une très grande puissance. Un microscope est ordinairement muni d'oculaires et d'objectifs de rechange, à convergence plus ou moins forte, qui permettent de varier la puissance suivant la petitesse du détail que l'on a à analyser.

**MESURE EXPÉRIMENTALE DE LA PUISSANCE.** — Le calcul ne peut donner pratiquement la mesure de la puissance d'un microscope, car il repose sur la connaissance des distances

focales des lentilles, distances qu'il est difficile de déterminer avec une approximation suffisante. Le meilleur moyen d'obtenir la puissance est de la déterminer expérimentalement à l'aide d'une *chambre claire* et d'un *micromètre*.

La figure 161 représente la chambre claire de Nachet adaptée

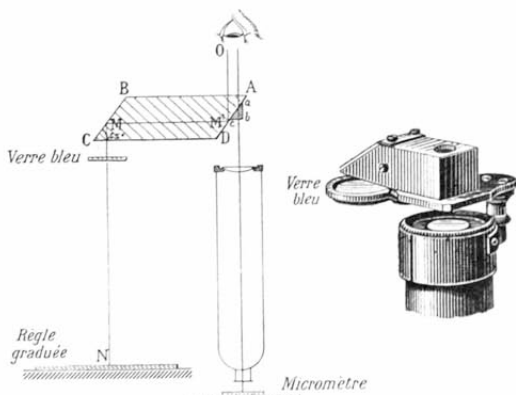


Fig. 161. — Détermination de la puissance d'un microscope par la chambre claire.

à un microscope. Elle se compose d'un parallélépipède de verre ABCD, dont les faces latérales sont inclinées à 45°. En disposant une feuille de papier au-dessous de ce parallélépipède, à une distance sensiblement égale à la distance minima  $\delta$  de la vision distincte, un rayon lumineux provenant d'un point N de la feuille de papier arrive à l'œil placé en O après avoir subi deux réflexions totales, en M et en M'. D'autre part, les rayons qui ont passé à travers l'oculaire tombent sur un prisme abc collé contre la face AD et se comportent comme s'ils traversaient un milieu à faces parallèles; ils pénètrent donc aussi dans l'œil sans subir de déviation.

Pour mesurer la puissance P de l'instrument, on place sur la platine un *micromètre* au  $\frac{1}{100^e}$  (c'est une petite lame de verre sur laquelle le constructeur a tracé, à l'aide d'une

machine à diviser, des traits distants de  $\frac{1}{100}$  de millimètre), et l'on dispose sur la feuille de papier une règle divisée en millimètres. L'œil voit dans la même direction et à la distance minima  $\delta$  de la vision distincte : 1° l'image du micromètre à travers l'oculaire ; 2° l'image de la règle par la chambre claire. Supposons qu'une division grossie du micromètre recouvre  $2^{\text{mm}}$  de la règle. Le diamètre apparent sous lequel on voit une division du micromètre à travers l'oculaire a sensiblement pour mesure  $0^{\text{m}},00001 \times P$ . D'un autre côté, les  $2^{\text{mm}}$  de la règle sont vus sous un angle mesuré sensiblement par  $\frac{0,002}{\delta}$ ,  $\delta$  étant évalué en mètres. Ces deux angles sont égaux puisque les divisions du micromètre et de la règle se recouvrent. On a donc

$$0,00001 \times P = \frac{0,002}{\delta},$$

$$\text{d'où} \quad P = \frac{0,002}{\delta \times 0,00001} = \frac{200}{\delta}.$$

Si la distance minima  $\delta$  est égale à  $16^{\text{cm}}$ , la puissance est de  $\frac{200}{0,16}$  ou 1250 dioptries.

Cette puissance ne varie pas sensiblement quelle que soit la vue de l'observateur qui effectue sa détermination, car une division grossie du micromètre couvre d'autant plus de divisions de la règle que  $\delta$  est plus grand. Il en résulte que la puissance d'un microscope peut être considérée comme caractéristique de l'instrument lui-même.

**Grossissement d'un microscope.** — *Le grossissement linéaire d'un microscope, pour un observateur déterminé, se définit, comme celui de la loupe, le rapport des diamètres apparents sous lesquels cet observateur voit deux dimensions linéaires homologues de l'image et de l'objet, l'image et l'objet étant examinés tous deux à la distance minima de sa vue.*

Soit  $\delta$  la distance minima de la vision distincte de l'observateur dont il s'agit. L'angle sous lequel cet obser-

vateur voit à travers l'oculaire une petite dimension linéaire  $l$  d'un objet a sensiblement pour mesure  $Pl$ . L'angle sous lequel il verrait cette même dimension à l'œil nu, à la distance  $\delta$ , a sensiblement pour mesure  $\frac{l}{\delta}$ . Le rapport de ces deux angles, c'est-à-dire le grossissement linéaire  $G$  a pour expression

$$G = \frac{Pl}{\frac{l}{\delta}} = P\delta.$$

Le grossissement linéaire d'un microscope est donc égal au produit de la puissance de l'instrument par la distance minima de la vision distincte de l'observateur.

On voit que le grossissement diminue avec  $\delta$ . Par suite, le progrès que réalise un myope par l'emploi d'un microscope de puissance déterminée est moindre qu'il ne le serait pour un presbyte.

Enfin, si dans l'expression  $G = P\delta$ , on remplace  $P$  par sa valeur  $pg$  ou  $\frac{1}{f} \times g$ , on a

$$G = g \times \frac{\delta}{f}.$$

Or  $\frac{\delta}{f}$  représente sensiblement le grossissement de l'oculaire. On peut donc dire que le grossissement d'un microscope est égal au produit du grossissement de l'objectif par celui de l'oculaire.

Le grossissement linéaire d'un microscope se mesure expérimentalement comme la puissance. Si, par exemple, une division grossie du micromètre couvre  $2^{\text{mm}}$  de la règle, le grossissement linéaire, pour l'observateur qui regarde à travers l'oculaire, est 200. Le grossissement superficiel serait, pour le même observateur  $200^2$  ou 40 000.

Les bons microscopes grand modèle ne donnent guère un grossissement linéaire supérieur à 2250.

**Champ du microscope. — Diaphragme. — Disque oculaire.** — *Le champ d'un microscope est l'espace angulaire dans lequel doit être situé un point extérieur, pour que son image puisse être vue par l'œil à travers l'oculaire.*

Considérons un point A d'un objet placé devant l'ob-

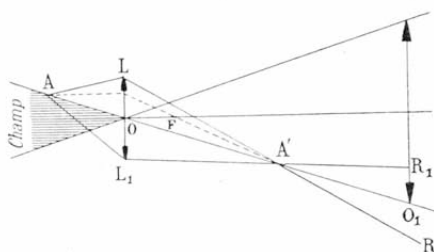
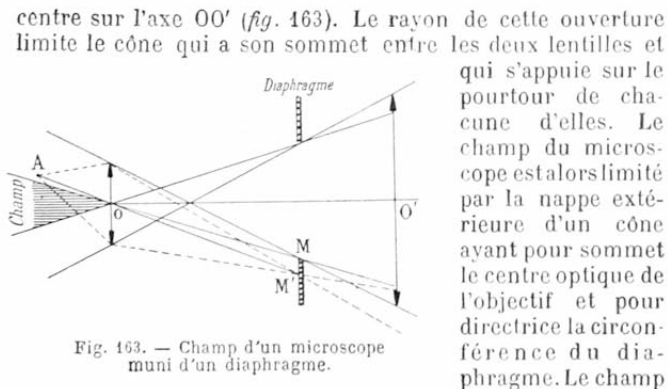


Fig. 162. — Champ d'un microscope sans diaphragme.

jectif (fig. 162). Il envoie sur la lentille un faisceau divergent ayant pour sommet A et pour base  $LL_1$ . Ce faisceau après réfraction est convergent ; il a pour

sommet  $A'$  conjugué de A, et pour base  $LL_1$ . Le point A ne peut être vu que si ce dernier faisceau rencontre l'oculaire. Or le faisceau  $A'LL_1$  est toujours de très petit angle, à cause du faible diamètre de l'objectif ; en le supposant réduit à son axe  $A'O$ , on dira que la condition pour que le point A soit situé dans le champ, est que l'axe  $OA'$  aille rencontrer l'oculaire. D'après cela, la *limite du champ* est la nappe extérieure d'un cône ayant pour sommet le centre optique O de l'objectif et pour directrice la circonférence formée par les bords de l'oculaire.

On peut remarquer dans la figure précédente qu'une partie seulement du faisceau réfracté de sommet  $A'$  rencontre l'oculaire. Il en résulte que les points de l'objet qui seront sur l'axe ou qui en seront très voisins seront vus plus éclairés que le point A. Pour éviter ces différences d'éclat, on dispose dans le plan focal de l'oculaire, très voisin du plan conjugué de l'objet, un *diaphragme*, c'est-à-dire un disque mince de laiton noirci percé d'une ouverture circulaire ayant son



ainsi réduit est appelé *champ de pleine lumière*. On voit en effet qu'un faisceau ayant pour axe l'axe secondaire extrême  $OM$  rencontre l'oculaire en entier; tout faisceau ayant un axe secondaire tel que  $OM'$  plus écarté de  $OO'$  que l'axe  $OM$  ne rencontrerait l'oculaire que partiellement et se trouve intercepté par le diaphragme.

L'objectif étant éclairé sur toute sa surface extérieure, peut être considéré comme un objet lumineux par rapport à l'oculaire, qui en donne une image réelle, circulaire, à une très petite distance au delà de son foyer  $F$ . Ce cercle est appelé *disque oculaire* ou *cercle oculaire*; il est très petit, plus petit que la pupille de l'œil. Tous les rayons lumineux qui viennent du champ et ont traversé l'objectif se comportent comme s'ils partaient de la surface de cette lentille et, s'ils traversent aussi l'oculaire, ils se croisent au disque oculaire. C'est donc là qu'il faut placer l'œil pour embrasser tout le champ du microscope. Plus près ou plus loin, l'œil ne recevrait qu'une partie des rayons émergents.

**Détails de construction et usages des microscopes.** — La forme et la disposition mécanique des microscopes varient beaucoup avec les constructeurs et suivant les usages auxquels ces instruments sont destinés. Les constructeurs les classent généralement en microscopes petits modèles, moyens modèles et grands modèles.

**MICROSCOPES PETITS MODÈLES.** — Ces microscopes convien-

ment, d'une façon générale, pour toutes les recherches ordinaires de botanique, d'histologie; pour observer les insectes, les infusoires; pour reconnaître les falsifications des farines, des fécules, du thé, etc.; pour les recherches de médecine légale, etc.

La figure 164 représente un microscope petit modèle construit par Nachet. Le corps de l'instrument se compose d'un tube de cuivre T aux extrémités duquel sont assujettis

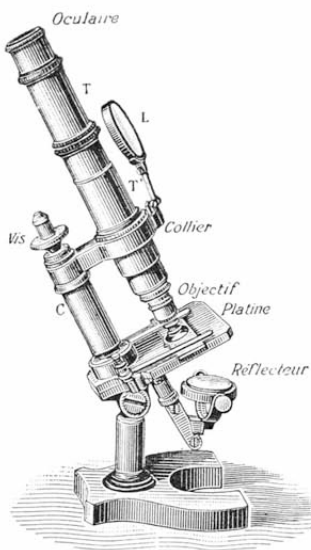


Fig. 164. -- Microscope petit modèle de Nachet.

l'objectif et l'oculaire. Ce tube peut glisser à frottement doux dans un autre tube T', assujéti dans un collier. Ce dernier est fixé à la colonne creuse C; une vis à pas très petit est placée dans l'axe de cette colonne et permet de monter ou de descendre tout le corps du microscope, afin de l'éloigner ou de le rapprocher de l'objet que l'on observe. — Les objets que l'on veut observer se placent sur une lame de verre; ils baignent habituellement dans l'eau ou dans un liquide convenable et sont recouverts par une lamelle de verre très mince (*cover*). Le tout est placé sur la *platine* du microscope, sorte de plate-

forme recouverte en glace noire et percée d'une ouverture centrale; deux lames à ressort y maintiennent la préparation. Au-dessous de la platine est un miroir concave (*réflecteur*), qui renvoie sur les objets la lumière diffuse de l'atmosphère ou celle d'une lampe; il est monté à articulations de manière à pouvoir prendre toutes les positions et inclinaisons possibles. Une lentille L, fixée latéralement sur le corps du microscope, et qui peut se rabattre, sert à éclairer les objets opaques.



L'*objectif* est un objectif composé; il est ordinairement formé de trois petites lentilles plan-convexes réunies dans une même monture et dont la face plane est tournée vers l'objet.

L'*oculaire* est lui-même composé de deux lentilles plan-convexes dont la face plane est tournée vers l'œil; c'est ce qu'on appelle un *oculaire composé d'Huyghens*. Cet oculaire est placé de façon que la première lentille empêche la formation de l'image réelle produite par l'objectif; en d'autres

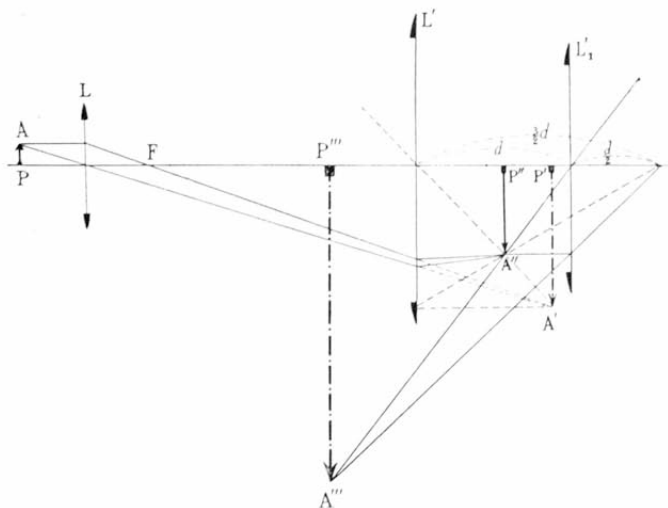


Fig. 165. — Oculaire négatif d'Huyghens.

termes, il sert à observer des objets virtuels; de là le nom d'*oculaire négatif*.

La figure 165 montre la construction de l'image définitive dans un microscope muni d'un oculaire d'Huyghens. L'image  $P'A'$  qui serait donnée par l'objectif tombe entre les deux lentilles  $L'$  et  $L_1$ , qui constituent l'oculaire. La lentille  $L'$  rapproche de l'axe les rayons provenant du point  $A'$  et les fait converger en un point plus rapproché  $A''$ . L'image réelle  $P''A''$  fournie par l'ensemble de l'objectif et de la lentille  $L'$  est regardée à travers la lentille  $L_1$ , qui joue le rôle de loupe et en donne une image virtuelle  $P'''A'''$ .

L'emploi de l'oculaire d'Huyghens offre cet avantage de faire disparaître à peu près complètement les irisations et les aberrations de sphéricité produites par l'objectif. De plus, la lentille  $L'$  a pour effet d'augmenter la portion de l'objet vue à travers l'oculaire, ce qui lui a fait donner le nom de *lentille de champ*. On voit en effet d'après la figure que le point  $A$  est en dehors du champ correspondant à un oculaire simple, puisque les rayons partant de ce point et qui rencontreraient en  $A'$  si la lentille  $L'$  n'existait pas, ne rencontreraient pas la lentille  $L_1$ . Grâce à la lentille  $L'$ , ces rayons sont rapprochés de l'axe principal et peuvent rencontrer la lentille  $L_1$ ; le point  $A$  est ainsi vu à travers l'oculaire et se trouve dans le champ.

Dans la pratique, la lentille  $L'$  sur laquelle arrive la lumière qui a traversé l'objectif a une distance focale  $f$  égale à  $\frac{3d}{2}$ ,  $d$  étant la distance des deux verres de l'oculaire; la lentille  $L_1$ , en arrière de laquelle l'observateur place son œil, a une distance focale  $f'$  égale à  $\frac{f}{3}$ , c'est-à-dire à  $\frac{d}{2}$ . La puissance de l'oculaire, dans ces conditions, est très sensiblement  $\frac{2}{3} \left[ \frac{1}{f'} \right]$ .

MICROSCOPES MOYENS ET GRANDS MODÈLES. — Ils sont employés dans les études délicates (études bactériologiques, pathologiques, minéralogiques et pétrographiques, etc.).

La figure 166 représente un microscope grand modèle destiné spécialement aux recherches de bactériologie. Le corps de l'instrument porte inférieurement un *revolver* mobile garni de trois objectifs de rechange. On peut lui imprimer un mouvement rapide à l'aide d'une crémaillère, ou un mouvement lent à l'aide d'une vis micrométrique. L'appareil d'éclairage comprend : un *réflecteur* plan d'un côté, concave de l'autre, monté sur articulations; un *appareil Abbe*, formé de trois lentilles qui font converger sur l'objet la lumière rectiligne ou oblique; et enfin un *diaphragme-iris* qu'un mécanisme permet d'excentrer à volonté et de faire tourner autour de l'axe optique pour obtenir des effets de lumière oblique dans tous les sens. La platine, en ébonite mate, est une platine

mobile à chariot, mue par deux boutons pour le déplacement

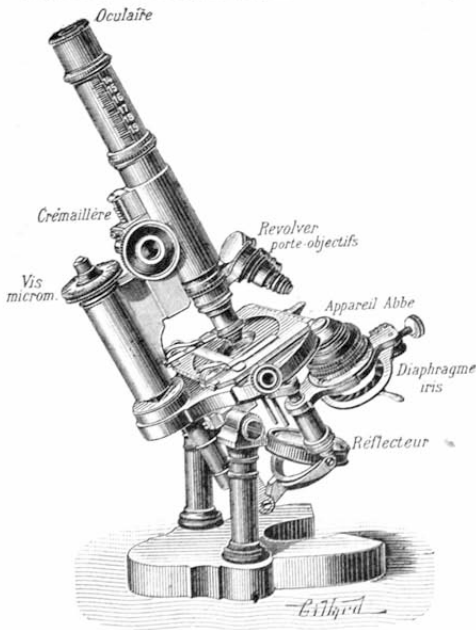


Fig. 166. — Microscope grand modèle.

de la préparation dans tous les sens ; elle est munie d'une équerre et de deux graduations perpendiculaires qui permettent de relever des distances servant plus tard à retrouver un point intéressant.

Enfin dans certains microscopes (microscopes à vision binoculaire), le corps de l'instrument est constitué par deux tubes munis chacun d'un oculaire et d'un objectif. Ces tubes sont disposés

de telle sorte que leurs axes optiques convergent vers le point de la préparation que l'on veut examiner. En plaçant un œil devant chacun des deux oculaires, on a la sensation très nette du relief.

## TÉLESCOPES

**99. Définitions.** — On désigne sous le nom général de télescopes les instruments d'optique qui servent à examiner les objets placés très loin ou situés dans des conditions telles que la distance de l'objet à l'instrument ne puisse varier. Ils se composent d'un *objectif* à grande surface et à long foyer, qui donne une image réelle de l'objet, et d'un *oculaire* à court foyer qui

joue le rôle de loupe et donne de cette image réelle une image virtuelle agrandie, droite ou renversée.

Suivant la nature de leur objectif, on peut diviser les télescopes en deux groupes. Ceux dont l'objectif est une lentille convergente ou plutôt un système de lentilles convergentes sont des télescopes *dioptriques* ; on les appelle plus spécialement des *lunettes*. Ils comprennent la lunette astronomique, la lunette terrestre et la lunette de Galilée. Les télescopes dont l'objectif est un miroir concave sont des télescopes *catoptriques* ou des télescopes *proprement dits*. Le seul télescope catoptrique employé aujourd'hui est le télescope de Newton modifié par Foucault.

**100. Lunette astronomique.** — La lunette astronomique, ainsi appelée parce qu'elle sert principalement à l'étude des astres, donne des images *renversées*.

**Marche des rayons.** — Soient  $L$  l'objectif et  $L'$  l'oculaire (*fig. 167*). Nous supposons que l'objet est assez

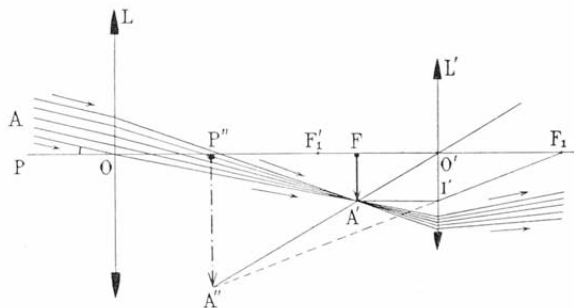


Fig. 167. — Marche des rayons dans la lunette astronomique.

éloigné pour que les rayons qu'il envoie sur l'objectif puissent être considérés comme parallèles. Son image réelle, renversée et très diminuée, se forme alors en  $FA'$ , dans le plan focal principal de l'objectif (73). L'objet ne se

figure pas ; il est indiqué par son *diamètre apparent* AOP, la lunette étant dirigée de manière que l'axe principal PO et l'axe secondaire AO, indéfiniment prolongés, aillent passer par les extrémités de l'objet. L'image FA' se comporte comme un objet par rapport à l'oculaire dont le foyer principal F' est un peu à gauche de F. Cette lentille fournit une image virtuelle P''A'', renversée par rapport à l'objet. On voit sur la figure la marche d'un petit faisceau issu de l'extrémité A de l'objet.

La *mise au point*, dans une lunette astronomique, ne peut s'effectuer qu'en faisant varier la distance des deux lentilles. Pour cela, l'oculaire étant enchâssé dans une portion mobile du tube de la lunette, on le rapproche ou on l'éloigne de l'objectif jusqu'à ce que l'image P''A'' apparaisse le plus nettement possible. Nous verrons plus loin que l'œil, pour embrasser tout le champ de l'instrument, doit être placé dans le premier plan focal de l'oculaire. Dans ces conditions, il y a avantage, pour un observateur doué d'une vue normale ou presbyte, à accommoder la lunette pour la vision à l'infini, afin de ne pas fatiguer sa vue. Pour la même raison, un myope devra accommoder la lunette pour la vision à la distance maxima de sa vision distincte ; il devra donc enfoncer l'oculaire s'il se sert de la lunette après un observateur doué d'une vue normale ou presbyte.

**Grossissement d'une lunette astronomique.** — On appelle *grossissement d'une lunette astronomique* le rapport du diamètre apparent d'une dimension linéaire de l'image vue dans la lunette, au diamètre apparent de la dimension homologue de l'objet vu à l'œil nu. Ce grossissement est égal au rapport  $\frac{F}{f}$  des distances focales de l'objectif et de

l'oculaire; il est donc indépendant de la vue de l'observateur et peut être considéré comme caractérisant l'instrument.

Supposons le point nodal de l'œil confondu avec le foyer  $F_1$  de l'oculaire. Le diamètre apparent d'une dimension linéaire  $P'A''$  vue dans la lunette, c'est-à-dire l'angle  $P'F_1A''$ , est mesuré sensiblement par le rapport  $\frac{P'A''}{P'F_1}$  ou  $\frac{O'F'}{O'F_1}$ .

La dimension homologue de l'objet serait vue à l'œil nu sous le diamètre apparent AOP, dont la valeur est sensiblement  $\frac{FA'}{OF}$ . On a donc, en remarquant que  $FA' = O'F'$ ,

$$G = \frac{\frac{FA'}{O'F_1}}{\frac{FA'}{OF}} = \frac{OF}{O'F_1} = \frac{F}{f},$$

$f$  désignant la distance focale principale de l'oculaire.

En remarquant que  $\frac{1}{f}$  représente la puissance  $p$  de l'oculaire, on peut poser

$$G = F \times p,$$

c'est-à-dire que le grossissement d'une lunette est le produit de la distance focale de l'objectif par la puissance de l'oculaire. C'est pour cela que l'on emploie, outre des oculaires puissants, des objectifs à grande distance focale, ce qui donne aux lunettes astronomiques une grande longueur.

MESURE EXPÉRIMENTALE DU GROSSISSEMENT. — Comme dans le cas du microscope, l'oculaire de la lunette astronomique donne une petite image de l'objectif un peu au delà du foyer  $F_1$  de l'oculaire (fig. 168). Cette image s'appelle le *disque oculaire* ou *anneau oculaire* de Ramsden; sa surface est toujours très petite.

Appelons  $R$  le rayon de l'objectif,  $r$  le rayon du disque oculaire. Nous allons démontrer que si la lunette est accom-

modée pour la vision à l'infini, le grossissement  $\frac{F}{f}$  est égal au rapport  $\frac{R}{r}$ .

Les formules ordinaires des lentilles donnent en effet

$$\frac{1}{L} + \frac{1}{d} = \frac{1}{f}$$

et

$$\frac{R}{r} = \frac{L}{d},$$

$L$  désignant la distance des deux lentilles et  $d$  la distance du disque oculaire à l'oculaire.

On tire de ces deux relations

$$\frac{R}{r} = \frac{L-f}{f}.$$

Or, la lunette étant ajustée pour une vue infiniment longue,  $L = F + f$ . Par suite,

$$\frac{R}{r} = \frac{F+f-f}{f} = \frac{F}{f}.$$

Ce rapport fournit un procédé très simple pour mesurer

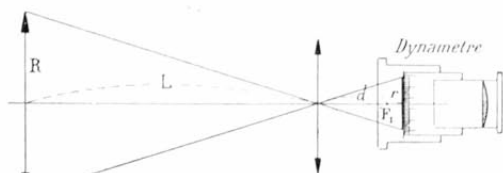


Fig. 168. — Mesure expérimentale du grossissement d'une lunette astronomique.

le grossissement d'une lunette astronomique. La lunette étant d'abord réglée pour voir à la plus grande distance possible, on la braque sur le ciel et l'on reçoit l'image du disque sur l'écran gradué d'une loupe spéciale appelée *dynamètre de Ramsden*. Le diamètre de l'anneau oculaire est ainsi mesuré au jugé au  $\frac{1}{20}$  de millimètre. Pour obtenir le diamètre de l'objectif, on applique contre les bords de la lentille les pointes d'un compas que l'on ouvre jusqu'à ce que leurs images coïncident avec les extrémités d'un diamètre de l'anneau oculaire. Le compas étant alors porté sur une règle

divisée, on évalue l'écartement des pointes et l'on a ainsi le diamètre  $2R$  de l'objectif.

**Diaphragme. — Réticule. — Champ. — Chercheur. —** Dans la lunette astronomique on cherche, comme dans le microscope, à ne recevoir que des images uniformément éclairées; on munit donc également la lunette d'un *diaphragme*, qui se place dans le plan même où se forme l'image réelle fournie par l'objectif, c'est-à-dire dans le plan focal de l'objectif.

L'ouverture du diaphragme est déterminée de telle sorte que ses bords soient en ligne droite avec les bords opposés de l'oculaire et de l'objectif séparés par la distance  $F + f$ . Dans ces conditions, les faisceaux qui peuvent arriver en totalité sur l'oculaire tombent seuls sur cette lentille.

Comme la lunette astronomique sert souvent à déterminer la direction des objets éloignés en même temps qu'à les observer, on tend sur le diaphragme deux fils très fins, ordinairement des fils d'araignée, perpendiculaires entre eux et

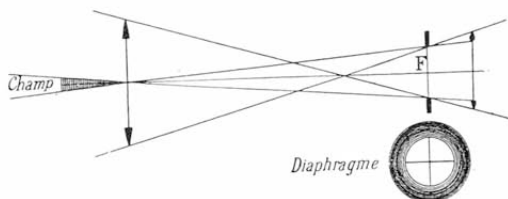


Fig. 169. — Champ de la lunette astronomique. Diaphragme. Réticule.

dont la croisée se trouve au centre du diaphragme (fig. 169). L'ensemble de ces deux fils est ce qu'on appelle un *réticule*. La *ligne de visée* ou *axe optique* de la lunette est la droite qui passe par le point de croisement des fils et le centre optique de l'objectif. Quand on vise un astre, on dirige la lunette de façon que l'image se fasse sur le point de croisement des fils; il ne peut en être ainsi que si l'astre considéré est situé dans le prolongement de l'axe optique de la lunette. Pour viser un deuxième astre, on dirige de nouveau la lunette de manière que l'image de cet astre soit à son tour sur le pro-



longement de l'axe optique. Des cercles gradués, sur lesquels se meuvent les lunettes destinées aux observations astronomiques font connaître l'angle des deux positions de l'axe optique et par suite l'angle des directions menées du centre optique de l'objectif aux deux astres.

On appelle *champ* d'une lunette astronomique l'espace dans lequel doit être situé un point extérieur pour que son image soit vue à travers l'oculaire. Le champ est limité par la nappe extérieure d'un cône ayant pour sommet le centre optique O de l'objectif et pour directrice le contour du diaphragme. Il est toujours très petit et ne dépasse pas habituellement quelques minutes ; aussi est-il assez difficile de mettre un astre déterminé dans le champ de la lunette. Pour remédier à cet inconvénient, on adapte à la lunette astronomique une petite lunette de faible grossissement mais de champ plus vaste. Cette petite lunette, appelée *chercheur*, est disposée de manière que son axe optique soit parallèle à celui de la grande lunette. Lorsque l'axe optique du chercheur est pointé vers un astre déterminé, cet astre se trouve dans le champ de la grande lunette.

Tous les rayons lumineux qui ont traversé à la fois l'objectif et l'oculaire viennent passer dans l'anneau de Ramsden ; c'est donc là qu'il faut placer l'œil pour recevoir tous ces rayons et embrasser tout le champ de l'instrument. Le tube qui porte l'oculaire se prolonge au delà de l'oculaire ; il est muni d'un *œillet* formé par une plaque percée d'une ouverture contre laquelle l'œil doit être appliqué. La position de l'œillet correspond à l'anneau oculaire ; il est situé à une très petite distance au delà du foyer F<sub>2</sub> de l'oculaire.

**Clarté dans les lunettes astronomiques.** — On appelle *clarté* dans une lunette astronomique le rapport entre la quantité de lumière qu'on reçoit sur la rétine en regardant un objet à travers la lunette et la quantité qu'on reçoit en regardant le même objet à l'œil nu.

Considérons d'abord le cas d'un objet éloigné ayant un diamètre apparent sensible, et appelons  $p$  le rayon de la pupille,  $q$  la quantité de lumière qu'envoie l'objet sur l'unité de surface. La lunette étant pointée sur l'objet, reçoit une quantité de lumière proportionnelle à la surface de l'objectif. Cette quantité est égale à  $\pi R^2 q$  et elle se répartit, à la sortie de l'instrument, sur une surface de la rétine que nous représenterons par S.

D'un autre côté, lorsqu'on regarde le même objet à l'œil nu, la quantité de lumière reçue dans l'œil est  $\pi p^2 q$  et elle se répartit sur une surface  $s$  de la rétine. On a donc, par définition, pour valeur de la clarté  $C$  de la lunette :

$$C = \frac{\frac{\pi R^2 q}{S}}{\frac{\pi p^2 q}{s}} = \frac{R^2}{p^2} \cdot \frac{s}{S},$$

et, en remarquant que  $\frac{s}{S} = \frac{1}{G^2} = \frac{r^2}{R^2}$ ,

$$C = \frac{r^2}{p^2}.$$

Comme  $r$  est toujours inférieur à  $p$ , du moins dans les lunettes un peu puissantes,  $C$  est inférieur à 1. On voit que pour tous les objets ayant un diamètre apparent sensible, comme le soleil, la lune, l'éclat des images fournies par la lunette est inférieur à l'éclat des mêmes objets vus à l'œil nu.

Dans le cas d'un objet éloigné n'ayant pas de diamètre apparent sensible, comme une étoile, la lunette n'a pas de grossissement et l'image est toujours un simple point. On a alors  $C = \frac{R^2}{p^2}$ , et comme  $R$  est toujours très supérieur à  $p$ , l'éclat est bien augmenté par la vision à travers la lunette. C'est pour cela que les lunettes astronomiques font apercevoir dans le ciel des étoiles invisibles à l'œil nu.

**Usages et détails de construction des lunettes astronomiques.** — Outre son emploi dans les Observatoires pour les recherches et les mesures d'astronomie, la lunette astronomique s'adapte à une foule d'instruments de mesure et d'observation. Nous citerons notamment parmi les instruments de physique, les cathétomètres, les boussoles de déclinaison, les goniomètres, les spectroscopes, les sextants (35) ; parmi les instruments d'arpentage et de géodésie, les niveaux à longue portée, les théodolites, les tachéomètres.

La figure 170 représente la lunette astronomique simple.

que l'on rencontre habituellement dans les cabinets de Physique (modèle du Ministère de l'Instruction publique). L'objectif est assujéti à l'extrémité d'un gros tube en

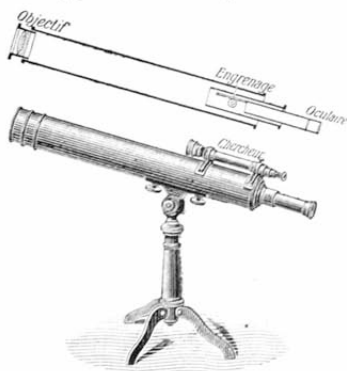


Fig. 170. — Lunette astronomique des cabinets de Physique.

laiton ; à l'autre extrémité de ce tube s'engagent deux tubes de moindre diamètre dont l'un porte l'oculaire. Un bouton commandant une crémaillère intérieure permet d'enfoncer plus ou moins le tube porte-oculaire. La lunette est montée sur un pied en laiton de manière à pouvoir exécuter un mouve-

ment vertical ou un mouvement horizontal. Plusieurs oculaires de rechange permettent de faire varier le grossissement (ordinairement de 75 à 250).

Les lunettes astronomiques dont on se sert dans les laboratoires pour viser des objets assez rapprochés, comme dans l'observation à distance d'un thermomètre, d'un baromètre, d'une règle graduée, etc., portent le nom spécial de *viseurs*. En vue de satisfaire à cette condition, on leur donne un objectif moins convergent et un oculaire plus convergent, ce qui augmente à la fois l'angle de vision et le grossissement. Les viseurs sont donc intermédiaires entre les lunettes astronomiques proprement dites et les microscopes. Comme l'image réelle de l'objet visé se forme au delà du premier plan focal de l'objectif, le réticule n'est plus solidaire de l'objectif. Il est porté par un tube à tirage indépendant de manière à pouvoir être amené dans le plan de l'image réelle de l'objet extérieur donnée par l'objectif.

Enfin les lunettes que l'on emploie dans les recherches astronomiques ont des montures plus ou moins compliquées

suivant les usages auxquels on les destine. Celles qui font partie des *instruments méridiens* sont mobiles autour d'un



Fig. 171. — Lunette équatoriale d'Observatoires.

axe horizontal perpendiculaire au méridien ; elles servent aux recherches de précision (heure du passage d'un astre au méridien, hauteur de l'astre au-dessus de l'horizon). Les lunettes qui font partie des *instruments équatoriaux* sont mobiles dans plusieurs plans (fig. 171), de manière à permettre de viser un point quelconque du ciel ; elles sont employées aussi pour des recherches de précision.

REMARQUE. — L'oculaire négatif d'Huyghens ne permettant pas l'emploi d'un réticule, on adapte à toutes les lunettes astronomiques munies d'un réticule un *oculaire positif*, imaginé par Ramsden.

L'oculaire de Ramsden se compose de deux lentilles planconvexes identiques, de distance focale  $f$ , et dont les faces courbes, placées en regard, sont distantes de  $\frac{2f}{3}$ . L'image

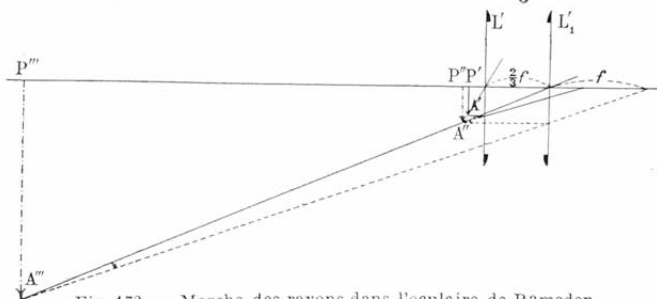


Fig. 172. — Marche des rayons dans l'oculaire de Ramsden.

réelle  $P'A'$  donnée par l'objectif se forme entre la première lentille  $L'$  de l'oculaire et son second plan focal (fig. 172). Cette lentille en fournit une image virtuelle  $P''A''$  que l'on

regarde à travers la deuxième lentille  $L'_1$ , laquelle joue également le rôle de loupe. L'image virtuelle définitive  $P''A''$  doit être observée à la distance minima de la vision distincte.

**101. Lunette terrestre.** — La lunette terrestre, appelée aussi *longue-vue*, est destinée, comme son nom l'indique, à l'observation des objets terrestres. Elle diffère essentiellement de la lunette astronomique en ce que les images y sont redressées par deux lentilles convergentes interposées entre l'objectif et l'oculaire. Ces deux lentilles ont la même convergence, et la distance qui les sépare est égale à la distance focale commune. Leur ensemble porte le nom de *véhicule*.

La figure 173 montre la marche des rayons dans la lu-

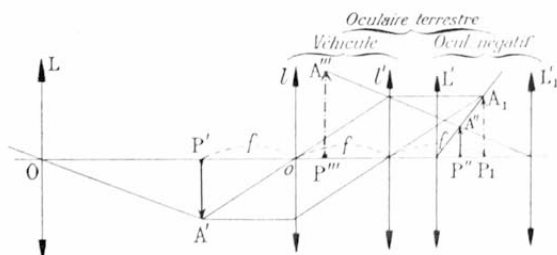


Fig. 173. — Marche des rayons dans la lunette terrestre.

nette terrestre. La première lentille  $l$  du véhicule est placée de manière que son second plan focal coïncide avec le plan de l'image réelle  $P'A'$  donnée par l'objectif  $L$ . Les rayons issus du point  $A'$  sortent de la lentille  $l$  parallèlement à l'axe secondaire  $A'o$ ; ils tombent sur la seconde lentille  $l'$  du véhicule, qui les fait converger en un point  $A_1$  situé dans son premier plan focal. L'image  $P'A'$  donnée par l'objectif est donc remplacée par une image  $A_1P_1$  renversée par rapport à  $P'A'$  et droite, par conséquent, par rapport à l'objet  $AP$ .

En réalité, on ne laisse pas l'image  $A_1P_1$  se former ; elle tombe entre les deux lentilles d'un oculaire composé, qui est un oculaire négatif d'Huyghens (98). On obtient donc finalement l'image virtuelle  $A''P''$ , laquelle est encore droite par rapport à l'objet extérieur.

Le grossissement d'une lunette terrestre se définit comme celui de la lunette astronomique et est exprimé par le même rapport.

**Usages et détails de construction.** — Les longues-vues sont employées par les marins, les officiers, les touristes. Quand elles sont bien construites, elles sont d'un très bon emploi par les temps sombres et sont surtout convenables pour voir à l'horizon les objets perdus dans la brume. On ne les emploie pas pour observer les astres ; la diminution de clarté que produit le véhicule ne suffit pas à compenser l'avantage presque insignifiant qu'il y a à voir les astres dans leur position droite.

La figure 174 représente une longue-vue dite *longue-vue d'officiers*. Le corps de la lunette est en cuivre et a environ



Fig. 174. — Longue-vue.

45<sup>cm</sup> de longueur. Comme dans toutes les longues-vues, le véhicule et l'oculaire négatif sont fixés dans un même tube, qui est à tirage pour la mise au point. L'ensemble de ce tube et des quatre lentilles qui y sont assujetties porte le nom d'*oculaire terrestre*.

Les longues-vues ont plus de champ que les lunettes astronomiques ; leur grossissement varie généralement entre 15 et 40.

**402. Lunette de Galilée.** — La lunette dite de Galilée donne des images droites, comme la lunette terrestre, mais

le redressement des images fournies par l'objectif y est obtenu par un système *divergent* qui joue en même temps le rôle d'oculaire. Cette disposition évite la perte de lumière que produirait l'interposition de lentilles supplémentaires; elle permet en même temps de réduire la longueur de l'instrument; aussi la lunette de Galilée est-elle la plus courte des lunettes.

**Marche des rayons.** — La figure 175 représente la construction des images dans la lunette de Galilée. L'objectif

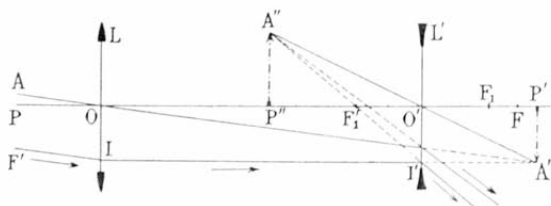


Fig. 175. — Construction des images dans la lunette de Galilée.

convergent  $L$  donnerait d'un objet éloigné une image réelle et renversée à une très petite distance au delà de son premier foyer  $F$ ; mais on ne laisse pas cette image se former. On interpose l'oculaire divergent  $L'$  de manière que sa distance  $O'P'$  à l'image  $P'A'$  soit un peu supérieure à sa distance focale principale  $O'F_1$ . Nous avons vu, en étudiant les lentilles divergentes recevant des rayons convergents (81), que l'image donnée par une lentille divergente placée dans les conditions précédentes est *virtuelle*.

Pour obtenir le conjugué virtuel du point  $A'$ , considérons en particulier un rayon  $I'A'$  qui, provenant du point  $A$  de l'objet, tomberait sur l'oculaire parallèlement à l'axe principal et passerait par  $A'$  si l'oculaire était enlevé. Ce rayon est dévié par l'oculaire de façon que son prolongement géométrique passe par le foyer virtuel situé à gauche

de la lentille. L'intersection  $A''$  de ce prolongement avec l'axe secondaire correspondant au point  $A'$  est le point où passent les prolongements de tous les rayons qui, sans l'interposition de l'oculaire, viendraient se croiser en  $A'$ . Il en résulte que l'œil placé contre l'oculaire voit en  $A''P''$  une image virtuelle, agrandie et renversée par rapport à  $P'A'$ , c'est-à-dire droite par rapport à l'objet de diamètre apparent  $AOP$ .

La *mise au point* se fait comme dans la lunette astronomique, en enfonçant l'oculaire d'autant plus que la vue est plus courte. En effet, pour un œil normal ou presbyte, la lunette est mise au point quand le second foyer  $F_2$  de l'oculaire coïncide avec le premier foyer  $F$  de l'objectif : l'image  $A''P''$  est alors située à l'infini. Mais pour un œil myope, qui ne peut voir qu'à une distance finie, il faut enfoncer l'oculaire par rapport à la position précédente, afin d'amener le foyer  $F_2$  un peu en avant du foyer  $F$ , ce qui rapproche l'image  $A''P''$  de l'oculaire.

**Position de l'œil.** — *Champ.* — L'image de l'objectif à travers l'oculaire étant virtuelle dans la lunette de Galilée, il n'existe pas, comme dans la lunette astronomique, une position de l'œil permettant de recevoir tous les rayons transmis par l'oculaire. Par conséquent il n'y a pas d'œilletton dans la lunette de Galilée; l'observateur doit placer l'œil *aussi près que possible* de l'oculaire, afin de recevoir la plus grande partie des rayons divergents qui en sortent. De plus, comme on ne laisse pas se former l'image des rayons réfractés par l'objectif, il n'y a ni diaphragme, ni réticule, de sorte que cette lunette ne peut servir, comme la lunette astronomique, à mesurer l'angle de deux directions. Quant au *champ* d'une lunette de Galilée, il paraît d'autant plus grand, pour un oculaire et un objectif déterminés, que l'œil est plus rapproché de l'oculaire.

**Grossissement.** — *Le grossissement d'une lunette de Galilée se définit, comme celui d'une lunette astronomique, le rapport des diamètres apparents de l'image et de l'objet.* On a (fig. 175)



$$G = \frac{\widehat{A'O'P''}}{\widehat{AOP}} = \frac{\widehat{A'O'P'}}{\widehat{A'O'P}} = \frac{P'A'}{O'P'} = \frac{OP'}{O'P'}$$

Si l'objet est assez éloigné,  $OP'$  est sensiblement égal à la distance focale  $F$  de l'objectif.

D'un autre côté, l'équation ordinaire des lentilles applicable dans ce cas est

$$-\frac{1}{O'P'} - \frac{1}{O'P''} = -\frac{1}{f},$$

$f$  désignant la distance focale de l'oculaire.

On en tire 
$$\frac{1}{O'P'} = \frac{1}{f} - \frac{1}{O'P''}.$$

Par suite, 
$$G = F \left( \frac{1}{f} - \frac{1}{O'P''} \right).$$

Si l'œil est disposé pour voir à l'infini, on a  $O'P'' = \infty$ , et le grossissement a pour valeur  $\frac{F}{f}$ , comme dans la lunette astronomique. Si l'œil est myope,  $O'P''$  est égal à la distance *maxima* de la vision distincte, qui est une quantité finie, et le grossissement est inférieur à  $\frac{F}{f}$ . La lunette de Galilée est donc beaucoup moins avantageuse pour un œil myope que pour un œil normal ou un œil presbyte.

**Usages et détails de construction.** — La lunette de Galilée est inférieure à la longue-vue sous le rapport du champ ; en revanche, elle donne des images ayant plus de clarté et, pour un même grossissement, elle est plus courte et, par suite, plus maniable. Le plus souvent, on assujettit parallèlement deux lunettes de Galilée pour la

vision binoculaire : on a ainsi les *jumelles* que l'on classe, suivant l'usage auquel on les destine spécialement, en jumelles de théâtre, jumelles marines et de courses, jumelles militaires et jumelles longues-vues.

La figure 176 représente une *jumelle à trois changements*



Fig. 176. — Jumelle à trois changements.

qui, possédant trois jeux d'oculaires que l'on peut amener dans l'axe à volonté, peut servir, comme son nom l'indique, de jumelle de théâtre, de jumelle marine et de jumelle de campagne. La monture des lunettes est en cuivre verni recouvert de maroquin. Les tubes qui portent les objectifs sont réunis par des traverses à leurs deux extrémités ; les tubes à tirage portant les oculaires sont également réunis par une traverse qui permet de les mettre simultanément

au point pour les deux yeux. La mise au point s'effectue en faisant tourner sur lui-même le tube TT', à l'aide de la molette M que l'on tient entre les doigts. Les objectifs et les oculaires sont achromatiques comme dans la plupart des jumelles : chaque objectif est formé de trois lentilles accolées dont l'intermédiaire, divergente, est en flint, et les deux autres, convergentes, en crown ; chaque oculaire est aussi formé de trois lentilles, une lentille convergente comprise entre deux lentilles divergentes.

**103. Télescope de Newton.** — Le télescope de Newton diffère essentiellement des lunettes en ce que l'image objective est fournie par un miroir sphérique concave au lieu de l'être par une lentille convergente. Ce miroir est fixé au fond d'un long tube dont l'extrémité ouverte est dirigée vers l'astre à observer. L'oculaire est un système convergent qui joue le rôle d'une loupe et donne une image virtuelle et renversée de l'astre.

**Marche des rayons.** — Dirigeons l'axe commun du tube et du miroir de manière que son prolongement passe par

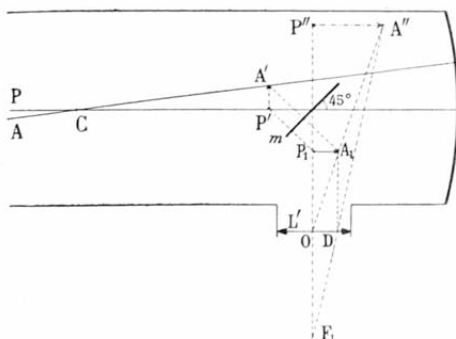


Fig. 177.— Construction des images dans le télescope de Newton.

le bord inférieur de l'astre à observer (fig. 177). Le miroir tendrait à produire dans son plan focal une image  $P'A'$ , réelle et renversée; mais on ne laisse pas cette image se

former. Sur le trajet des rayons réfléchis, un peu en avant du plan focal du miroir, on dispose un petit miroir plan  $m$ , incliné à  $45^\circ$  sur l'axe du tube. L'image  $P'A'$  se trouve, par suite, rejetée dans une position  $P_1A_1$  symétrique de  $P'A'$  par rapport au miroir  $m$ . C'est cette image réelle  $P_1A_1$ , égale à l'image  $P'A'$ , que l'on observe avec l'oculaire  $L'$ , fixé dans un tube à tirage sur le côté du corps de l'instrument. L'oculaire fonctionne comme une loupe et donne une image virtuelle  $P''A''$ , que l'on amène, en réglant le tirage, à apparaître nettement pour la vue de l'observateur.

Dans le télescope de Newton il se forme un *disque oculaire*: c'est l'image du miroir concave à travers l'oculaire.

L'œil doit être placé au disque oculaire pour recevoir tous les rayons réfléchis par le miroir concave. De plus, il y aura toujours avantage, pour un œil normal ou presbyte, à accommoder le télescope pour la vision à l'infini, et pour un œil myope, à l'accommoder pour la distance maxima de sa vision distincte.

**Grossissement.** — Le grossissement dans le télescope de Newton se définit encore *le rapport entre le diamètre apparent d'une dimension déterminée de l'image vue à travers l'oculaire et le diamètre apparent de la dimension correspondante de l'objet vu à l'œil nu.*

Pour évaluer le diamètre apparent de l'image virtuelle  $P''A''$  nous supposerons, comme dans la lunette astronomique, le point nodal de l'œil placé au foyer principal  $F_1$  de l'oculaire.

$$G = \frac{\widehat{P''F_1A''}}{\widehat{P'CA'}} = \frac{\widehat{OF_1D}}{\widehat{P'CA'}} = \frac{OD}{OF_1} = \frac{P_1A_1}{OF_1} = \frac{CP'}{OF_1} = \frac{F}{f}$$

Le grossissement a donc la même valeur que dans la lunette astronomique et est indépendant, à très peu près, de la vue de l'observateur.

**Œilleton — Diaphragme — Champ.** — Comme le disque oculaire se forme sensiblement dans le premier plan focal de l'oculaire, on met dans ce plan un *œilleton*. L'œil de l'observateur se place contre l'œilleton.

Pour intercepter les faisceaux qui ne rencontreraient que partiellement l'oculaire, on place un *diaphragme* dans le plan focal de l'objectif. Le *champ* du télescope est limité par la nappe d'un cône ayant pour sommet le sommet du miroir et pour directrice la circonférence du diaphragme. Il a généralement une faible étendue, surtout dans les télescopes à fort grossissement; aussi ces derniers sont-ils munis d'un *chercheur*, lunette astronomique dont l'axe optique est parallèle à l'axe optique du télescope.

**Modifications apportées par Foucault.** — Foucault a apporté au télescope de Newton d'importantes modifications.

1° Les miroirs qu'on employait depuis Newton étaient des miroirs en bronze qui présentaient les inconvénients

d'être très lourds, d'avoir un assez faible pouvoir réflecteur et de se ternir rapidement à l'air. Foucault leur a substitué des miroirs en verre argentés à leur surface par des procédés chimiques. Ces miroirs sont relativement légers et ils donnent aux télescopes une clarté égale à celle des lunettes astronomiques. De plus on leur donne, en les construisant, non plus la forme sphérique, mais celle d'un paraboloïde, ce qui supprime les aberrations de sphéricité.

2° Le petit miroir plan incliné à  $45^\circ$  est remplacé par un prisme à réflexion totale (60). Les rayons qui proviennent de l'objectif subissent la réflexion totale sur l'hypoténuse de ce prisme et la quantité de lumière ainsi réfléchie est plus grande que sur un miroir plan.

3° Enfin, l'image réelle  $P_1A_1$  étant beaucoup plus nette que dans le télescope de Newton, grâce aux deux modifications précédentes, peut supporter un grossissement plus fort. C'est pourquoi Foucault a substitué à la lentille oculaire employée par Newton un oculaire composé de quatre lentilles formant une sorte d'oculaire terrestre très puissant, ce qui présente en outre l'avantage de redresser l'image donnée par le prisme à réflexion totale et permet de diminuer la longueur de l'instrument.

**Usages et détails de construction.** — Le télescope de Newton, modifié par Foucault, est employé concurremment avec la lunette astronomique pour l'observation des objets éloignés.

La figure 178 représente un télescope ordinaire de Foucault que l'on peut déplacer à volonté sur une terrasse de manière à observer un corps céleste quelconque (*télescope azimutal*). Ce télescope est en cuivre avec monture en fonte

de fer ; il est muni d'un pied supplémentaire pour observer

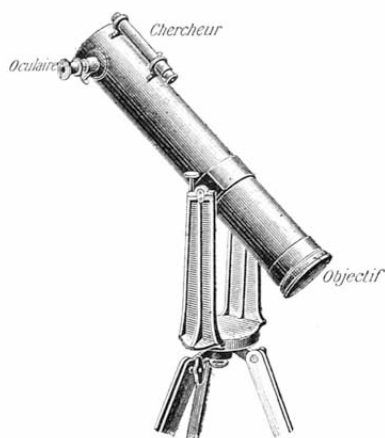


Fig. 178. —Télescope de Foucault (télescope azimutal).

debout. Suivant les dimensions du télescope, le miroir parabolisé argenté a 10 ou 20<sup>m</sup> de diamètre ; les oculaires de rechange permettent de faire varier le grossissement de 60 à 400.

Les télescopes destinés aux recherches de précision sont installés à poste fixe et d'une façon spéciale ; ils sont munis d'un cercle de déclinaison et d'un cercle horaire. Le grossissement donné par les oculaires de rechange peut aller jusqu'à 600.

#### INSTRUMENTS DE PROJECTION

**104. Définitions.** — On désigne sous le nom général d'instruments de projection des instruments propres à projeter sur un écran des images amplifiées ou réduites qui peuvent ensuite être montrées à de nombreux observateurs ou utilisées dans l'art du dessin.

Parmi les instruments de projection, les uns, comme la *chambre claire*, sont des appareils réflecteurs et ne produisent qu'un simple changement dans la direction des rayons lumineux ; les autres, comme la *chambre noire* et les *instruments de projection proprement dits*, sont constitués par un système optique convergent et donnent essentiellement des images *réelles*.

**105. Chambre claire.** — La chambre claire est destinée à

donner sur une feuille de papier l'image d'un objet de manière à permettre d'en suivre les contours au crayon.

Nous avons déjà parlé de la chambre claire que l'on adapte au microscope pour en déterminer la puissance et le grossissement. Cette chambre claire s'emploie spécialement pour dessiner les objets vus dans le microscope. L'œil apercevant à la fois le crayon et la préparation microscopique, il est facile de suivre les contours de la préparation.

Parmi les nombreuses chambres claires que l'on emploie pour le dessin d'après nature, nous décrirons la nouvelle chambre claire perfectionnée, dite *hémérographe*, du commandant Blain.

Elle se compose essentiellement de deux miroirs spéciaux

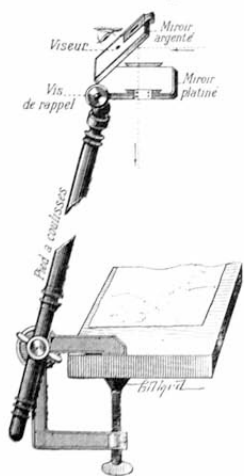


Fig. 179. — Chambre claire perfectionnée (hémérographe du C<sup>t</sup> Blain).

disposés dans une monture en cuivre (fig. 179). Le miroir supérieur est argenté ; il est percé à son centre d'un petit œilleton qui tient lieu de viseur. Le miroir inférieur, métallisé à sa surface supérieure par du platine, possède une transparence calculée de manière à permettre de voir à la fois distinctement l'objet et le crayon. Grâce à ce miroir, qui est mobile, on peut faire varier à volonté l'intensité de la lumière fournie par le miroir argenté et proportionner la lumière du papier et celle de l'image qui se projette à sa surface. La monture des miroirs est fixée à un pied à tirage composé de trois tubes qui glissent l'un dans l'autre. Ce pied est terminé par une mâchoire à vis permettant de le fixer à la table sur laquelle est posé le papier.

L'hémérographe permet d'obtenir la reproduction des objets avec leurs couleurs ; il est employé par les artistes peintres, les officiers en campagne, les architectes, etc. En plaçant

devant l'hémérographe une lunette de Galilée, on peut dessiner à une grande échelle un objet placé à un ou plusieurs kilomètres, comme s'il était placé à quelques mètres de l'observateur.

**106. Chambre noire.** — Nous avons vu qu'une chambre quelconque dans laquelle la lumière ne pénètre que par une petite ouverture percée dans un des volets, constitue une *chambre noire* (25); mais l'image n'a réellement de la netteté et de l'éclat que si l'on enchâsse dans l'ouverture une lentille convergente. Cette lentille joue le rôle d'un objectif, et l'image réelle qu'elle fournit est à une distance déterminée par la formule

$$p' = \frac{pf}{p-f}.$$

Il faut donc *mettre au point* en disposant l'écran à la distance  $p'$  de la lentille. On juge pratiquement de cette opération par la netteté de l'image qui se dessine sur l'écran.

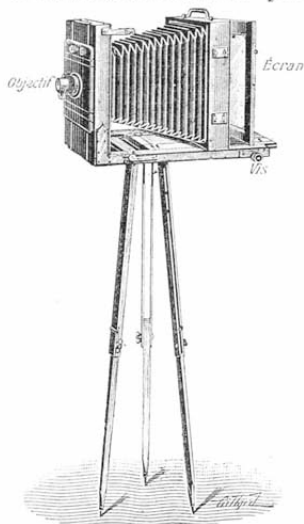


Fig. 180. — Chambre noire de photographie.

La chambre noire peut servir aux dessinateurs, mais elle est presque exclusivement employée pour la *photographie*.

La figure 180 représente une chambre noire de photographie. Elle se compose d'une caisse à soufflet dont une des faces est munie d'un objectif achromatique et dont l'autre peut être fermée, soit par un écran en glace dépolie sur lequel on met au point, soit par la plaque sensible que l'on substitue à l'écran lorsqu'on veut obtenir un cliché. La base de la boîte

porte une crémaillère avec une vis de serrage pour la mise



au point. Comme les objets que l'on photographie sont toujours situés au delà du double de la distance focale de l'objectif, les images sont toujours plus petites que les objets.

**107. Appareils de projection proprement dits.** — Les appareils de projection proprement dits sont destinés à donner sur un écran des images réelles très amplifiées de petits objets (clichés sur verre, préparations transparentes, etc.). Pour obtenir ce résultat, l'objet doit être placé à une très petite distance au delà du second plan focal de l'objectif; de plus, on le renverse pour que son image soit droite. Le grossissement linéaire de l'appareil est donné par la formule  $g = \frac{p'}{p} = \frac{p'}{f} - 1$ ,  $p'$  étant la distance de la lentille à l'écran.

Il faut remarquer que la lumière émise par l'objet sur la lentille se trouve répartie dans l'image sur une surface  $g^2$  fois plus grande. En outre, comme l'image n'est vue que par diffusion et non directement, une certaine quantité de lumière est absorbée par l'écran. L'objet doit donc être éclairé très vivement. Pour cela, on adjoint à l'objectif un *accumulateur* ou *condensateur* de lumière, qui concentre

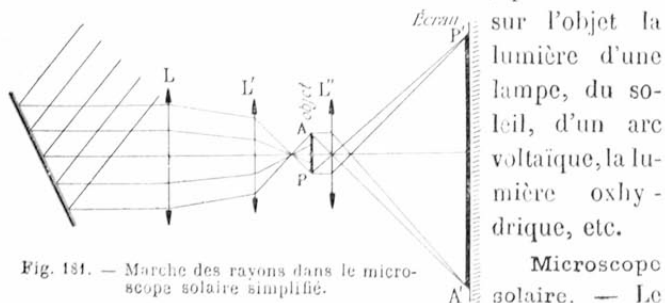


Fig. 181. — Marche des rayons dans le microscope solaire simplifié.

sur l'objet la lumière d'une lampe, du soleil, d'un arc voltaïque, la lumière oxydrique, etc.

**Microscope solaire.** — Le microscope solaire

peut être considéré comme le type des appareils de

projection. Les rayons solaires tombent sur un miroir plan appartenant à un héliostat ou à un porte-lumière et sont concentrés sur l'objet par deux lentilles  $L$  et  $L'$  (fig. 181), la première de grand diamètre, la seconde d'un diamètre moindre. L'objectif très convergent  $L'$  donne une image réelle, très agrandie,  $P'A'$ . La mise au point s'effectue en faisant varier la distance de l'objectif à l'objet.

En réalité, l'objectif est formé de trois lentilles convergentes, assez rapprochées l'une de l'autre. Ces lentilles sont centrées dans un même tube auquel on peut donner un très petit mouvement à l'aide d'un pignon et d'une crémaillère

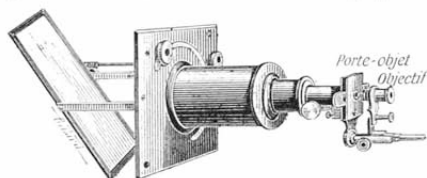


Fig. 182. — Microscope solaire adapté à un porte-lumière.

(fig. 182). L'objet est placé généralement entre deux verres, serrés entre deux plaques métalliques à ressorts. Comme les rayons calorifiques du soleil sont concentrés sur l'objet en

même temps que les rayons lumineux, on évite un trop grand échauffement en interposant entre l'objet et le condensateur de lumière une cuve transparente contenant une dissolution d'alun. L'alun étant peu diathermane (136), arrête une grande partie des rayons calorifiques.

Le tube-objectif du microscope solaire est généralement construit de manière à pouvoir s'adapter aux lanternes de projection.

Le grossissement du microscope solaire se détermine expérimentalement en remplaçant l'objet par un micromètre divisé en centièmes de millimètre et en mesurant sur l'écran l'intervalle grossi de deux traits. Le quotient de cet intervalle, mesuré en millimètres, par  $\frac{1}{100}$  représente le grossissement linéaire.

USAGES. — Le microscope solaire permet de montrer à tout un auditoire de très petits objets ; mais les images

qu'il donne ne sont pas d'une très grande netteté. On lui préfère généralement les lanternes de projection.

**Lanterne magique.** — La lanterne magique est le plus ancien des appareils de projection. Elle se compose d'une boîte en fer-blanc dans laquelle on place une petite lampe au foyer principal d'un miroir concave M (fig. 183). Le dessin à projeter se place dans une coulisse, un peu en avant d'une lentille plan-convexe très bombée L, qui concentre les rayons réfléchis par le miroir et les fait con-

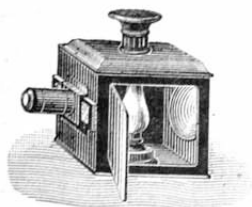
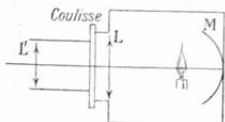


Fig. 183. — Lanterne magique ordinaire.

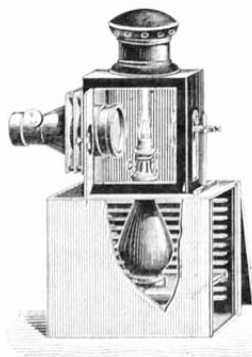


Fig. 184. — Appareil de famille construit par Mollni.

verger sur le dessin. Une deuxième lentille convergente  $L'$  donne du dessin ainsi éclairé une image réelle, renversée et très amplifiée.

On peut rattacher à la lanterne magique ordinaire une foule d'autres appareils de projection tels que le *fantascope*, le *lampascope*, les *appareils dits de famille* (fig. 184), les *lanternes américaines*, les *appareils d'agrandissement* pour les clichés photographiques, etc. Le fantascope est une lanterne magique montée sur roulettes ; en l'avancant ou la reculant devant un écran transparent placé entre la lanterne et les spectateurs, on fait varier de grandeur l'image à chaque ins-

tant. En même temps que l'on fait mouvoir la lanterne, un mécanisme déplace l'objectif de façon que l'écran demeure sans cesse dans le plan conjugué de l'objet.

Les objets que l'on projette avec les lanternes magiques sont généralement des dessins coloriés, peints sur verre. Les *sujets mouvementés* sont des dessins de forme spéciale dont on

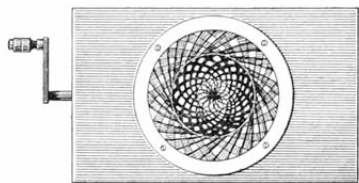


Fig. 185. — Chromatope.

peut couvrir ou découvrir des parties déterminées à l'aide de leviers opaques. Enfin on obtient des rosaces et des dessins coloriés mobiles d'un très joli effet en employant les *chromatopes* (fig. 185) : ce sont des cercles formés de secteurs présentant des colorations diverses et dont on provoque le déplacement relatif en faisant tourner le cercle avec une manivelle.

**Lanternes de projection.** — L'usage des lanternes de projection, pour les conférences et les cours, a pris dans ces dernières années un développement considérable. Dans ces lanternes, on emploie comme source de lumière soit l'arc voltaïque, soit un bâton de chaux rendu incandescent par la flamme d'un double chalumeau à oxygène et gaz d'éclairage, soit enfin une lampe à pétrole à plusieurs mèches. La source lumineuse est placée à l'intérieur

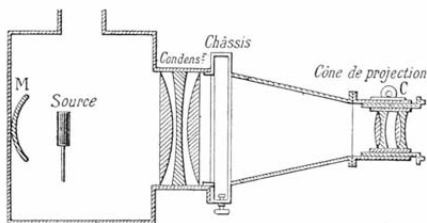


Fig. 186. — Parties essentielles d'une lanterne de projection.

de la lanterne (fig. 186) au foyer d'un miroir concave en plaqué d'argent, qui ajoute les rayons qu'il réfléchit aux rayons émis directement par la source. Deux

systèmes réfringents sont adjoints à la lanterne : 1° le con-

*densateur* de lumière, formé de trois lentilles; 2° le *cône de projection* renfermant le système objectif, formé de deux lentilles achromatiques. Ce cône a une monture indépendante du condensateur et peut être ainsi enlevé ou remis à volonté sur l'appareil. Les clichés à projeter sont placés dans un châssis entre le condensateur et le cône de projection. Le déplacement de l'objectif pour la mise au point est commandé par un bouton de crémaillère C.

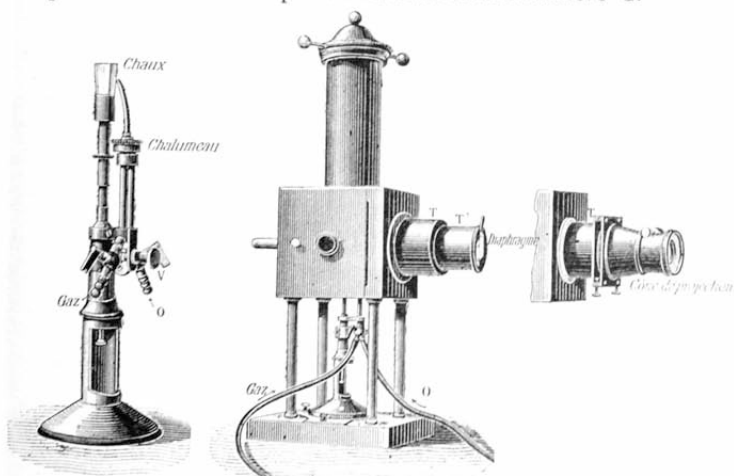


Fig. 187. — Lanterne de projection.

La figure 187 représente la lanterne de projection, grand modèle classique, construite par Ducretet. Cette lanterne est supportée par quatre colonnes en laiton. Elle peut servir soit pour les expériences d'optique, soit pour projeter. Dans le premier cas, un tube calibré T se visse sur la monture T du condensateur de lumière; il reçoit le microscope solaire ou des diaphragmes à fente variable. Dans le second cas, le tube calibré est remplacé par le cône, qui se visse directement sur le condensateur.

La lanterne de projection permet de projeter toutes les photographies transparentes, le disque de Mussenbroeck, le

phénakistoscope (93), etc. ; la coulisse peut recevoir de petites cuves de verre à faces parallèles, et l'on peut montrer à tout un auditoire des phénomènes électrochimiques.

REMARQUE. — Avec la lanterne précédente, les projections sont forcément interrompues pendant le temps que l'on met à retirer du châssis le cliché qui a été projeté pour le remplacer par un autre. Il existe des appareils, appelés *polyoramans*, qui permettent de fondre en quelque sorte les projections l'une dans l'autre,

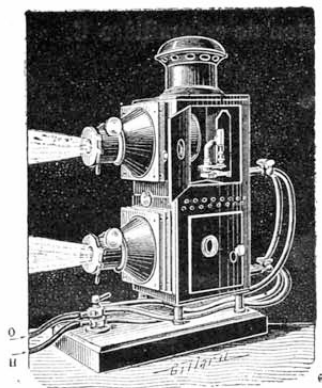


Fig. 188. — Appareil double à lumière oxyhydrique de Molteni.

de manière qu'il n'existe aucune interruption pour l'œil du spectateur. Un des plus employés est l'appareil double vertical à lumière oxyhydrique de Molteni (fig. 188). Grâce à cet appareil, l'opérateur peut, avec la plus grande facilité, manœuvrer simultanément les clichés des deux appareils : il fait disparaître progressivement le cliché du premier appareil et lui substitue progressivement, sur la même région de l'écran, le cliché du second appareil.

**Ginématographe.** — Le cinématographe est un appareil de projection qui permet de faire défiler rapidement devant l'œil une série de photographies représentant les positions successives qu'occupent des personnes ou des objets en mouvement. En vertu de la persistance des impressions lumineuses sur la rétine, l'illusion du mouvement est complète. Les photographies sont imprimées sur des rubans perforés (*films*) en celluloïd sensibilisé ; pour une même vue, elles sont au nombre de 1000 à 1200, et leur ensemble forme un film de 20 à 25<sup>m</sup> de longueur. Un obturateur à palettes se meut devant l'objectif avec une vitesse réglée ; il est destiné à masquer l'objectif pendant le passage d'une photographie à la suivante.

La figure 189 représente un cinématographe perfectionné spécial pour la projection (construit par Pathé frères). Le film enroulé dans une position renversée sur une fourche F placée

à la partie supérieure de l'appareil, s'engage sur un tambour denté T qui débite régulièrement la longueur de film nécessaire avant son passage devant l'objectif. Le film s'engage ensuite dans le châssis à projection, puis passe devant un tambour entraîneur T' animé d'un mouvement de rotation intermittent. Le mouvement de ce tambour est combiné avec le mouvement des palettes de l'obturateur de manière à produire l'arrêt de la photographie dans le cadre du châssis et son déplacement au moment où une palette de l'obturateur masque l'objectif. Deux

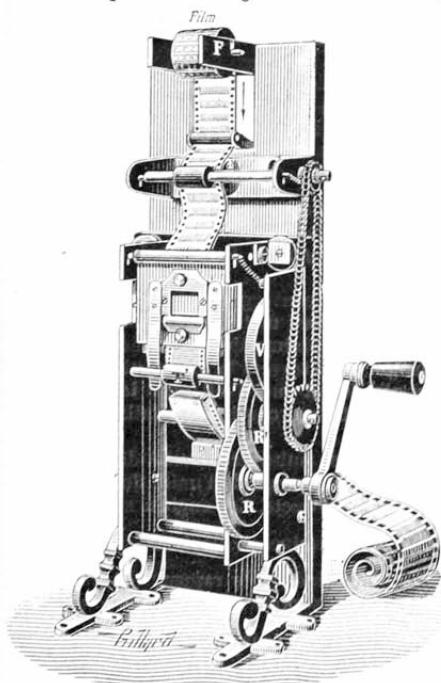


Fig. 189. — Cinématographe spécial pour la projection.

guides qui aboutissent à une ouverture pratiquée sur le devant d'une planchette conduisent le film hors de l'appareil, d'où il tombe dans une corbeille disposée à cet effet.

Le mouvement est donné à l'aide d'une manivelle et d'une roue dentée R; il est multiplié par une roue d'engrenage R' et transmis à un pignon portant un volant régulateur V. Deux pièces spéciales en acier transforment ce mouvement régulier en un mouvement intermittent qui est communiqué au tambour entraîneur.

Il est bon, pendant la mise au point, d'interposer un verre

dépoli entre le film et la lampe, car le celluloïd se déforme sous l'influence de la chaleur et peut même s'enflammer.

### RÉSUMÉ DU CHAPITRE X

Les instruments d'optique sont des systèmes de milieux réfringents ou de surfaces réfléchissantes qui substituent aux objets des images réelles ou virtuelles dans le but de remédier à l'imperfection de la vision. On peut les diviser en microscopes, télescopes et instruments de projection.

Les microscopes donnent des images virtuelles, amplifiées, des objets que leurs petites dimensions ne permettent pas d'observer suffisamment à l'œil nu. Ils comprennent la loupe et le microscope proprement dit.

La loupe est un simple oculaire convergent. L'objet étant placé entre cette lentille et son foyer, l'œil met au point de manière à voir l'image virtuelle à la distance minima de la vision distincte. Le diamètre apparent de l'image vue à travers la loupe est plus grand que le diamètre apparent de l'objet vu à l'œil nu à la même distance ; par suite, la loupe permet d'apercevoir des détails qui échapperaient à l'observation directe.

Une loupe est caractérisée par sa puissance, c'est-à-dire par l'angle sous lequel elle fait apercevoir l'image de l'unité de longueur à la distance minima de la vision distincte. Cet angle a sensiblement pour mesure le rapport  $\frac{1}{f}$  ; il s'évalue en dioptries. Le grossissement, pour un observateur déterminé, est le rapport des diamètres apparents de l'image et de l'objet, supposés tous deux à la distance minima de sa vision distincte. Il est sensiblement égal à  $\frac{\delta}{f}$  et dépend de la vue de l'observateur et de la puissance de l'oculaire.

Le microscope proprement dit donne des images renversées. Il se compose d'un objectif convergent qui donne d'un très petit objet une image réelle, renversée, amplifiée, et d'un oculaire jouant le rôle de loupe et transformant cette image en une image virtuelle, encore amplifiée.

La mise au point se fait en déplaçant par rapport à l'objet le tube qui porte l'objectif et l'oculaire.

La puissance du microscope se définit comme celle d'une loupe. Elle est égale au produit de la puissance de l'oculaire par le grossissement de l'objectif. On la détermine expérimentalement à l'aide d'une chambre claire et d'un micromètre. Le grossissement, pour un observateur déterminé, a pour valeur le produit de la puissance de l'instrument par la distance minima de la vision distincte.

Les télescopes servent généralement à observer les objets élo-



gnés. Ils comprennent les lunettes et les télescopes proprement dits.

La *lunette astronomique* sert principalement à l'étude des astres. Elle se compose d'un objectif convergent à grande surface et à long foyer qui donne d'un objet éloigné une image réelle, renversée, située dans son plan focal. Un oculaire à court foyer joue le rôle de loupe et donne une image virtuelle, renversée par rapport à l'objet. Cette image s'observe ordinairement en accommodant la lunette pour la vision à l'infini si l'œil est normal ou presbyte, pour la vision à la distance maxima de la vision distincte si l'œil est myope. On met au point en déplaçant le tube qui porte l'oculaire à l'intérieur du tube portant l'objectif.

Le grossissement est le rapport des diamètres apparents d'une dimension linéaire de l'image vue dans la lunette et de la dimension homologe de l'objet vu à l'œil nu. Il est égal au rapport  $\frac{F}{f}$  des distances focales de l'objectif et de l'oculaire et caractérise l'instrument.

Dans le plan focal de l'objectif on place un diaphragme. Si la lunette est destinée à faire des visées, on tend sur le diaphragme deux fils croisés (réticule). Pour viser un point on amène son image sur la croisée des fils du réticule ; le point se trouve alors sur l'axe optique de la lunette.

La *lunette terrestre* ou *longue-vue* diffère de la lunette astronomique en ce que les images y sont redressées par l'interposition de deux lentilles (véhicule) entre l'objectif et l'oculaire. L'ensemble du véhicule et de l'oculaire s'appelle un oculaire terrestre.

Dans la *lunette de Galilée*, l'oculaire est une lentille divergente qui donne des images droites sans l'interposition de lentilles supplémentaires. L'objectif seul donnerait une image réelle située sensiblement dans son plan focal. L'oculaire est disposé de façon que son second foyer soit situé un peu en avant du plan focal de l'objectif. Dans ces conditions, on obtient une image virtuelle droite. Si l'œil est disposé pour voir à l'infini, le grossissement est égal à  $\frac{F}{f}$  ;

dans le cas contraire, le grossissement est un peu plus faible.

La *lunette de Galilée* s'emploie le plus souvent sous forme de jumelles (deux lunettes assujetties parallèlement pour la vision binoculaire).

Le *télescope de Newton* se compose d'un objectif réflecteur (miroir sphérique concave), fixé au fond d'un long tube. Un peu en avant du plan focal de ce miroir se trouve un petit miroir plan incliné à 45°, qui empêche l'image objective de se former sur l'axe et la rejette de côté dans une position perpendiculaire à la première. Un oculaire, fixé sur le côté du tube et qui joue le rôle de loupe, amplifie cette nouvelle image et donne de l'astre une image virtuelle et renversée. Le grossissement a encore pour valeur  $\frac{F}{f}$ . Foucault

a modifié le télescope de Newton par l'emploi d'un miroir parabolique argenté, d'un prisme à réflexion totale et d'un oculaire composé.

Les instruments de projection comprennent la chambre claire, la chambre noire et les instruments de projection proprement dits.

La *chambre claire* se compose d'un système réflecteur (miroir, prisme à réflexion totale), qui donne sur le papier l'image d'un objet de manière à permettre d'en suivre les contours.

La *chambre noire* sert surtout en photographie. Elle se compose d'une caisse à soufflet portant à une extrémité une lentille convergente (objectif) et fermée à l'autre extrémité par un verre dépoli jouant le rôle d'écran.

Enfin les *appareils de projection* proprement dits sont destinés à donner sur un écran des images réelles très amplifiées de petits objets. L'objet, fortement éclairé, est placé dans une position renversée un peu au delà du plan focal d'un objectif convergent. On fait varier la distance de l'objectif à l'objet jusqu'à ce que l'image apparaisse nettement sur l'écran. Les principaux appareils de projection sont le microscope solaire, la lanterne magique, les lanternes de projection, le cinématographe. Ce dernier est fondé sur la persistance des impressions lumineuses sur la rétine.

### EXERCICES SUR LE CHAPITRE X

32. Un objet est placé à  $12^{\text{mm}}$  de l'objectif d'un microscope composé. Cet objectif a une distance focale de  $10^{\text{mm}}$ , l'oculaire de  $20^{\text{mm}}$ . Le minimum de la vision distincte de l'observateur est de  $160^{\text{mm}}$ . Quel est, dans ces conditions, le grossissement de l'instrument ?

33. Calculer la distance véritable  $D$  qui sépare l'objectif de l'oculaire dans la lunette astronomique pour un observateur qui regarde une étoile.

34. Une lunette astronomique est mise au point pour un œil voyant nettement à l'infini.

Deux points noirs distants de  $5^{\text{cm}}$  sont marqués sur l'objectif. Celui-ci étant vivement éclairé, on constate que derrière l'oculaire il se forme une image réelle des deux points noirs et que les images de ces deux points sont distantes de  $1^{\text{mm}}$ . Quel est le grossissement de cette lunette ?

35. Une lunette astronomique a un objectif de  $2^{\text{m}}$  de distance focale et un oculaire de  $1^{\text{cm}}$  de distance focale. L'image d'un astre se formant dans le plan focal principal de l'objectif, si le foyer de l'objectif coïncide avec celui de l'oculaire, l'image virtuelle aperçue par un œil placé derrière l'oculaire est rejetée à l'infini. L'appareil est alors mis au point pour un œil infiniment presbyte. On demande :

1° De combien il faut rapprocher ou éloigner l'oculaire de l'objectif si l'on veut mettre au point pour un œil myope dont la distance maxima de vision distincte serait de 20<sup>cm</sup> ;

2° Quel est le grossissement dans les deux cas : dans le cas où l'appareil est réglé pour l'œil infiniment presbyte et dans le cas où il est réglé pour l'œil myope ?

36. Une lunette de Galilée est mise au point sur une planète par un observateur dont la distance de vision distincte est  $d$ . Les distances focales des deux verres sont  $F$  et  $f$ . Calculer la distance qui sépare les centres optiques des deux lentilles.

Discuter, en faisant varier  $d$ .

*Applications numériques :*

1°  $F = 400^{\text{cm}}$ ,  $f = 20^{\text{cm}}$ ,  $d = 30^{\text{cm}}$  ;

2°  $F = 400^{\text{cm}}$ ,  $f = 20^{\text{cm}}$ ,  $d = 10^{\text{cm}}$ .

*Nota.* — L'œil est supposé au contact de l'oculaire.

37. Un observateur dont le minimum de la vision distincte est  $\delta$  regarde un objet lumineux placé à la distance  $p$ , à l'aide d'une lunette de Galilée.

Les distances focales de l'objectif et de l'oculaire de la lunette étant respectivement  $F$  et  $f$ , on demande de calculer :

1° L'écartement des deux lentilles ;

2° Le grossissement de la lunette.

Discuter le problème.

## CHAPITRE XI

### ÉTUDE DE LA DISPERSION

108. *Définition.* — Lorsqu'on fait tomber sur un prisme un faisceau de lumière *blanche* (lumière du soleil, d'une bougie, de l'arc voltaïque, lumière Drummond), non seulement le faisceau émergent n'est plus dans la direction du faisceau incident, mais encore il est élargi et nuancé de vives couleurs. Ce phénomène, découvert et étudié par Newton, a reçu le nom de *dispersion* de la lumière.

### 109. Dispersion de la lumière solaire. Spectre solaire.

Par une ouverture circulaire étroite du porte-lumière, faisons passer un faisceau cylindrique de rayons solaires et recevons ce faisceau sur un écran blanc placé à une petite distance de l'ouverture : nous obtiendrons une

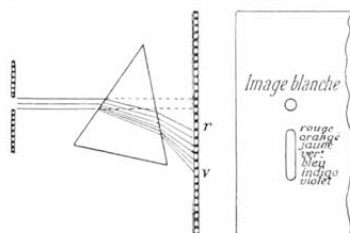


Fig. 190. — Dispersion de la lumière solaire par un prisme.

image blanche et circulaire du soleil (*fig. 190*). Interposons sur le trajet des rayons un prisme à arête horizontale et recevons le faisceau dans une section principale ; nous voyons sur l'écran une image déviée vers la

base du prisme, allongée verticalement, c'est-à-dire dans le sens perpendiculaire à l'arête du prisme, et colorée d'une infinité de teintes qui se fondent insensiblement les unes dans les autres. Ces teintes ont été rapportées aux sept types principaux dont les noms suivent et qui sont rangés par ordre de déviation croissante :

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

(En les lisant dans l'ordre inverse, on retient facilement

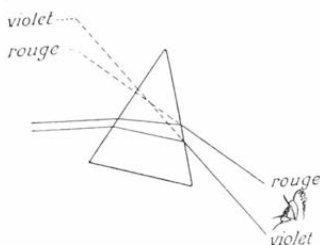


Fig. 191. — Observation d'un spectre virtuel.

les noms de ces sept couleurs : l'ensemble forme un alexandrin). L'image colorée est ce qu'on appelle le *spectre solaire*.

Si, au lieu de recevoir le faisceau réfracté sur un écran, on regarde à travers un prisme dont l'arête est horizontale une ouverture éclairée ou mieux une fente lumineuse parallèle à l'arête, on

voit, si le prisme est au minimum de déviation, une image virtuelle nette de chacune des couleurs du spectre. Cette image est un spectre *virtuel* ; elle présente le violet du côté de l'arête et le rouge du côté de la base (*fig. 191*).

**Production d'un spectre pur.** — Le spectre solaire que nous avons reçu précédemment sur un écran n'est pas une image véritable. On en obtient une, en même temps que l'on produit la dispersion dans de bonnes conditions, par la méthode suivante, connue sous le nom de *méthode de Newton*.

La lumière solaire étant reçue dans une chambre obscure par une fente rectangulaire étroite F (*fig. 192*), on

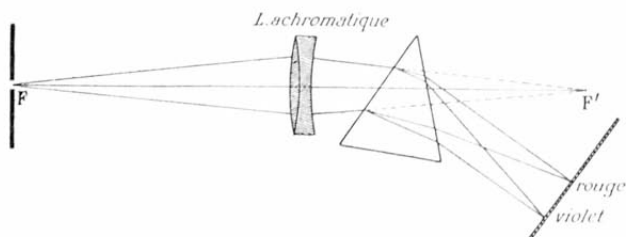


Fig. 192. — Disposition employée pour obtenir un spectre pur.

interpose sur le trajet des rayons une lentille convergente achromatique (114), distante de la fente de  $2f$ , et l'on place un écran de l'autre côté de la lentille à la même distance  $2f$ . La lentille donne sur l'écran une image réelle, brillante, de la fente lumineuse, et les dimensions de cette image sont égales à celles de la fente (74). On place alors le prisme un peu au delà de la lentille, de manière que son arête réfringente soit parallèle à la fente lumineuse, on l'oriente dans la position du *minimum de déviation* par rapport à la direction moyenne des rayons et enfin on dirige l'écran de façon qu'il soit perpendicu-

laire à cette direction moyenne, tout en restant toujours à la distance  $2f$  de la lentille.

Chacune des couleurs du spectre donne, au sortir du prisme, une image conjuguée *réelle* de la fente, à une distance du prisme égale à celle de la fente virtuelle  $F'$ . Ces images forment donc sur l'écran un spectre *réel*, et elles empiètent d'autant moins les unes sur les autres que la fente est plus étroite.

On obtient également un spectre très pur en recevant les rayons solaires dans un *spectroscope*, instrument qui sert à produire et à analyser en même temps les spectres des différentes sources lumineuses. L'étude des spectroscopes et de leurs applications sera faite dans le tome III.

**Raies du spectre solaire.** — Le spectre solaire, tel qu'on l'obtient par la méthode de Newton ou par l'emploi d'un spectroscope, sera figuré et étudié dans le tome III. Nous dirons seulement pour le moment que ce spectre n'est pas absolument *continu* : il présente un grand nombre d'intervalles obscurs très étroits, parallèles à l'arête du prisme et irrégulièrement distribués, mais occupant toujours respectivement la même position dans le spectre pour une même substance réfringente. Ces intervalles s'appellent les *raies* du spectre. Elles ont été découvertes par Wollaston et étudiées par Fraunhofer, qui a désigné les huit principales par les lettres A, B, C, D, E, F, G, H. Avec les spectroscopes puissants dont on dispose aujourd'hui, on en voit plus de 4.000.

**110. Explication de la dispersion.** — Le phénomène de la dispersion est dû à ce que *la lumière blanche est la superposition d'une infinité de lumières simples diverse-*

ment colorées et ayant chacune un indice de réfraction différent.

Cette explication, donnée par Newton, repose sur trois principes que l'on démontre par l'expérience.

I. Les couleurs du spectre sont simples. — Pour prouver que chaque couleur du spectre est simple, c'est-à-dire

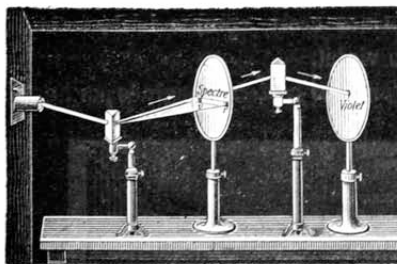


Fig. 193. — Expérience montrant que chaque couleur du spectre est simple.

indécomposable par le prisme, on reçoit un spectre solaire sur un écran opaque (fig. 193), et l'on pratique dans l'écran une ouverture étroite de manière à ne laisser passer qu'une petite portion du spectre qui paraisse de même

teinte dans toute son étendue, le violet par exemple.

En faisant tomber ce faisceau coloré sur un second prisme à arête verticale, une nouvelle déviation a lieu, mais l'image reçue après cette déviation sur un écran ne fournit pas de couleur nouvelle; elle conserve la couleur du faisceau qui passe par l'ouverture du premier écran. Chacune des lumières colorées isolées constituant le spectre est donc simple ou, comme on dit quelquefois, *monochromatique*.

II. Les couleurs du spectre ont des indices de réfraction différents. — La disposition employée dans l'expérience précédente permet de montrer que les couleurs du spectre sont inégalement *réfrangibles*. Si l'on fait tourner le prisme qui fournit le spectre autour de son arête réfringente, de manière à recevoir successivement sur l'ouver-

ture du premier écran les diverses couleurs, ces couleurs tombent sur le second prisme sous la même incidence. On constate alors que la déviation produite par le second prisme vers sa base va en croissant quand on passe du rouge au violet. Or, d'après les formules du prisme (66), si  $i$  et  $A$  sont constants, la déviation ne dépend que de l'indice de réfraction. Donc l'indice de réfraction des diverses couleurs du spectre croît, comme la déviation, depuis le rouge jusqu'au violet.

L'expérience dite des *prismes croisés*, imaginée par New-

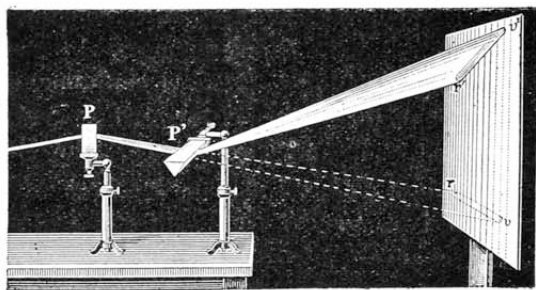


Fig. 194. — Expérience des prismes croisés.

ton, conduit à la même conclusion. On dispose l'un près de l'autre deux prismes de même substance et de même angle (*fig. 194*), l'un  $P$  ayant son arête réfringente verticale, l'autre  $P'$  ayant son arête réfringente horizontale. En recevant sur le premier prisme un faisceau horizontal de lumière solaire, on obtiendrait sur un écran blanc vertical un spectre horizontal  $rv$  si le second prisme n'existait pas. Mais ce second prisme, traversé par le faisceau dispersé qui émerge du premier prisme, dévie dans le sens vertical les diverses couleurs du premier spectre; comme il les dévie inégalement, on obtient un spectre oblique  $r'v'$ . Les



angles réfringents des deux prismes étant égaux, la déviation verticale du violet par le second prisme est égale à la déviation horizontale due au premier; le nouveau spectre  $r'v'$  doit donc avoir une inclinaison de  $45^\circ$ .

III. La superposition des couleurs du spectre reproduit la lumière blanche. — Un grand nombre d'expériences vérifient ce principe.

1° RECOMPOSITION PAR LE DISQUE ROTATIF. — Cet appareil, imaginé par Mussenbroeck et non par Newton, auquel on

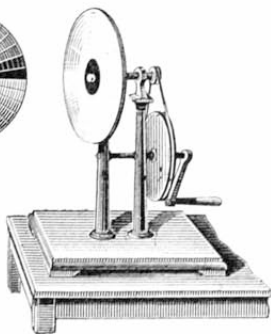
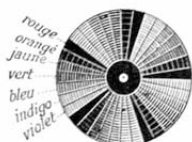


Fig. 195. — Disque rotatif pour la recombinaison de la lumière blanche.

l'attribue habituellement, se compose d'un disque en carton (*fig. 195*) sur lequel on a collé des secteurs en papier présentant successivement les sept couleurs principales

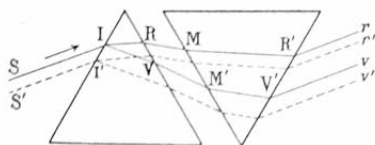


Fig. 196. — Recombinaison de la lumière blanche par un second prisme.

du spectre. En donnant au disque

un mouvement de rotation rapide autour d'un axe passant par son centre, la surface du disque paraît blanche, ou du moins d'un blanc gris, ce qui est dû à la persistance des impressions lumineuses sur la rétine.

2° RECOMPOSITION PAR UN PRISME. — On prend deux prismes de même substance et de même

angle réfringent et on les place en sens inverse l'un de

l'autre, de manière que les faces en regard soient parallèles (*fig. 196*). Si l'on fait tomber un faisceau de lumière solaire sur le premier prisme, le faisceau qui sort du second prisme donne sur un écran une image blanche, présentant seulement quelques irisations sur son bord supérieur et sur son bord inférieur.

On peut se rendre compte facilement de la recombinaison qui s'est produite. Par suite de la disposition des prismes, un rayon incident tel que  $SI$  donne un rayon rouge  $IR$ , qui sort du premier prisme suivant  $RM$ , traverse le second parallèlement à  $IR$  et sort suivant  $R'r$  parallèlement à  $SI$ . Si l'on considère le rayon violet  $IV$  correspondant à  $SI$ , il suit la route  $VM'$ ,  $M'V'$ ,  $V'v$ . Les rayons émergents correspondant à  $SI$  forment donc un faisceau parallèle  $rR'V'v$ . Comme il en est de même d'un autre rayon incident  $S'I'$  et de tous les rayons compris entre  $SI$  et  $S'I'$ , on voit que les

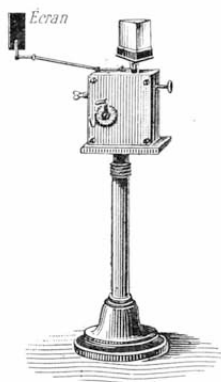


Fig. 197. — Prisme tournant pour la recombinaison de la lumière blanche.

points situés entre  $r'$  et  $v$  recevront des rayons de toutes les couleurs provenant de rayons compris dans le faisceau incident limité par  $SI$  et  $S'I'$ .

La région  $r'v$  sera donc tout à fait blanche. Quant aux bords de cette région  $r'v$ , ils seront colorés, le bord supérieur en rouge orangé, le bord inférieur en bleu violet par suite de l'isolement des rayons extrêmes.

On peut enfin montrer la recombinaison de la lumière blanche en employant un seul prisme tournant par un mouvement d'horlogerie (*fig. 197*). Cet appareil, dû à M. Stroumbo, permet de montrer en même temps le minimum de déviation et le maximum de déplacement des rayons rouges.

### 3° RECOMPOSITION PAR UNE LENTILLE OU UN MIROIR CONCAVE.

— Quand on emploie une lentille convergente, il est

nécessaire qu'elle soit *achromatique*, c'est-à-dire qu'elle n'ait qu'un plan focal pour toutes les couleurs.

Le faisceau coloré fourni par le prisme est reçu sur une lentille *L*, placée à une distance du prisme supérieure à sa distance focale. Les rayons rouges vont, après avoir été réfractés par la lentille, converger dans le plan focal en

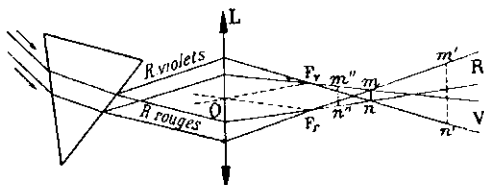


Fig. 198. — Recomposition de la lumière blanche par une lentille convergente achromatique.

un point  $F_r$  de l'axe secondaire parallèle à leur direction primitive (fig. 198); les rayons violets convergent dans le plan focal en un point  $F_v$  de l'axe secondaire parallèle à leur direction primitive. Au delà de ces points, le cône des rayons rouges et le cône des rayons violets forment des faisceaux divergents qui se traversent en  $mn$ . Or la partie  $mn$  commune aux deux faisceaux appartient aussi aux faisceaux des couleurs intermédiaires. Si donc on place un petit écran blanc dans cette région, toutes les couleurs qui y sont confondues forment sur l'écran une tache lumineuse d'un blanc parfait. Si l'écran est placé au delà de  $mn$ , en  $m'n'$  par exemple, la construction montre que l'image obtenue doit être bordée de rouge en haut et de violet en bas; au contraire, en deçà de  $mn$ , en  $m''n''$  par exemple, l'image est bordée de violet en haut et de rouge en bas.

La recombinaison de la lumière blanche peut se faire également en employant un miroir sphérique concave. L'écran doit alors être placé au foyer conjugué du prisme, c'est-à-dire

là où le miroir donne une image réelle de la face antérieure du prisme.

**411. Couleurs complémentaires.** — On dit que deux couleurs sont complémentaires lorsqu'elles donnent du blanc par leur superposition.

Supposons que, dans l'expérience de la recombinaison de la lumière par une lentille convergente, on supprime à l'aide d'un écran quelques-unes des couleurs du spectre; les couleurs conservées donnent dans la région *mn* une certaine teinte composée. Cette teinte composée et la teinte que donneraient les couleurs supprimées formeraient du blanc par leur mélange, puisqu'elles contiennent toutes les couleurs du spectre : elles sont donc *complémentaires*.

Une couleur simple du spectre peut aussi donner du blanc par sa superposition avec les autres couleurs du spectre. Si l'on supprime du spectre le rouge par exemple, l'ensemble des autres couleurs donne une sorte de vert-bleuâtre qui est une couleur composée, complémentaire du rouge. Citons encore comme couleurs complémentaires, l'orangé et le bleu foncé, le violet et le jaune-verdâtre.

**412. Couleur des corps.** — D'après Newton, les corps ne seraient pas colorés par eux-mêmes; la coloration qu'ils présentent quand ils sont éclairés par la lumière blanche résulterait de la manière inégale dont ils agissent sur les diverses couleurs qui constituent cette lumière.

**Coloration par transparence.** — Les corps transparents qui nous paraissent *incolores*, comme le verre à vitre ordinaire, l'eau sous une faible épaisseur, sont ceux qui laissent passer en quantités égales toutes les couleurs, en sorte que la lumière transmise présente la même composition que la lumière incidente. Les corps transparents qui

nous paraissent *colorés* sont ceux qui laissent passer certaines couleurs et en absorbent d'autres. Ainsi quand on interpose entre un prisme et un faisceau de lumière blanche un verre coloré en rouge (par de l'oxyde cuivreux), le spectre se réduit sensiblement à la partie rouge, les autres couleurs étant absorbées par le verre. De même, un verre bleu est un verre qui, recevant de la lumière blanche, ne transmet qu'un ensemble de rayons dont la superposition donne du bleu, et absorbe les autres.

**Coloration par diffusion.** — Les corps non transparents dépolis ne sont visibles que par la lumière qu'ils diffusent. Ils paraissent *blancs* s'ils diffusent également toutes les couleurs simples du spectre. Ils paraissent *rouges*, par exemple, s'ils ne diffusent que les rayons rouges, ou un ensemble de rayons dont la superposition donne du rouge. Enfin ceux qui, parmi ces corps, absorbent toutes les couleurs également et complètement, produisent sur l'œil le même effet que l'obscurité : on dit qu'ils sont noirs.

**REMARQUE.** — La couleur des corps dépend essentiellement de la couleur qui les éclaire. Ainsi un corps qui paraît rouge lorsqu'il est éclairé par la lumière blanche, paraît noir s'il est éclairé par des rayons bleus, par exemple, ou par des rayons jaunes. Cela tient à ce qu'il absorbe tous les rayons autres que les rayons rouges. On s'explique ainsi pourquoi les étoffes rouges paraissent si sombres le soir lorsqu'elles sont éclairées par les lampes ou la flamme du gaz, qui contiennent principalement des rayons jaunes.

Une remarque analogue peut être faite pour les teintes que les corps présentent par transparence. Si l'on regarde au travers d'un verre rouge une série de corps diversement colorés, les corps rouges seuls apparaissent avec leur couleur réelle, parce que le verre rouge ne laisse passer que les rayons rouges ; les corps jaunes, verts, etc. paraissent noirs.

**443. Pouvoir dispersif d'une substance.** — Pour une même substance, l'indice de réfraction varie, comme nous venons de

le voir, avec la couleur de la lumière ; il augmente du rouge au violet, couleur la plus réfrangible. Il faut donc toujours spécifier en donnant la valeur numérique de l'indice de réfraction d'une substance réfringente, à quelle couleur il correspond. Généralement on prend l'indice de réfraction pour la lumière *jaune* correspondant à la raie D du spectre solaire. On a ainsi ce que l'on appelle l'indice *moyen* de la substance réfringente.

La différence des indices des deux couleurs extrêmes du spectre solaire varie d'une substance à une autre. Appelons  $n_r$  et  $n_v$  les indices du rouge et du violet correspondant à un prisme d'angle A. La dispersion produite par ce prisme, c'est-à-dire la différence des déviations subies par les deux couleurs extrêmes, est égale à

$$D_v - D_r \quad \text{ou} \quad A(n_v - 1) - A(n_r - 1) \quad \text{ou} \quad A(n_v - n_r);$$

elle est donc proportionnelle à la différence des indices pour les couleurs extrêmes. Cette différence est plus grande pour le flint que pour le crown ; aussi un prisme de flint donne-t-il, dans les mêmes conditions, un spectre plus étalé qu'un prisme de crown. D'une façon générale, on appelle *pouvoir dispersif* d'une substance réfringente le rapport  $\frac{n_v - n_r}{n_j - 1}$  de la différence  $n_v - n_r$  des indices pour les couleurs extrêmes à l'excès de l'indice  $n_j$  de la couleur moyenne sur l'unité.

**114. Aberration de réfrangibilité des lentilles. Achromatisme.** — Le phénomène de la dispersion accompagnant celui de la réfraction aussi bien dans les lentilles que dans les prismes, les images données par les lentilles sont irisées sur leurs contours. Ce défaut s'appelle l'*aberration de réfrangibilité*.

La formule  $\frac{1}{f} = (n - 1) \left( \frac{1}{R} + \frac{1}{R'} \right)$ , qui donne la distance focale d'une lentille infiniment mince, contient l'indice de réfraction ; donc la valeur de  $\frac{1}{f}$  change avec la valeur de  $n$ . Or  $n$  augmente du rouge au violet ; il en

résulte que si une lentille convergente, par exemple, reçoit de la lumière blanche parallèle à son axe principal, les foyers correspondant aux diverses couleurs, tout en restant sur l'axe principal, se trouveront échelonnés sur une petite longueur dont les foyers violet et rouge seront les points extrêmes, le foyer violet étant plus rapproché de la lentille que le foyer rouge (*fig. 199*).

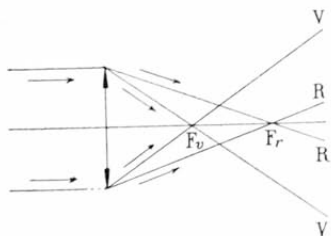


Fig. 199. — Décomposition de la lumière blanche par une lentille convergente.

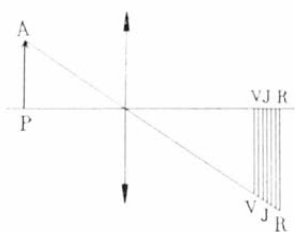


Fig. 200. — Dispersion de l'image d'un objet blanc placé devant une lentille convergente.

De même si l'on considère un objet blanc tel que AP (*fig. 200*), placé devant une lentille convergente, il y a autant d'images de l'objet qu'il y a de couleurs. En vertu des formules fondamentales

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f} \quad \text{et} \quad \frac{i}{o} = \frac{p'}{p},$$

ces images se trouvent dans des plans conjugués différents et sont, par suite, inégalement distantes de la lentille : l'image d'un objet blanc est donc irisée sur les bords.

L'expérience montre qu'en assemblant deux lentilles de substances différentes et de courbures convenablement choisies, on obtient des images sans irisation appréciable. Les systèmes ainsi construits portent le nom de *lentilles achromatiques*, et l'on appelle *achromatisme* la suppression de l'aberration de réfrangibilité.

Une lentille achromatique est formée d'une lentille convergente et d'une lentille divergente accolées (*fig. 201*), l'une en crown, l'autre en flint, verre plus dispersif. On construit la lentille convergente en crown ou en flint, suivant que le système achromatique doit être convergent ou divergent. — En

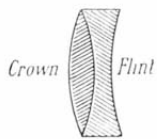


Fig. 201. — Lentille achromatique convergente.

réalité, les systèmes achromatiques formés de deux lentilles amènent en coïncidence les foyers de deux couleurs seulement et il faudrait, pour avoir un achromatisme parfait, accoler autant de lentilles qu'il y a de couleurs dans le spectre ; mais si l'achromatisme est réalisé pour deux couleurs convenablement choisies (ordinairement le rouge et le jaune), la dispersion qui subsiste est très faible et négligeable dans la pratique. Dans la lunette de Galilée, l'objectif est formé de trois lentilles dont les courbures sont calculées pour achromatiser trois couleurs.

REMARQUES. — 1° Il est facile de concevoir comment une

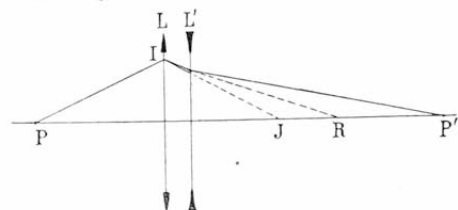


Fig. 202. — Marche d'un rayon à travers un système achromatique.

lentille convergente et une lentille divergente accolées peuvent constituer un système achromatique. A un rayon lumineux PI provenant d'un point lumineux P situé sur l'axe principal commun (*fig. 202*), correspondent des rayons diversement colorés dont le rouge et le jaune, par exemple, viendraient rencontrer l'axe aux points R et J si la deuxième lentille n'existait pas. La lentille divergente L' tend à écarter ces rayons de l'axe ; elle reporte le rayon rouge en un certain point P', mais comme le rayon jaune en se ré-



fractant à travers cette lentille est plus écarté de l'axe que le rayon rouge, on conçoit que, si les courbures sont convenablement choisies, le rayon J pourra aussi être reporté en P.

D'un autre côté, les deux lentilles ne peuvent être construites avec la même substance, car les foyers R et J ne pourraient dans ce cas se former en P' sans que les foyers des autres couleurs fussent en même temps amenés en P'. La dispersion se trouvant alors annulée complètement, il n'y aurait plus de déviation puisqu'un système réfringent homogène ne peut produire de réfraction sans dispersion, et le système cesserait d'être convergent ou divergent.

2° Le calcul donne la valeur des rayons de courbure que doivent avoir deux lentilles de substance différente pour achromatiser deux couleurs. Dans la pratique, les opticiens obtiennent l'achromatisme par des retouches et des essais méthodiques; ces moyens leur permettent en outre de rendre très faibles les aberrations de sphéricité, de sorte que l'on a des systèmes à la fois sensiblement achromatiques et aplanétiques.

## RÉSUMÉ DU CHAPITRE XI

Lorsqu'un faisceau de lumière blanche tombe sur un prisme dans le plan d'une section principale, le faisceau émergent s'étale dans le plan de cette section en se nuancant d'une infinité de vives couleurs parmi lesquelles on distingue principalement, dans l'ordre de leurs déviations croissantes, le rouge, l'orangé, le jaune, le vert, le bleu, l'indigo, le violet. L'ensemble de ces couleurs constitue un *spectre*.

Le spectre ainsi obtenu n'est pas une image véritable. Pour en avoir une et produire en même temps une belle dispersion, il faut employer un spectroscopie ou bien interposer une lentille convergente entre le prisme et la fente par laquelle arrive la lumière. On voit ainsi que le spectre solaire n'est pas continu; il est sillonné d'une multitude de raies obscures parallèles à l'arête du prisme.

Le phénomène de la dispersion est dû à ce que la lumière blanche est la superposition d'une infinité de couleurs simples inégalement réfrangibles. Newton a montré en effet: 1° que les couleurs du spectre sont simples, c'est-à-dire indécomposables par leur passage à travers un second prisme; 2° que ces couleurs sont inégalement réfrangibles (expérience des prismes croisés); 3° que leur superposition reproduit la lumière blanche (recomposition par le disque rotatif, par deux prismes identiques orientés en sens inverse, par une lentille convergente).

Deux couleurs qui donnent du blanc par leur superposition sont dites *complémentaires*; ex. : le rouge et le vert.

Parmi les corps transparents, ceux qui laissent passer en quantités égales toutes les couleurs nous paraissent incolores; ceux qui laissent passer certaines couleurs et en absorbent d'autres sont colorés. Les corps non transparents dépolis sont blancs s'ils diffusent également toutes les couleurs du spectre; ils sont noirs s'ils les absorbent toutes.

Le phénomène de la dispersion accompagnant la réfraction dans les lentilles aussi bien que dans les prismes, les images données par les lentilles sont irisées sur leurs bords. Ce défaut s'appelle *aberration de réfrangibilité*. On le corrige par l'emploi de deux lentilles accolées, formées de substances réfringentes différentes (crown et flint). L'ensemble de ces deux lentilles constitue un système *achromatique*.

---

## CHAPITRE XII

### PHOTOMÉTRIE

---

**115. Définitions.** — La photométrie est la partie de l'Optique qui a pour but de comparer entre elles les intensités des diverses sources lumineuses.

On appelle *intensité* d'une source lumineuse la quantité de lumière qu'elle envoie sur l'unité de surface (1<sup>re</sup>) recevant normalement la lumière et placée à l'unité de distance. C'est donc *l'éclairement normal à l'unité de distance*.

D'après cela, deux sources qui produisent des éclaircissements égaux à l'unité de distance sur deux surfaces égales qu'elles éclairent séparément et normalement, envoient sur ces deux surfaces des quantités de lumière égales, ou, autrement dit, ont la *même intensité*. La difficulté est de constater *l'égalité d'éclairement*. On ne possède aucun moyen physique pour cela; c'est l'œil de l'observateur qui

doit apprécier cette égalité. L'appréciation par l'œil est d'ailleurs suffisamment exacte lorsque les sources à comparer ont la même couleur.

**116. Variation de l'éclairement normal avec la distance de la source lumineuse.** — *L'éclairement produit par une source lumineuse de dimensions négligeables sur une surface qui reçoit normalement les rayons, varie en raison inverse du carré de la distance de la source à la surface éclairée.*

Cette loi importante, énoncée par Képler, se démontre soit par le raisonnement, soit par l'expérience.

**Démonstration par le raisonnement.** — Considérons deux sphères concentriques ayant pour rayons  $R$  et  $2R$  et pour centre une source lumineuse de dimensions assez petites pour qu'on puisse la supposer réduite à un point. En admettant que la lumière se propage également dans toutes les directions et que la quantité  $Q$  émise par la source reste constante, la sphère de rayon  $R$  recevra par unité de surface une quantité de lumière  $q = \frac{Q}{4\pi R^2}$  et la sphère de rayon

$2R$ , une quantité  $q' = \frac{Q}{4\pi(2R)^2} = \frac{Q}{16\pi R^2}$ . On a donc

$$\frac{q}{q'} = \frac{16\pi R^2}{4\pi R^2} = \frac{4}{1}.$$

Chaque unité de surface de la deuxième sphère recevra donc quatre fois moins de lumière que chaque unité de surface de la première sphère.

**Démonstration par l'expérience.** — On vérifie expérimentalement la loi de Képler en s'appuyant sur le principe de l'addition des éclairements. Si 2, 3, ... sources identiques sont placées côte à côte à la même distance d'un écran blanc qu'elles éclairent normalement, on admet qu'elles produisent ensemble un éclairement double, triple, ... de celui que produit chacune d'elles isolément.

Cela posé, prenons un écran vertical translucide (papier huilé, verre translucide) ; divisons-le en deux parties égales par une cloison à faces noircies, perpendiculaire à

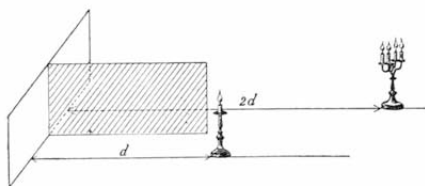


Fig. 203. — Vérification de la loi de Képler.

l'écran (*fig. 203*), puis plaçons deux bougies aussi identiques que possible de part et d'autre de la cloison et à une même distance de l'écran (50<sup>cm</sup> par exemple). Ces bougies éclairent également, l'une, la moitié de droite de l'écran, l'autre, la moitié de gauche. En approchant ou en éloignant l'une des deux bougies, l'éclairement correspondant augmente ou diminue ; il redevient le même si nous remplaçons cette bougie mobile par 4 bougies égales placées à une distance de 1<sup>m</sup>. Comme chacune des 4 bougies donne un éclairement égal au quart de l'éclairement total provenant des 4 bougies, on en conclut que l'éclairement dû à une bougie est devenu à 1<sup>m</sup> quatre fois plus petit qu'à 50<sup>cm</sup>. Nous trouverions de même qu'il faut placer 9 bougies à 1<sup>m</sup>,50 pour produire le même éclairement qu'une seule à 50<sup>cm</sup>, ce qui démontre la loi de Képler.

**117. Variation de l'éclairement avec l'inclinaison de la surface éclairée.** — *La quantité de lumière reçue obliquement par une surface est proportionnelle au cosinus de l'angle que font les rayons lumineux incidents avec la normale à la surface.*

Considérons un faisceau de rayons parallèles tombant obliquement sur une surface plane MN, d'aire S (*fig. 204*), et

soit  $MN'$  la section droite, d'aire  $s$ , du cylindre formé par les rayons. La quantité de lumière  $Q$  reçue par la surface  $MN$  est la même que celle reçue par  $M'N'$ . Par suite la quantité  $q$  de lumière reçue par chaque unité de surface de  $MN$  sera

$\frac{Q}{S}$  et la quantité  $q'$  reçue par chaque unité de surface de  $M'N'$ ,  $\frac{Q}{s}$ . On a donc

$$\frac{q}{q'} = \frac{s}{S},$$

et comme  $s = S \cos \alpha$ , il vient

$$\frac{q}{q'} = \cos \alpha, \quad \text{d'où} \quad q = q' \cos \alpha.$$

Dans le cas où la lumière qui tombe sur une surface oblique est divergente, le théorème s'applique encore, à la condition que le cône de rayons divergents ait une ouverture très petite, et que les sections de ce cône qui sont éclairées obliquement soient également très petites.

**118. Principe fondamental de la photométrie.** — *Le rapport des intensités de deux sources lumineuses est égal au carré du rapport des distances auxquelles il faut placer les deux sources pour qu'elles éclairent également une même surface dans les mêmes conditions.*

Ce principe est une conséquence de la loi de Képler.

Supposons en effet qu'une source d'intensité  $I$ , placée normalement à une distance  $d$  d'un écran, y produise le même éclairement qu'une deuxième source d'intensité  $I'$  placée, normalement aussi, à une distance  $d'$ . La quantité de lumière envoyée par la première source sur l'unité de surface de l'écran est  $\frac{I}{d^2}$ ; la quantité envoyée par la

deuxième source sur la même surface est  $\frac{I'}{d'^2}$ . On a donc

$$\frac{I}{d^2} = \frac{I'}{d'^2} \quad \text{ou} \quad \frac{I}{I'} = \frac{d^2}{d'^2}.$$

Telle est la méthode que l'on applique généralement pour comparer les intensités de deux sources lumineuses.

**419. Étalons photométriques.** — Si, au lieu de comparer les intensités de deux sources lumineuses, on veut mesurer ces intensités en valeur absolue, il faut les comparer à l'intensité d'un *étalon photométrique* qui reste autant que possible identique à lui-même.

Le seul étalon photométrique constant est le *Violle* : c'est l'intensité, dans une direction normale, d'un centimètre carré de la surface d'un bain de platine à la température de fusion. Cet étalon a été adopté comme *unité absolue* par la Conférence internationale (1884); il est trop grand pour la pratique, c'est pourquoi le Congrès des Électriciens réuni en 1889 a recommandé comme unité courante la *bougie décimale*, qui vaut  $\frac{1}{20}$  de Violle.

Dans la pratique on emploie divers étalons photométriques dont l'intensité est plus ou moins variable. Ce sont :

En France, la *bougie*, intensité fournie par la bougie stéarique de l'Étoile; ou plus souvent le *Carcel*, intensité fournie par une lampe réglée de manière à brûler par heure 42<sup>gr</sup> d'huile de colza épurée;

En Angleterre, la *candle* ou *Parliamentary Standard*, intensité fournie par une bougie de spermaceti (blanc de baleine), brûlant 7<sup>gr</sup>,77 par heure;

En Allemagne, le *Kerzen*, intensité fournie par une bougie de paraffine de 2<sup>cm</sup> de diamètre et brûlant avec une flamme de 0<sup>cm</sup>,5.

Le Violle équivaut à 2<sup>carcels</sup>,08. Le Carcel équivaut à 6,5 bougies françaises, à 7,4 candles, à 7,6 Kerzen. Enfin on emploie aussi l'étalon *Hefner*, intensité fournie par la flamme

d'une mèche de dimensions déterminées, saturée d'acétate d'amyle. L'Hefner vaut la  $\frac{1}{9}$  partie d'un Carcel.

## PHOTOMÈTRES

**120. Considérations générales.** — Les photomètres sont des appareils qui servent à comparer les intensités lumineuses des diverses sources de lumière.

Les photomètres ordinaires reposent sur le principe que nous avons donné plus haut (118). On détermine les distances  $d$  et  $d'$  auxquelles on doit placer deux surfaces identiques normalement éclairées par chacune des deux sources à comparer, pour avoir l'égalité d'éclaircissement, et on applique ensuite la proportion  $\frac{I}{I'} = \frac{d^2}{d'^2}$ . Les plus usités sont ceux de *Foucault*, de *Rumford* et de *Bunsen*.

Dans d'autres photomètres, on égalise les intensités des sources à comparer en faisant varier les sections de passage de la lumière. Nous citerons comme exemple le photomètre de *M. Mascart*.

**121. Photomètre de Foucault.** — Le photomètre de Foucault est un perfectionnement du photomètre de Bouguer qui nous a servi à vérifier la loi de Képler (116); il a été adopté par Regnault et Dumas pour la détermination quotidienne du pouvoir éclairant du gaz de la Compagnie parisienne.

L'écran translucide est une lame mince de verre sur laquelle on a déposé une couche de lait que l'on a concentré ensuite par évaporation. Cette lame est placée au fond d'une caisse rectangulaire (*fig.* 205), noircie intérieurement pour éviter toute réflexion accidentelle; elle est divisée en deux parties égales par une cloison noircie C

qui peut s'écarter plus ou moins de la lame par le jeu d'un pignon et d'une crémaillère, de façon que les deux moitiés éclairées

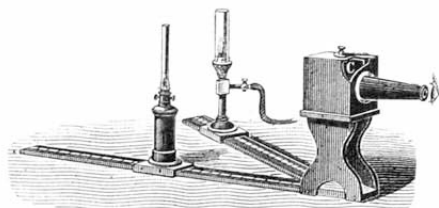


Fig. 205. — Photomètre de Foucault.

par les deux sources soient *exactement juxtaposées*.

Cette juxtaposition des deux surfaces à comparer rend l'appréciation

beaucoup plus précise que lorsqu'un espace sombre existe entre les deux parties de l'écran translucide, comme dans le photomètre de Bouguer. Les lumières à comparer sont placées sur deux supports glissant le long de deux règles graduées, également inclinées sur la lame translucide. Enfin, pour éviter l'influence de la lumière diffuse de la salle, on monte devant la lame une sorte d'entonnoir en métal noirci, placé normalement, et à l'extrémité duquel on applique l'œil.

**MANIÈRE D'OPÉRER.** — On intercepte la source la plus intense et l'on approche l'autre au point voulu pour que la moitié translucide qui lui correspond ait un bon degré d'éclairement; on note alors la distance  $d$ .

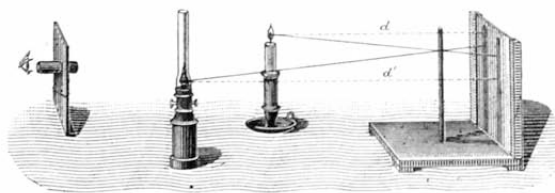
On démasque la source la plus intense et on l'éloigne jusqu'à ce que l'œil juge les deux moitiés de la lame translucide éclairées également (on a eu soin en même temps d'avancer ou de reculer la cloison C à l'aide du bouton B de façon à supprimer toute ligne sombre ou lumineuse entre les deux moitiés de la lame). On inscrit alors la distance  $d'$ . Soit  $n$  la valeur du rapport  $\frac{d^2}{d'^2}$ . On a  $I = nI'$ .

On change enfin les deux sources de côté et l'on recommence les mêmes opérations pour avoir une moyenne définitive.

**122. Photomètre de Rumford.** — Ce photomètre est



plus simple que le précédent. Il consiste en une tige verticale noircie disposée devant un écran blanc placé verticalement sur une table (*fig.* 206). Chacune des deux sources à comparer donne sur l'écran une ombre de la



*Fig.* 206. — Photomètre de Rumford.

tige, et l'ombre due à l'une des sources se trouve ainsi éclairée par l'autre source. On éloigne progressivement la source la plus intense jusqu'à ce que les deux ombres paraissent également éclairées, puis on mesure les distances  $d$  et  $d'$  des sources aux ombres qu'elles éclairent et on applique la proportion qui est la loi fondamentale de la photométrie.

**123. Photomètre de Bunsen.** — Le photomètre de Bunsen repose sur le principe suivant : soit une feuille de papier blanc sur laquelle on a fait une tache grasse. Quand deux sources sont placées de part et d'autre de cette feuille, la tache étant située sur la ligne des deux sources, l'œil voit la tache disparaître, lorsque les éclaircissements sur le papier sont égaux. C'est donc une méthode de réduction à zéro, et, par suite, une méthode assez précise.

Il faut d'abord construire l'écran de papier portant la tache. Pour cela, on trempe une tête de vis dans de la paraffine fondue et on l'applique sur une feuille de papier blanc. On tend ensuite fortement le papier ainsi préparé sur un châssis monté sur un chariot glissant le long d'une règle divisée (*fig.* 207). Les deux sources à comparer sont placées

sur des supports mobiles le long de la règle. On fait varier

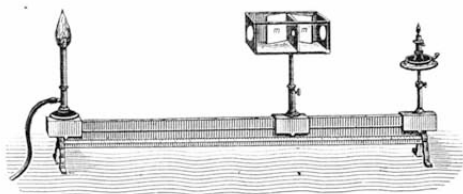


Fig. 207. — Photomètre Bunsen (modification Edge).

la distance de l'une des sources au papier de façon que l'observateur n'aperçoive plus la tache, ni en sombre sur fond lumineux, ni en lumineux sur fond sombre. Dans ces conditions, le papier est également éclairé sur ses deux faces. La source S étant alors à une distance  $d$  de la tache et la source S' à une distance  $d'$ , on a

$$\frac{I}{I'} = \frac{d^2}{d'^2}.$$

Souvent, on dispose de part et d'autre du papier qui porte la tache deux petits miroirs plans inclinés de manière à permettre à l'observateur d'apercevoir simultanément et avec le même œil les images des deux faces du papier (modification Edge).

**124. Photomètre de M. Mascart.** — Les photomètres précédents font connaître le rapport des intensités de deux sources lumineuses, mais ils ne permettent pas de déterminer l'éclairement des objets en général, c'est-à-dire la quantité de lumière dont on dispose pour se diriger, l'éclat que prennent les objets pour le travail manuel, etc. Le photomètre de M. Mascart, photomètre qu'on peut appeler un *lucimètre*, permet d'étudier la distribution de la lumière en tous les points d'une salle éclairée. Il consiste en principe à éclairer les deux portions d'un même écran en verre dépoli (*verre d'épreuve*) respectivement par une fraction de la lumière générale à étudier et par une fraction d'une lumière-étalon, et à faire varier l'une ou l'autre de ces deux fractions de manière que le verre d'épreuve ait un éclat uniforme.

La figure 208 représente ce photomètre tel qu'il est construit par M. Pellin. L'éclairage dont on veut mesurer l'intensité est reçu sur un écran E en papier (*écran récepteur*) derrière lequel se trouve un miroir plan M, incliné à  $45^\circ$ . Les rayons réfléchis par le miroir sont reçus sur une lentille L, qui donne une image de l'écran dans le plan d'un diaphragme D et éclaire ainsi la moitié supérieure du verre d'épreuve, porté par ce diaphragme. La *lampe-étalon* ou lampe de comparaison S est montée à l'extrémité d'un tube parallèle au tube qui contient le miroir M et la lentille L ;

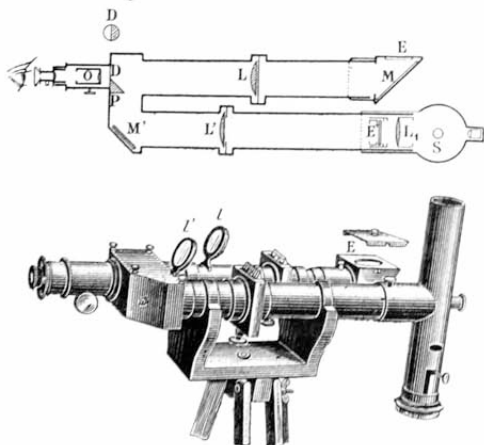


Fig. 208. — Photomètre de M. Mascart.

les rayons qu'elle émet sont rendus sensiblement parallèles par une lentille de champ  $L_1$  et éclairent un écran  $E'$  semblable à l'écran E. Une lentille  $L'$  donne de l'écran  $E'$  une image qui se forme également dans le plan du diaphragme D après réflexion sur un miroir incliné  $M'$  et sur un prisme à réflexion totale P. D'après les dimensions du prisme P, la lumière provenant de la lampe-étalon ne peut éclairer que la moitié inférieure du verre d'épreuve. On vise à l'aide d'une loupe oculaire O. Enfin les lentilles L et  $L'$  sont munies l'une et l'autre d'une ouverture rectangulaire à volets mobiles, de sorte que l'on peut diminuer à volonté l'éclat de chacune des moitiés du verre d'épreuve. Les volets

portent des échelles dont on peut lire les divisions à l'aide de loupes  $l$  et  $l'$ , sans quitter le plau d'observation.

**125. Applications des photomètres.** — Les photomètres servent à vérifier si le pouvoir éclairant du gaz est conforme au pouvoir éclairant imposé aux Compagnies de gaz par les cahiers des charges. On les emploie pour comparer les intensités des différents becs de gaz, des lampes à arc et à incandescence, etc. Le photomètre de M. Mascart a servi à déterminer la répartition de la lumière à l'Opéra de Paris.

**REMARQUE.** — Les divers photomètres que nous avons décrits ne peuvent donner d'indications exactes que si les sources lumineuses à comparer ont la même teinte. Quand on veut comparer les intensités de deux sources ayant des teintes différentes, on se sert d'appareils appelés *spectrophotomètres*. Ces appareils comprennent un spectroscopie qui analyse la lumière à étudier, et une disposition photométrique spéciale qui permet de comparer les intensités pour chaque couleur simple.

## RÉSUMÉ DU CHAPITRE XII

La *photométrie* s'occupe de la comparaison des intensités des sources lumineuses. L'*intensité* d'une source est la quantité de lumière qu'elle envoie normalement sur l'unité de surface à l'unité de distance. Deux sources ont la même intensité si elles éclairent également à l'unité de distance deux surfaces égales recevant les rayons normalement. C'est l'œil qui juge de l'égalité d'éclairement.

L'éclairement produit par une source lumineuse réduite à un point sur une surface recevant normalement les rayons, varie en raison inverse du carré de la distance de la source à la surface éclairée (loi de Képler).

Le rapport des intensités de deux sources lumineuses est égal au carré du rapport des distances auxquelles il faut placer les deux sources pour qu'elles produisent le même éclairement sur une même surface qui reçoit les rayons normalement (principe fondamental de la photométrie).

Quand on veut mesurer l'intensité d'une source en valeur absolue, on compare cette intensité à celle d'un étalon. L'étalon adopté est le *Violle*, intensité, dans une direction normale, d'un centimètre

carré de la surface d'un bain de platine à la température de fusion. Dans la pratique, on emploie souvent le *Carcel*, intensité d'une lampe brûlant 42<sup>gr</sup> d'huile de colza à l'heure.

Les *photomètres* servent à comparer les intensités des sources de lumière. La plupart sont basés sur la relation  $\frac{I}{V} = \frac{d^2}{d'^2}$ . Les principaux sont les photomètres de Foucault, de Rumford et de Bunsen.

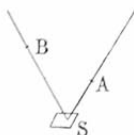
Dans le photomètre de Foucault, les deux sources lumineuses éclairent chacune la moitié d'un écran translucide placé au fond d'une caisse noircie et divisée en deux parties égales par une cloison opaque. On règle les distances des sources à l'écran de manière que les deux moitiés de l'écran soient également éclairées.

Dans le photomètre de Bunsen, les deux sources sont placées de part et d'autre d'une tache grasse qui disparaît lorsque les éclairagements sur le papier qui la porte sont égaux.

#### EXERCICES SUR LE CHAPITRE XII

38. Un brûleur à gaz placé à 75<sup>cm</sup> d'un écran et une lampe Carcel placée à 2<sup>m</sup> du même écran l'éclairent également. Quelle est l'intensité du brûleur exprimée en Carcels ?

39. Deux sources lumineuses dont les intensités sont entre elles comme les nombres 1 et 4 sont distantes de 2<sup>m</sup>. Trouver géométriquement sur la ligne qui joint les deux sources un point également éclairé par chacune d'elles.



40. Deux points lumineux A et B, de même intensité lumineuse, éclairent une très petite surface S ; ces points peuvent se déplacer sur deux droites SA et SB également inclinées sur la surface S.

Etablir la relation qui doit exister entre les distances  $SA = x$  et  $SB = y$  pour que la petite surface considérée conserve un éclairage constant.

---

#### CHAPITRE XIII

#### CHALEUR RAYONNANTE

---

126. *Considérations générales.* — On dit que la chaleur se propage par rayonnement lorsqu'elle passe d'une région à une

autre sans échauffer sensiblement les corps qu'elle traverse. Ce caractère distingue la propagation par rayonnement de la propagation par conductibilité et par convection que nous avons étudiée dans le tome I. Ainsi la chaleur solaire peut se transmettre à travers une plaque ou une lentille de glace sans en déterminer la fusion même partielle. On éprouve une impression de chaleur en se plaçant à une certaine distance d'un poêle, sans que l'air ambiant soit sensiblement échauffé.

La chaleur qui se propage par rayonnement, ou *chaleur rayonnante*, présente avec la lumière les analogies les plus intimes. Son étude nous montrera que la chaleur et la lumière sont identiques et qu'elles sont dues à une seule et même cause, à un mouvement vibratoire très rapide des molécules des corps qui se transmet par l'intermédiaire de l'éther du milieu ambiant (19).

#### PROPAGATION DE LA CHALEUR RAYONNANTE

**127. Principes fondamentaux.** — La propagation de la chaleur rayonnante satisfait aux principes suivants, identiques à ceux que nous avons établis pour la propagation de la lumière.

1° *Dans un milieu homogène, la chaleur se propage en ligne droite.* On vérifie approximativement ce principe en interposant un petit écran de carton entre une source calorifique de petites dimensions et le réservoir d'un thermomètre très sensible : on n'observe plus dans ces conditions aucune élévation de température.

La ligne droite suivant laquelle la chaleur émanée d'un point agit sur un autre point est un *rayon calorifique* ou *rayon de chaleur*. Un ensemble de rayons est un *faisceau calorifique*. Comme une source de chaleur émet de la chaleur dans toutes les directions, toute droite partant d'un

point quelconque de cette source représente la direction d'un rayon de chaleur.

2° *La chaleur rayonnante se propage dans le vide.* Ce principe est vrai aussi bien pour la chaleur émise par les corps lumineux (chaleur lumineuse) que pour celle émise par les corps non lumineux (chaleur obscure). En effet, la chaleur qui nous arrive du soleil avec la lumière ne nous parvient qu'après avoir traversé un espace vide de toute matière pondérable. D'un autre côté, si l'on plonge dans l'eau chaude un ballon où l'on a fait le vide barométrique

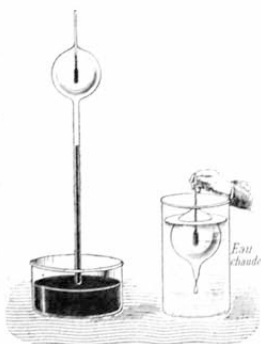


Fig. 209. — Expérience de Rumford.

et qui contient le réservoir d'un thermomètre soudé par sa tige à la paroi supérieure (fig. 209), on voit le thermomètre monter instantanément (expérience de Rumford). Dans ce cas, la transmission est trop rapide pour être due à la conductibilité par la tige du thermomètre; elle se produit d'ailleurs aussi bien quand on met de la glace autour de la sou-

dure du thermomètre et du ballon.

3° *La vitesse de propagation de la chaleur rayonnante dans le vide est égale à la vitesse de propagation de la lumière dans le vide.* Elle est donc d'environ  $300\,000\text{ km}$  par seconde.

**128. Réflexion de la chaleur rayonnante.** — Les rayons calorifiques se réfléchissent d'après les mêmes lois que les rayons lumineux :

1° Le rayon calorifique réfléchi reste dans le plan d'incidence ;

2° L'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence.

Ces lois peuvent se vérifier directement, mais on se contente le plus souvent de les vérifier dans leurs conséquences, en particulier par l'expérience des miroirs conjugués.

Deux miroirs sphériques ou paraboliques concaves, en laiton poli, sont disposés en regard l'un de l'autre à plusieurs mètres de distance de manière que leurs axes coïncident (fig. 210).

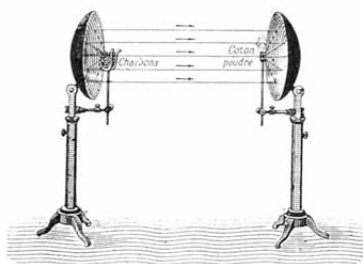


Fig. 210. — Expérience des miroirs conjugués.

Au foyer principal de l'un, on place une petite corbeille métallique remplie de charbons ardents; au foyer principal de l'autre, une tige supportant un corps facilement inflammable, comme de l'amadou ou du coton-

poudre. Dans ces conditions, les rayons lumineux partis des charbons deviennent après la réflexion parallèles à l'axe commun des deux miroirs et vont par suite, après une deuxième réflexion, passer au foyer principal du second miroir. Il en est de même des rayons calorifiques, car le corps combustible placé en ce foyer prend feu, tandis qu'en deçà et au delà il ne s'enflamme pas.

Si l'on substitue aux charbons un bloc de glace et au corps combustible le réservoir d'un thermomètre sensible, on voit le thermomètre baisser. Ce phénomène, que l'on attribuait autrefois à des rayons frigorigènes émis par la glace, était connu sous le nom de *réflexion apparente du froid*. Il s'explique en admettant que tous les corps, chauds ou froids, émettent constamment de la chaleur, mais en quantités inégales (138). Dans le cas qui nous occupe, le thermomètre



baisse parce qu'il envoie au foyer du premier miroir plus de chaleur qu'il n'en reçoit de la glace placée en ce point.

**Applications.** — La concentration des rayons calorifiques au foyer des miroirs concaves est utilisée pour obtenir de hautes températures (*miroirs ardents*). C'est ainsi qu'un miroir concave, convenablement dirigé vers le soleil, permet d'enflammer facilement de l'amadou, du coton-poudre, et même de fondre certains métaux placés au foyer. Buffon, en recevant les rayons solaires sur une série de miroirs plans inclinés disposés de manière que les rayons réfléchis par chacun d'eux vissent concourir en un même point, parvint à enflammer du hêtre goudronné à environ 70<sup>m</sup> de distance. Cette expérience donne une certaine véracité au récit d'après lequel Archimède se serait servi de miroirs ardents pour incendier les vaisseaux romains devant Syracuse. Enfin on utilise la concentration de la chaleur solaire par réflexion dans les *réflecteurs de Mouchot*.

La figure 211 représente un petit réflecteur de Mouchot (modèle des cabinets de physique). Il se compose d'un réflecteur conique en verre plaqué

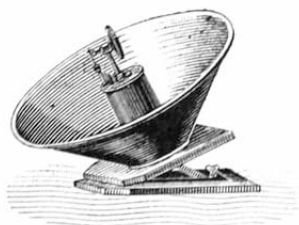


Fig. 211. — Réflecteur de Mouchot.

d'argent que l'on tourne vers le soleil pour en recueillir les rayons calorifiques, et d'une série d'accessoires qui peuvent être placés dans l'axe du réflecteur pour absorber la chaleur qu'il concentre. Ces accessoires comprennent : une petite chaudière avec machine à vapeur pour la transformation de la chaleur en force motrice ; un petit creuset permettant la fusion de 30 à 40<sup>g</sup> de plomb en une minute ; des petits matras en verre pour l'ébullition de l'eau, etc.

**REMARQUE.** — Comme dans le cas de la lumière, un faisceau

calorifique incident formé de rayons parallèles n'est réfléchi dans une direction unique que si la surface est exactement plane. Une surface mate ou une surface recouverte de blanc de céruse, par exemple, réfléchit de la chaleur dans toutes les directions : on dit que la chaleur est *diffusée*. Avec les métaux ou le verre polis, qui réfléchissent régulièrement la chaleur qu'ils n'absorbent pas, avec une surface enduite de noir de fumée, qui absorbe tous les faisceaux incidents, la diffusion est négligeable.

**129. Réfraction de la chaleur rayonnante.** — Lorsqu'un rayon calorifique passe obliquement d'un milieu dans un autre, il se réfracte à la surface de séparation des deux milieux. Les lois de la réfraction sont les mêmes que pour la lumière :

1° Le rayon calorifique réfracté est dans le plan d'incidence ;

2° Entre le sinus de l'angle d'incidence et le sinus de l'angle de réfraction il existe un rapport constant.

Ces lois conduisent aux mêmes conséquences que lorsqu'il s'agit de la lumière : concentration de la chaleur par les lentilles convergentes, dispersion de la chaleur par les prismes, etc.

**Concentration de la chaleur par les lentilles convergentes.** — En dirigeant vers le soleil l'axe principal d'une lentille convergente, on obtient au foyer principal une concentration de chaleur suffisante pour enflammer de l'amadou ou du coton-poudre. L'expérience réussit également avec une lentille de glace. Quand on emploie une lentille à échelons, la concentration de chaleur au foyer est telle que du bois s'y enflamme, de l'étain y fond rapidement, etc.

**Dispersion de la chaleur par les prismes.** — Si l'on forme un spectre réel de la lumière solaire (109) avec une lentille et un prisme de sel gemme, substance qui laisse passer la totalité de la chaleur incidente, et qu'on explore

les différentes parties du faisceau dispersé avec un appareil indiquant de très faibles variations de température, on constate qu'il y a de la chaleur rayonnante dans toutes les régions du spectre. La quantité de chaleur est très faible dans le violet ; elle augmente à mesure qu'on se rapproche du rouge, continue de croître au delà du rouge jusqu'à atteindre un maximum, et disparaît progressivement à une distance du rouge à peu près égale à la longueur du spectre lumineux. Cette expérience montre : 1° qu'il y a des chaleurs de diverses réfrangibilités puisqu'elles se séparent en un spectre dilaté comme le spectre lumineux ; 2° que les radiations émises par le soleil comprennent non seulement des rayons à la fois calorifiques et lumineux, mais aussi des rayons de chaleur obscure qui ont un indice de réfraction moindre que le rouge extrême et sont moins déviés par le prisme que les premiers.

En résumé, il y a dispersion de la chaleur comme il y a dispersion de la lumière : il existe un spectre calorifique comme il existe un spectre lumineux. De plus, les rayons calorifiques des différentes parties du spectre calorifique sont des rayons simples, indécomposables par leur passage à travers un second prisme.

La même expérience faite avec une source calorifique quelconque montre encore la dispersion de la chaleur. Si la source est lumineuse (arc voltaïque, spirale de platine rendue incandescente par le passage d'un courant, etc.), on trouve des rayons calorifiques obscurs et des rayons qui sont à la fois calorifiques et lumineux. Si la source n'est pas lumineuse, comme une plaque métallique chauffée, on trouve uniquement des rayons de chaleur obscure, moins déviés que ne le seraient les rayons rouges.

**130. Identité de la chaleur et de la lumière.** — On admettait autrefois que la chaleur et la lumière étaient

deux agents différents et que chacun d'eux donnait lieu à un spectre partiellement superposé à l'autre, mais distinct dans sa nature autant que dans ses propriétés, les rayons lumineux étant seuls capables de provoquer la sensation de lumière, les rayons calorifiques celle de chaleur. Or, toutes les propriétés que nous venons d'étudier : propagation, vitesse, réflexion, réfraction, dispersion sont identiques pour la lumière et pour la chaleur rayonnante. De plus, l'expérience montre que, dans les rayons qui sont à la fois calorifiques et lumineux, les propriétés calorifiques sont inséparables des propriétés lumineuses. Ainsi en prenant dans un spectre les rayons rouges, par exemple, qui sont à la fois calorifiques et lumineux, ils conservent ces deux propriétés quelles que soient les réflexions et les réfractions qu'on leur fait subir ; toute diminution de l'effet lumineux produite par une réflexion ou par absorption est accompagnée d'une diminution proportionnelle de l'effet calorifique.

L'ensemble de ces phénomènes ne peut s'expliquer qu'en admettant que la lumière et la chaleur sont des *manifestations différentes d'une seule et même cause*. Une source à la fois calorifique et lumineuse transmet des *radiations* qui sont toutes de même nature et se séparent en traversant un prisme parce que leur réfrangibilité est différente. Mais les effets produits par une radiation de réfrangibilité déterminée varient suivant l'organe ou le corps qui la reçoit. Quand elle frappe l'œil, elle impressionne la rétine, qui transmet au cerveau la seule sensation qu'elle est capable de transmettre, la sensation lumineuse ; si elle rencontre la surface de la main, les nerfs répandus dans l'épaisseur de la peau transmettent au cerveau la sensation de chaleur.

Pour les radiations *infra-rouges* (moins réfrangibles que le rouge), l'effet calorifique persiste, mais la rétine n'est plus impressionnée (chaleur obscure). Cela tient à ce que les milieux réfringents de l'œil, transparents pour les radiations visibles du rouge au violet, sont opaques pour les rayons infra-rouges ; ou bien encore à ce que les éléments nerveux de la rétine ne sont sensibles qu'aux radiations dont la réfrangibilité reste comprise entre certaines limites, de même que les éléments nerveux de l'oreille ne font percevoir aucun son lorsque les vibrations qui leur parviennent sont trop lentes ou trop rapides.

REMARQUE. — Les radiations peuvent produire d'autres effets que les effets calorifiques et lumineux ; elles sont capables de provoquer des combinaisons ou des décompositions chimiques (*radiations actiniques*) ; en frappant certaines substances elles produisent la *phosphorescence* ou la *fluorescence*. L'étude spéciale des radiations, ainsi que celle de leurs applications, sera faite dans le tome III.

**131. Intensité de la chaleur rayonnante.** — *On appelle intensité d'une source calorifique la quantité de chaleur que cette source envoie normalement, dans l'unité de temps, sur l'unité de surface (1<sup>er</sup>) placée à l'unité de distance.*

Si l'unité de surface est placée successivement à diverses distances de la source, de manière à recevoir toujours les rayons normalement, on démontre comme pour la lumière (116) que la quantité de chaleur reçue par cette unité de surface pendant l'unité de temps varie en raison inverse du carré de sa distance à la source. Ce principe ne s'applique qu'aux rayons calorifiques divergents.

Enfin on démontre par le calcul, comme pour la lumière (117), que la quantité de chaleur reçue obliquement par une surface déterminée est proportionnelle au cosinus de l'angle que font les rayons calorifiques incidents avec la normale à cette surface.

REMARQUE. — La détermination des quantités de chaleur (évaluées en calories) qui tombent sur une surface déterminée est un problème particulier de calorimétrie. Quant au rapport de ces quantités, il s'obtient facilement en s'appuyant sur la loi du refroidissement de Newton.

On sait qu'un corps placé dans une enceinte dont la température est inférieure à la sienne se refroidit peu à peu jusqu'à ce que sa température soit devenue égale à celle de l'enceinte. La rapidité avec laquelle la température du corps s'abaisse est soumise à une loi très complexe ; elle dépend d'une foule de causes : températures primitives du corps et de l'enceinte, nature de la surface du corps qui se refroidit, nature du gaz que contient l'enceinte, etc. Toutefois, lorsque la différence de température entre le corps et l'enceinte ne dépasse pas une vingtaine de degrés, la loi prend une forme simple donnée par Newton :

*La vitesse de refroidissement d'un corps placé dans une enceinte dont la température  $t$  est inférieure à la sienne,  $T$ , est proportionnelle à la différence  $T - t$ .*

Soit  $\Delta T$  l'abaissement de température pour un très petit intervalle de temps  $\Delta \theta$  lu sur un chronomètre quelconque ; le rapport  $\frac{\Delta T}{\Delta \theta}$  mesure ce que l'on nomme la *vitesse de refroidissement* à l'instant 0. Si la différence  $T - t$  n'excède pas une vingtaine de degrés, on a, d'après la loi de Newton,

$$\frac{\Delta T}{\Delta \theta} = K(T - t).$$

$K$  est une constante représentant la vitesse de refroidissement pour un excès de température de 1° du corps chaud sur l'enceinte.

Supposons maintenant que le corps reçoive une quantité de chaleur qui maintienne sa température  $T$  constante. La quantité  $q$  de chaleur qu'il rayonne dans un temps quelconque est proportionnelle à  $T - t$ , et la quantité qu'il reçoit pendant le même temps est aussi égale à  $q$  et proportionnelle à  $T - t$ . Si, dans d'autres circonstances, l'excès de température est  $T' - t$ , la quantité de chaleur  $q'$  reçue par le corps est encore proportionnelle à  $T' - t$  et le rapport des quantités de chaleur  $q$  et  $q'$  reçues par le corps est égal au rapport

$$\frac{T - t}{T' - t}.$$

PROPRIÉTÉS DES CORPS RELATIVES A LA CHALEUR  
RAYONNANTE

**132. Considérations générales.** — Quand une certaine quantité de chaleur tombe sur un corps, elle se divise en plusieurs parties :

1° Une partie  $r$  se *réfléchit* suivant les lois de la réflexion régulière ;

2° Une partie  $d$  est *diffusée*, c'est-à-dire renvoyée dans toutes les directions ;

3° Une partie  $a$  est *absorbée* par le corps et l'échauffe ;

4° Enfin, si le corps est transparent pour la chaleur, une quatrième partie  $t$  le traverse sans l'échauffer suivant les lois de la réfraction. Cette partie est *transmise* sous forme de chaleur rayonnante.

En appelant  $q$  la quantité de chaleur incidente, on a évidemment

$$q = r + d + a + t,$$

d'où, en divisant par  $q$  les deux membres,

$$1 = \frac{r}{q} + \frac{d}{q} + \frac{a}{q} + \frac{t}{q}.$$

Les rapports  $\frac{r}{q}$ ,  $\frac{d}{q}$ ,  $\frac{a}{q}$ ,  $\frac{t}{q}$  s'appellent respectivement pouvoirs *réflecteur*, *diffusif*, *absorbant* et *diathermane* du corps considéré.

**133. Appareils de mesure.** — Les appareils de mesure que l'on emploie pour étudier les propriétés des corps relatives à la chaleur rayonnante comprennent les *sources de chaleur*, les *appareils thermoscopiques* pour les quantités de chaleur et le *banc de Melloni*.

**Sources de chaleur.** — Melloni, qui a fait une étude

complète des propriétés des corps relatives à la chaleur rayonnante, employait quatre sources de chaleur (fig. 212),

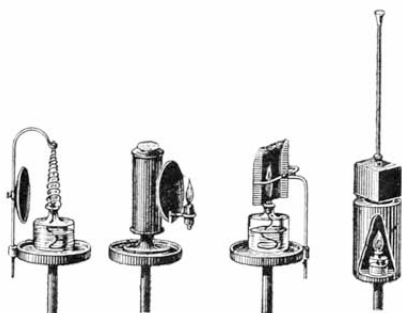


Fig. 212. — Sources de chaleur employées par Melloni.

savoir : 1° deux sources de chaleur lumineuse : le *platine incandescent*, hélice de platine rendue incandescente par la flamme d'une lampe à alcool ; la flamme d'une petite lampe à huile (*lampe de Locatelli*), sans verre, avec

miroir réflecteur mobile ; 2° deux sources de chaleur obscure : une plaque de cuivre chauffée vers 400° par une lampe à alcool ; un cube métallique (*cube de Leslie*), rempli d'eau bouillante ou d'huile chaude.

Aujourd'hui on emploie en outre comme sources de chaleur lumineuse : une *lampe modérateur* à huile de colza avec réflecteur en plaqué d'argent (fig. 214) ; une *lampe électrique* à incandescence avec support et interrupteur ; une *lampe aérhydrique* Bourbouze à toile de platine rendue incandescente par un mélange d'air et de gaz d'éclairage.

**Appareils thermoscopiques.** — On mesurait autrefois les quantités de chaleur rayonnées avec des *thermomètres différentiels* (thermomètre différentiel à liquide de Leslie, thermoscope à gaz de Rumford). Ces appareils ne sont plus employés ; on se sert aujourd'hui de thermomètres électriques, qui sont beaucoup plus sensibles ; ce sont la *pile thermo-électrique* de Melloni, le *bolomètre* de Langley et le *microtasimètre* d'Edison.

La pile thermo-électrique de Melloni sera décrite plus loin dans le chapitre consacré à l'étude des piles. Nous



dirons seulement que, si l'on fait rayonner de la chaleur sur l'une de ses faces (*fig. 213*), la température de cette face s'élève proportionnellement à la quantité de chaleur qu'elle reçoit pendant l'unité de temps, et la pile produit un courant électrique. L'intensité de ce courant, mesurée par la déviation de l'aiguille d'un galvanomètre, est proportionnelle à la différence de température des deux faces

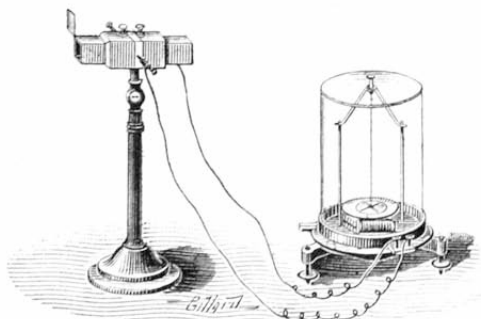


Fig. 213. — Thermomultiplicateur employé par Melloni (pile thermo-électrique et galvanomètre ordinaire).

de la pile, pourvu que cette différence ne soit pas trop grande. L'ensemble de la pile et du galvanomètre porte le nom de *thermomultiplicateur*. Grâce aux méthodes que l'on possède aujourd'hui pour observer les déviations des aiguilles des galvanomètres (246), l'emploi du thermomultiplicateur permet de mesurer entre les deux faces de la pile des différences de température ne dépassant pas quelques millièmes de degré.

Le bolomètre et le microtasimètre sont plus sensibles encore que le thermomultiplicateur, puisqu'ils accusent nettement des dix-millièmes de degré centigrade. Ces instruments seront décrits dans le tome III.

**Banc de Melloni.** — La figure 214 représente le banc de chaleur rayonnante de Melloni avec les améliorations

qu'y a apportées le constructeur Ducretet. C'est un banc de fonte formé de deux plans légèrement inclinés, le long desquels glissent plusieurs colonnes en laiton que l'on fixe solidement à la place voulue avec des vis de serrage. Chaque colonne est creuse et reçoit dans son intérieur un cylindre métallique qui peut être élevé ou abaissé, ou fixé à une hauteur quelconque. Ces cylindres portent toutes les pièces destinées aux expériences : appareils thermoscopiques, petite table pour supporter les corps que la chaleur doit traverser ; écran percé d'ouvertures plus ou

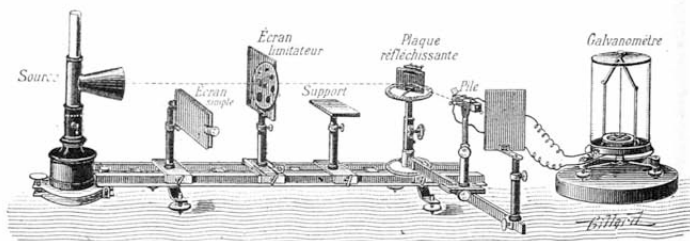


Fig. 214. — Banc de chaleur rayonnante muni de ses pièces principales.

moins larges destinées à restreindre l'étendue du faisceau calorifique ; écrans formés d'une double lame de laiton, les uns fixes, les autres que l'on peut élever ou abaisser autour d'une charnière horizontale. La source calorifique est placée en dehors du banc sur un support à bascule, avec vis de rappel afin qu'on puisse amener rapidement et avec précision le faisceau calorifique sur la ligne qui joint les centres des appareils en expérience.

Quand on veut dévier le faisceau calorifique par des réflexions ou par des réfractions, on ajoute au banc une règle supplémentaire sur laquelle on place alors l'appareil thermoscopique dans la direction du faisceau dévié.

Cette règle fait avec le banc un angle que l'on change à volonté, et que l'on mesure sur un cercle horizontal.

**134. Pouvoir réflecteur.** — On appelle pouvoir réflecteur d'une substance le rapport entre la quantité de chaleur réfléchie et la quantité de chaleur incidente.

Pour déterminer ce rapport, on emploie la disposition expérimentale représentée par la figure 214.

1° On forme avec la substance à étudier une plaque bien polie que l'on installe verticalement au centre de la plateforme divisée, puis on reçoit le faisceau réfléchi sur la pile, portée par la règle supplémentaire. On observe une déviation  $\alpha$  de l'aiguille du galvanomètre.

2° La plaque réfléchissante est ensuite enlevée et la règle supplémentaire amenée sur le prolongement du banc de manière à recevoir sur la pile le faisceau direct (la pile est alors à la même distance de la source que dans la première expérience). L'aiguille du galvanomètre subit une nouvelle déviation  $\alpha'$  plus grande que la précédente.

Le rapport  $\frac{\alpha}{\alpha'}$  est égal au rapport  $\frac{r}{q}$  des quantités de chaleur  $r$  et  $q$  reçues par la face antérieure de la pile dans les deux expériences; il représente donc le *pouvoir réflecteur* de la substance employée comme miroir.

**Résultats.** — 1° Pour une même substance et sous une incidence donnée, le pouvoir réflecteur varie avec la température de la source; il est plus grand pour la chaleur obscure et à basse température que pour la chaleur lumineuse.

2° Le pouvoir réflecteur des corps *transparents*, comme le verre, augmente avec l'angle d'incidence; il est égal à

l'unité pour une incidence de 90°. La quantité de chaleur pénétrant dans le milieu va, au contraire, en diminuant. Ce résultat est analogue à celui que présente la réflexion de la lumière.

3° Le pouvoir réflecteur des corps opaques, comme les métaux, est à peu près indépendant de l'angle d'incidence.

Le tableau suivant donne les pouvoirs réflecteurs d'un certain nombre de métaux sous une incidence moyenne de 45° (expériences de la Provostaye et Desains).

MÉTAUX	SOURCE CALORIFIQUE	
	Chaleur du soleil	Lampe Locatelli
Argent . . . . .	0,92	0,97
Or. . . . .	0,87	0,96
Métal des miroirs. . . . .	0,64	0,86
Acier. . . . .	0,60	0,83
Platine . . . . .	0,60	0,83
Zinc . . . . .	"	0,81
Fer . . . . .	"	0,77

**135. Pouvoir diffusif.** — *Le pouvoir diffusif d'une substance est le rapport entre la somme des quantités de chaleur diffusées dans toutes les directions et la quantité de chaleur incidente.* Ce rapport est toujours une fraction assez petite et il est difficile à déterminer exactement.

Pour montrer le phénomène de la diffusion, on remplace la plaque polie employée dans la mesure du pouvoir réflecteur (134) par une plaque de nature quelconque recouverte de céruse, par exemple. Si l'on fait alors tourner la règle supplémentaire dans toutes les directions, la pile accuse toujours qu'elle reçoit de la chaleur par diffusion. Comme l'effet produit est toujours très faible, on a soin, pour le mieux constater, de munir la pile d'un cône réflecteur destiné à concentrer les rayons.

Le pouvoir diffusif des substances polies est très faible et peut être négligé. Il en est de même de celui du noir de fumée (environ  $\frac{1}{10}$ ). Avec la céruse, le verre dépoli, les métaux

mats, le pouvoir diffusif est plus ou moins grand, et variable suivant la source de chaleur. De la Provostaye et Desains ont obtenu les résultats suivants avec la chaleur solaire :

	Pouvoir diffusif.
Céruse . . . . .	0,82
Poudre d'argent bruni . . . . .	0,76
Chromate de plomb . . . . .	0,66
Cinabre . . . . .	0,48

**136. Pouvoir diathermane.** — On dit qu'un corps est *diathermane* lorsqu'il se laisse traverser par la chaleur rayonnante. La *diathermanéité* est donc une propriété qui correspond à la *transparence* pour la lumière. Les corps qui ne se laissent pas traverser par la chaleur sont dits *athermanes*.

On appelle pouvoir diathermane d'une plaque, sous une épaisseur déterminée et pour une source calorifique donnée, le rapport entre la quantité de chaleur transmise et la quantité de chaleur incidente.

**Détermination des pouvoirs diathermanes.** — Pour déterminer la diathermanéité de diverses substances, on les façonne en petites plaques de même épaisseur que l'on

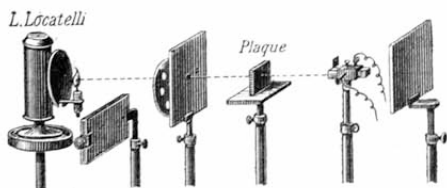


Fig. 215. — Détermination des pouvoirs diathermanes.

place verticalement sur un support (*fig. 215*) entre la source calorifique et l'appareil thermoscopique. Si  $\alpha$  est

la déviation observée lorsque l'appareil thermoscopique reçoit le rayonnement de la source à travers la plaque,  $\alpha'$  la déviation observée directement quand la plaque est enlevée, le pouvoir diathermane de la substance étudiée a

pour valeur  $\frac{\alpha}{\alpha'}$ .

**Résultats.** — Pour une substance de nature déterminée, le pouvoir diathermane varie avec la nature de la source calorifique et avec l'épaisseur de la plaque absorbante.

1° INFLUENCE DE LA NATURE DE LA SOURCE. — Pour la plupart des substances, le pouvoir diathermane est relativement grand pour la chaleur lumineuse, mais très faible pour la chaleur obscure au-dessous de 300°. C'est ainsi qu'une plaque de verre, par exemple, ne laisse passer que des quantités de chaleur inappréciables si l'on opère avec une source de chaleur obscure, comme le cube de Leslie ; la quantité de chaleur transmise au travers de cette même plaque est une fraction très notable de la quantité de chaleur incidente si l'on opère avec une source lumineuse comme la lampe de Locatelli. De même l'alun, l'eau, les milieux réfringents de l'œil arrêtent à peu près complètement les rayons obscurs. L'air sec est diathermane pour la chaleur et les rayons solaires le traversent sans l'échauffer, mais la vapeur d'eau arrête une forte proportion des rayons obscurs.

Au contraire, pour les chlorures de sodium (*sel gemme*) et de potassium (*sylvine*), le pouvoir diathermane ne dépend pas de la nature de la source. Ces sels laissent passer la presque totalité de la chaleur incidente, quelle que soit la source de chaleur employée ; ils se comportent donc sensiblement comme des substances transparentes et incolores pour toutes les radiations.

De ce que les substances diathermanes absorbent ainsi certains rayons de chaleur et laissent passer les autres, on peut dire qu'elles possèdent une véritable coloration calorifique (*thermochrose*), et on en conclut que la diathermanité des corps pour la chaleur et leur transparence pour la lumière ne font en réalité qu'une seule et même propriété. Une substance donnée laisse passer des radiations d'indice

déterminé sans qu'on puisse séparer les radiations calorifiques des radiations lumineuses. Le sel gemme et la sylvine laissent passer aussi bien les rayons obscurs que les rayons lumineux. Les autres substances transparentes, comme le verre, laissent passer la chaleur lumineuse, mais elles sont à peu près athermanes pour les rayons infra-rouges. Enfin les corps opaques pour la lumière sont athermanes pour la chaleur correspondante, mais certains de ces corps laissent néanmoins passer la chaleur obscure. Tel est le cas du sel gemme enfumé, de l'iode dissous dans le sulfure de carbone : un ballon plein de cette dissolution permet de concentrer assez de chaleur obscure pour enflammer du fulmi-coton noirci (expérience de Tyndall).

2° INFLUENCE DE L'ÉPAISSEUR DE LA PLAQUE ABSORBANTE. — D'une manière générale, le pouvoir diathermane diminue quand l'épaisseur augmente, sans lui être inversement proportionnel. Toutefois il devient à peu près constant dès que l'épaisseur est suffisante pour absorber complètement les rayons calorifiques de certaines réfrangibilités, variables avec la substance. Si l'on fait traverser à une plaque d'alun un faisceau de rayons calorifiques à la fois lumineux et obscurs qui a déjà traversé une plaque de cette même substance, le pouvoir diathermane devient beaucoup plus considérable. En effet, la première plaque absorbe très vite les rayons obscurs et laisse passer presque tous les rayons lumineux ; quand le faisceau lumineux a été ainsi débarrassé des rayons obscurs absorbables par l'alun, il ne sera que très peu diminué par une augmentation d'épaisseur de la plaque et pourra traverser presque intégralement la deuxième plaque d'alun.

Si l'on remplace la deuxième plaque d'alun par une plaque en sel gemme enfumé, qui ne laisse passer que la chaleur obscure, l'ensemble des deux plaques arrête le rayonnement tout entier. Ici encore on voit l'analogie remarquable que présentent ces effets avec ceux produits relativement à la lumière par les verres colorés.

Le tableau suivant donne les pouvoirs diathermanes de quelques substances sous une épaisseur égale à  $2^{\text{m}},6$ .

SUBSTANCES	SOURCES CALORIFIQUES			
	Lampe Locatelli	Platine incandescent	Cuivre à 400°	Cuivre à 100°
Sel gemme . . .	0,92	0,92	0,92	0,92
Fluorure de cal- cium. . . . .	0,78	0,69	0,42	0,33
Soufre natif . . .	0,74	0,71	0,60	0,54
Spath d'Islande .	0,39	0,28	0,06	0,00
Verre ordinaire.	0,39	0,24	0,06	0,00
Cristal de roche.	0,38	0,28	0,06	0,03
Gypse . . . . .	0,14	0,05	0,00	0,00
Alun . . . . .	0,09	0,02	0,00	0,00
Glace pure . . .	0,06	0,005	0,00	0,00

**Applications et conséquences.** — Le grand pouvoir diathermane du sel gemme fait que l'on emploie une lentille et un prisme de cette substance pour mettre en évidence la chaleur obscure du spectre. Quand on fait des projections à la lumière électrique ou à la lumière solaire, on interpose souvent entre l'objet et le condensateur de lumière une petite cuve contenant une dissolution d'alun. Cette dissolution arrête la plus grande partie de la chaleur obscure et évite ainsi la concentration d'une chaleur trop intense sur l'objet. Enfin l'usage des cloches en verre, des châssis vitrés dont les jardiniers couvrent leurs plantes pour faire mûrir les fruits, l'emploi des serres vitrées pour conserver les plantes auxquelles l'action du froid serait funeste, reposent sur ce que le verre est diathermane pour la chaleur lumineuse et athermane pour la chaleur obscure. La plus grande partie de la chaleur du soleil pénètre, avec la lumière, au travers du verre et vient échauffer les plantes abritées ; celles-ci rayonnent à leur tour ; mais les rayons calorifiques qu'elles émettent sont des rayons obscurs pour lesquels le verre est ather-



mane et qui, restant emprisonnés dans l'enceinte, en élèvent la température.

La propriété que possède la vapeur d'eau d'arrêter en grande partie la chaleur obscure joue un rôle important dans la nature. L'atmosphère humide laisse passer la chaleur lumineuse émise par le soleil, mais elle arrête, en revanche, presque toute la chaleur obscure qu'émet le sol échauffé et le préserve ainsi d'un refroidissement trop accentué.

**137. Pouvoir absorbant.** — La différence entre la quantité de chaleur incidente reçue par un corps et les quantités de chaleur réfléchie, diffusée et transmise, mesure la quantité de chaleur absorbée par ce corps. On a en effet (132) :

$$a = q - (r + d + t).$$

C'est la chaleur absorbée par le corps qui élève sa température ou détermine son changement d'état.

On appelle pouvoir absorbant d'un corps, pour une chaleur de nature déterminée, le rapport de la quantité de chaleur absorbée à la quantité de chaleur incidente.

Considérons le cas particulier où le corps est complètement athermane et peut acquérir un poli assez parfait pour que la chaleur diffusée soit négligeable. L'égalité ci-dessus devient

$$a = q - r, \quad \text{d'où} \quad \frac{a}{q} = 1 - \frac{r}{q},$$

c'est-à-dire que le pouvoir absorbant et le pouvoir réflecteur sont *complémentaires*. Tel est le cas des métaux polis. On obtiendra donc facilement leur pouvoir absorbant en mesurant leur pouvoir réflecteur et en retranchant de l'unité la fraction qui exprime ce pouvoir réflecteur.

De la Provostaye et Desains ont déterminé par cette méthode le pouvoir absorbant de la plupart des métaux polis et ont trouvé les résultats suivants.

MÉTAUX	SOURCE CALORIFIQUE		
	Lampe Locatelli	Chaleur solaire	Chaleur obscure à 400°
Zinc . . . . .	0,19	»	»
Acier . . . . .	0,175	0,40	»
Platine . . . . .	0,17	0,39	0,105
Étain . . . . .	0,15	»	»
Métal des miroirs . . . . .	0,145	0,34	»
Laiton . . . . .	0,07	»	0,055
Or . . . . .	0,045	0,13	0,045
Plaqué d'argent poli.	0,045	0,08	»

REMARQUE. — On considère quelquefois, au lieu des pouvoirs absorbants absolus, les *pouvoirs absorbants relatifs*. Le pouvoir absorbant relatif d'un corps est le rapport entre la quantité de chaleur absorbée par ce corps et celle qu'absorbe, dans les mêmes circonstances, un corps de surface égale enduit de *noir de fumée*. On sait que le noir de fumée ne diffuse ni ne réfléchit sensiblement la lumière incidente ; il absorbe donc toutes les radiations et l'on a pour ce corps  $a = q$ .

Applications. — C'est à cause de cette propriété du noir de fumée d'absorber toutes les radiations que l'on recouvre avec cette substance les faces des piles thermo-électriques. Pour hâter la fusion de la neige, on peut la recouvrir de poussière de charbon qui a un pouvoir absorbant plus considérable. Les vases métalliques où l'on fait chauffer les liquides s'échauffent lentement quand ils sont polis et bien nettoyés ; ils s'échaufferaient beaucoup plus vite s'ils étaient dépolis ou recouverts de noir de fumée. Enfin les vêtements blancs sont très employés dans les régions chaudes parce que leur pouvoir absorbant étant très faible, ils s'échauffent peu sous l'action des rayons du soleil.

138. Pouvoir émissif. — Les différents corps émettent,

à température et à surface égales, des quantités de chaleur plus ou moins grandes. Pour un même corps, la quantité de chaleur émise augmente, en général, quand la température s'élève; elle dépend, en outre, à une même température, de la nature de sa surface.

Pour montrer l'influence de la nature de la surface sur la quantité de chaleur rayonnée, on dispose sur le banc de chaleur rayonnante le cube de Leslie dont les faces verticales ont été préalablement recouvertes chacune d'une

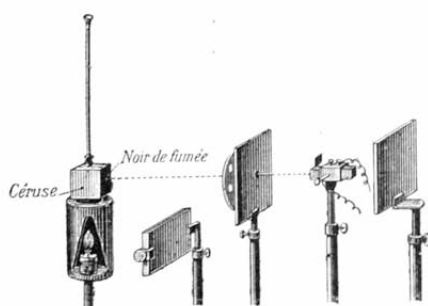


Fig. 216. — Expérience montrant l'influence de la nature de la surface sur la quantité de chaleur rayonnée.

substance particulière : noir de fumée, céruse, etc. (fig. 216). Ce cube étant rempli d'eau bouillante ou d'huile chaude à température constante, on fait rayonner successivement vers l'appareil thermosco-

pique les diverses faces du cube et on observe chaque fois une déviation différente de l'aiguille du galvanomètre. Les quantités de chaleur émises pendant le même temps par des surfaces égales à la même température dépendent donc de la nature de la surface rayonnante.

Comme le noir de fumée est la substance qui, à une même température, émet la plus grande quantité de chaleur, on est convenu d'appeler pouvoir émissif d'une substance quelconque le rapport de la quantité de chaleur émise par cette substance à celle qui est émise par une surface égale de noir de fumée à la même température.

Résultats. — A l'exception de la céruse, qui, pour la chaleur obscure, émet autant de chaleur que le noir de fumée à la même température, les diverses substances ont un pouvoir émissif représenté par une fraction, que l'on détermine par des expériences analogues à celles que nous avons décrites plus haut. Le tableau suivant donne les pouvoirs émissifs de quelques substances pour la chaleur obscure d'après les recherches de Melloni et de la Provostaye et Desains.

SUBSTANCES	POUVOIR ÉMISSIF
Noir de fumée. . . . .	1,00
Céruse . . . . .	1,00
Colle de poisson . . . . .	0,91
Encre de Chine . . . . .	0,85
Gomme laque . . . . .	0,72
Platine laminé. . . . .	0,108
Cuivre en feuilles. . . . .	0,049
Or en feuilles . . . . .	0,043
Argent vierge . . . . .	0,030

REMARQUE. — Si l'on dresse le tableau des pouvoirs émissifs et des pouvoirs absorbants dans les mêmes conditions, on remarque que les diverses substances se rangent dans le même ordre. D'un autre côté, l'expérience montre que les circonstances qui modifient le pouvoir émissif modifient dans le même sens le pouvoir absorbant pour les mêmes rayons du spectre. On est conduit par là à admettre que pour un même corps et des radiations de même réfrangibilité, *le pouvoir émissif est égal au pouvoir absorbant*. Cette relation se vérifie d'ailleurs par l'expérience. Elle permet de se dispenser de déterminer directement les pouvoirs absorbants de certains corps, lorsqu'on connaît leurs pouvoirs émissifs pour la même espèce de chaleur.

Applications. — Le faible pouvoir émissif des métaux explique l'usage que l'on fait de vases en métal poli comme les cafetières, théières d'argent, pour maintenir longtemps les liquides chauds. Les poêles en fonte se refroidissent plus vite que les poêles en faïence parce que

le pouvoir émissif de la fonte est plus grand que celui de la faïence. Le pelage blanc des animaux qui habitent les régions rapprochées des pôles les protège contre le refroidissement, le pouvoir émissif du pelage blanc étant très faible.

### RÉSUMÉ DU CHAPITRE XIII

La *chaleur rayonnante* se transmet d'une région à une autre sans échauffer sensiblement les corps qu'elle traverse. Elle se propage en ligne droite dans un milieu homogène, et se propage dans le vide avec une vitesse égale à celle de la lumière.

Les lois de la réflexion des rayons lumineux s'appliquent aux rayons calorifiques. Il en résulte que les miroirs courbes jouissent des mêmes propriétés pour la chaleur rayonnante que pour la lumière (expérience des miroirs conjugués, miroirs ardents, réflecteur de Mouchot).

La chaleur rayonnante se réfracte comme la lumière en passant obliquement d'un milieu dans un autre et suivant les mêmes lois. On est conduit ainsi aux mêmes conséquences que lorsqu'il s'agit de la lumière : les lentilles convergentes concentrent la chaleur, les prismes la dispersent. En employant un prisme de sel gemme et une source à haute température, on constate de la chaleur dans tout le spectre visible et en deçà du rouge (rayons infra-rouges).

L'inséparabilité des propriétés calorifiques des propriétés lumineuses dans les rayons qui sont à la fois calorifiques et lumineux, l'identité de toutes les propriétés de la chaleur rayonnante et de la lumière, ne peuvent s'expliquer qu'en admettant que la chaleur et la lumière sont produites par des *radiations* de même nature, se manifestant à nous par des effets différents suivant les propriétés particulières des corps qu'elles frappent.

Lorsqu'une certaine quantité de chaleur tombe sur un corps, une partie se réfléchit régulièrement, une autre partie est diffusée, une troisième partie est absorbée par le corps et l'échauffe. Si le corps est transparent pour la chaleur, une quatrième partie le traverse sans l'échauffer (chaleur transmise).

Pour étudier les propriétés des corps relativement à la chaleur rayonnante, on emploie des sources de chaleur lumineuses et obscures, un appareil thermoscopique (ordinairement la pile thermo-électrique de Melloni), et un banc de chaleur rayonnante portant des écrans, des supports, etc.

Le *pouvoir réflecteur* d'une substance est le rapport entre la quantité de chaleur réfléchie et la quantité de chaleur incidente. On le détermine en recevant un faisceau calorifique sur un appareil thermoscopique d'abord directement, puis après réflexion sur

une plaque polie de la substance. Le pouvoir réflecteur est plus grand pour la chaleur obscure que pour la chaleur lumineuse. Celui des corps transparents augmente avec l'angle d'incidence.

Le *pouvoir diathermane* d'une plaque d'épaisseur déterminée, pour une source calorifique donnée, est le rapport entre la quantité de chaleur transmise et la quantité de chaleur incidente. On le détermine en prenant le rapport des quantités de chaleur qui tombent sur un appareil thermoscopique : 1° quand on interpose une plaque du corps à étudier ; 2° quand on l'enlève. Le pouvoir diathermane d'une substance donnée varie avec la nature de la source et l'épaisseur de la plaque employée. Cependant les chlorures de potassium et de sodium sont diathermanes pour toutes les radiations, quelle que soit leur épaisseur. On peut citer comme applications des pouvoirs diathermanes l'emploi des prismes en sel gemme pour la dispersion de la chaleur, l'emploi des cloches dans les jardins, des serres vitrées, etc.

Le *pouvoir absorbant* d'un corps, pour une source calorifique donnée, est le rapport de la quantité de chaleur absorbée à la quantité de chaleur incidente. Si le corps est opaque et poli, le pouvoir réflecteur et le pouvoir absorbant sont complémentaires. Pour le noir de fumée, la quantité de chaleur absorbée est sensiblement égale à la quantité de chaleur incidente.

Pour un même corps, la quantité de chaleur émise augmente quand la température s'élève ; elle dépend, à une même température, de la surface du corps. Le *pouvoir émissif* d'un corps est le rapport de la quantité de chaleur émise par ce corps à celle qui est émise par une surface égale de noir de fumée à la même température. Les métaux ont un pouvoir émissif très faible. Pour un même corps et des radiations de même réfrangibilité, le pouvoir émissif est égal au pouvoir absorbant.

### EXERCICE SUR LE CHAPITRE XIII

41. Deux sources calorifiques identiques et de très petites dimensions S et S' sont placées à une distance  $SS' = 2^m$ . Le rayonnement de la source S' traverse une lame MN de pouvoir diathermane 0,25. Une pile thermo-électrique de Melloni dont les faces P, P' sont distantes d'une longueur  $PP' = 6^m$  peut se déplacer sur SS' de façon que la face P soit échauffée par la source S et la face P' par la source S'. A quelle distance de la source S doit se trouver le milieu O de la pile pour qu'aucun courant ne traverse un galvanomètre mis en communication avec les pôles de la pile ?

# ÉLECTRICITÉ STATIQUE

---

## CHAPITRE XIV

### PHÉNOMÈNES FONDAMENTAUX

---

**139. Production d'électricité par le frottement.** — Si l'on frotte vivement un bâton de résine avec une peau de chat, il acquiert la propriété d'attirer les corps légers comme des fragments de papier, des barbes de plume, de petites balles de sureau (*fig.*

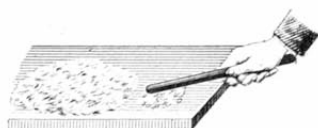


Fig. 217. — Attraction des corps légers par la résine frottée.

217). Une baguette de verre, une feuille de papier séchée au feu, un canon de soufre, frottés avec du drap bien sec, produisent le même phénomène.

Comme l'attraction des corps légers par les corps frottés a été observée d'abord avec l'ambre jaune, la cause, encore inconnue aujourd'hui, qui provoque cette attraction, a reçu le nom d'*électricité* (d'un mot grec qui signifie ambre). Un corps qui jouit de la propriété d'attirer les corps légers est dit *électrisé* ; il est à l'*état neutre* dans le cas contraire.

140. **Corps conducteurs et corps isolants.** — Tous les corps solides s'électrisent par le frottement, mais une fois électrisés, ils se comportent de deux manières différentes. Les uns ne conduisent pas l'électricité; celle-ci se maintient dans la région frottée et l'attraction ne se produit qu'en regard de cette région : on exprime ce fait en disant que ce sont des corps *mauvais conducteurs* de l'électricité ou des corps *isolants*. Le verre sec, la soie, la paraffine, la résine, l'ébonite sont des corps isolants. Les autres, comme les métaux, le bois, le coton, le corps humain, la terre, transmettent instantanément sur toute leur surface la propriété électrique qu'ils ont acquise en un de leurs points ; ils ne paraissent pas s'électriser quand on les frotte en les tenant à la main, mais si on les tient par un manche mauvais conducteur, l'attraction se produit en toutes les régions frottées ou non de leur surface. De tels corps sont dits *bons conducteurs* de l'électricité ou, simplement, *conducteurs*. Une tige métallique tenue par un manche de verre ou de paraffine attire vivement les corps légers par tous les points quand on la frappe légèrement avec une peau de chat; elle ne donne rien si on la tient à la main, car l'électricité développée se répand immédiatement dans le sol par le corps de l'opérateur.

**Emploi des corps isolants.** — Quand on veut maintenir sur un corps conducteur l'électricité qui s'y est développée, il est nécessaire de *isoler*. Pour cela, on le suspend par des fils de soie, ou bien on le soutient par des supports en verre, en ébonite, en paraffine. Le verre et l'ébonite n'isolent bien que dans l'air sec ; dans l'air humide, leur surface se recouvre d'une couche d'eau qui conduit l'électricité au sol. La paraffine étant très peu hygrométrique, constitue un excellent isolant, mais elle manque de solidité ; de plus, elle est grasse et garde les poussières atmosphériques. On remédie à ces défauts en ajoutant à la paraffine un peu de soufre : la



combinaison ainsi obtenue, connue sous le nom de *diélectrine*, est assez dure pour pouvoir être travaillée au tour; elle ne subit aucune déformation pendant les chaleurs de l'été.

**141. Pendule électrique.** — Pour reconnaître si un corps est électrisé, il est commode de se servir de petits instruments appelés *électroscopes*.

Le plus simple des électroscopes est le *pendule électrique*.

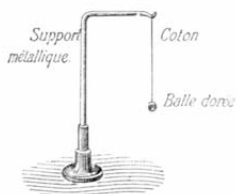


Fig. 218. — Pendule électrique non isolé.

Il se compose d'un corps léger, comme une balle de sureau ou de liège, soutenu par un fil de coton ou un fil métallique très fin (*fig. 218*); le support auquel est fixé le fil est entièrement métallique. Un pendule de ce genre est dit un pendule *non isolé*.

Pour certaines expériences il est nécessaire d'employer un pendule *isolé*; le fil de suspension est alors un fil de soie et on le fixe de préférence à un support de verre. Dans les deux cas, on donne de la sensibilité au pendule en dorant la balle par application d'une feuille d'or. Quand on approche un corps électrisé de la balle d'un pendule non isolé, elle est vivement attirée. Si le pendule est isolé, l'attraction est plus faible et elle est suivie, après le contact, d'une vive répulsion. Nous verrons plus loin l'explication de cette différence d'action (138).

**142. Électrisation par contact.** — Tout corps à l'état neutre s'électrise quand on le met en contact avec un autre corps électrisé. Si le corps neutre est conducteur, il s'électrise sur sa surface entière; si c'est un isolant, il ne s'électrise qu'aux points touchés.

Cette deuxième manière d'électriser les corps est fréquemment employée pour les conducteurs isolés.

**143. Distinction de deux espèces d'électricité.** — L'expé-

rience montre qu'il y a *deux états d'électrisation distincts*, autrement dit, qu'il existe *deux espèces d'électricité*.

1° Prenons un pendule isolé et approchons-en de loin et lentement un bâton de résine préalablement frotté avec une peau de chat : la petite balle est attirée ; mais si on la laisse venir au contact du bâton de résine et partager son électricité, elle s'en écarte ensuite vivement et fuit constamment le bâton électrisé quand on l'approche (*fig. 219*). Ce phénomène est général : un corps électrisé repousse un corps avec lequel il a partagé son électricité par simple contact.

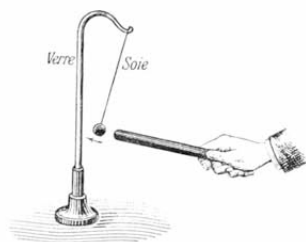


Fig. 219. — Répulsion électrique après contact.

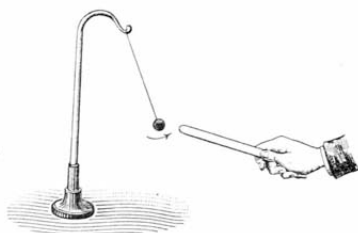


Fig. 220. — Attraction produite par deux électricités différentes.

2° Revenons à l'expérience précédente. Si nous présentons à la balle repoussée par la résine un bâton de verre préalablement électrisé par frottement avec du drap, elle est vivement attirée (*fig. 220*). L'électricité de la résine et celle du verre sont donc différentes par leurs effets.

L'expérience inverse est aussi concluante. Touchons la balle du pendule avec le doigt pour lui enlever son électricité, puis approchons le verre frotté avec du drap : la balle est attirée, électrisée au contact, puis repoussée ; elle est au contraire attirée par la résine frottée avec une peau de chat.

Par convention, on donne le nom d'électricité vitrée ou *positive* à l'électricité développée sur le verre frotté avec

du drap. Celle qui se développe sur la résine frottée avec une peau de chat est appelée électricité résineuse ou *negative*. La première est symbolisée par le signe +, la seconde par le signe —.

3<sup>o</sup> En approchant un corps électrisé quelconque successivement de deux balles de pendule chargées, l'une d'électricité positive, l'autre d'électricité négative, nous constaterions que s'il attire l'une il repousse l'autre, c'est-à-dire qu'il se comporte vis-à-vis de ces balles soit comme la résine frottée, soit comme le verre frotté.

En résumé, les expériences sur les attractions et les répulsions électriques conduisent aux résultats suivants : *Il y a deux espèces d'électricité (électricités positive et négative), et il n'y en a que deux ;*

*Deux corps chargés de la même électricité (+, +) ou (—, —) se repoussent et deux corps chargés d'électricités contraires (+, —) s'attirent.*

**Applications.** — C'est par suite de la répulsion qui s'exerce entre les corps chargés de la même électricité que les cheveux d'une personne se redressent lorsqu'on l'électrise après l'avoir fait monter sur un tabouret à pieds isolants, que deux balles de sureau fixées côte à côte par des fils de coton à un conducteur électrisé, divergent. Une des principales applications de cette répulsion est l'*électroscope à feuilles d'or*.

**144. Électroscope à feuilles d'or.** — L'électroscope à feuilles d'or permet de constater l'existence de très faibles charges électriques. Il se compose essentiellement d'une tige de laiton (*fig. 221*), terminée à sa partie supérieure par une boule de même alliage et à sa partie inférieure par deux feuilles d'or battu ou d'aluminium, excessive-

ment légères. Un petit flacon de verre, fermé par un

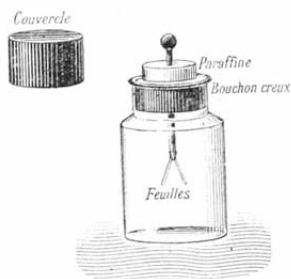


Fig. 221. — Electroscopie à feuilles d'or de M. Boudréaux.

bouchon creux en laiton, soutient cette tige par l'intermédiaire d'un cylindre de paraffine; il protège les feuilles contre l'agitation de l'air. Enfin un couvercle métallique repose sur le bouchon creux lorsqu'on ne se sert pas de l'électroscope et préserve des poussières l'ensemble de l'appareil qu'il recouvre.

Si l'on met la boule de cet électroscope en communication avec un corps même très faiblement électrisé, une partie de l'électricité se répand par la tige de laiton dans les feuilles; celles-ci ayant alors le même signe d'électrisation se repoussent mutuellement et divergent, indiquant ainsi la présence de l'électricité sur le corps soumis à l'expérience.

L'électroscope à feuilles d'or a d'autres usages que nous verrons plus loin (157).

L'électroscope que nous venons de décrire est celui de

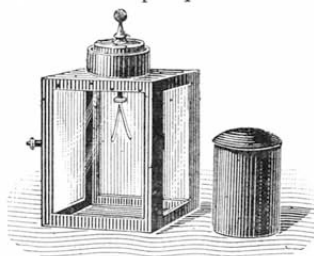


Fig. 222. — Electroscopie de M. Hurmuzescu (Type des lycées).  
dimensions plus grandes (fig. 222) et permet à tout un auditoire de

M. Boudréaux; il fonctionne sous l'influence des plus faibles charges électriques sans qu'il soit besoin de placer à l'intérieur des substances desséchantes (on peut même y introduire une couche d'eau). On rencontre souvent dans les laboratoires un autre électroscope non moins sensible (électroscope de M. Hurmuzescu), qui est de dimensions plus grandes (fig. 222) et permet à tout un auditoire de

suivre facilement une expérience. Il diffère du précédent principalement en ce que le cylindre de paraffine est remplacé par un cylindre en diélectrine et le flacon par une boîte métallique rectangulaire vitrée d'un verre conducteur sur les quatre côtés. Une borne métallique soudée sur l'un des angles de la boîte permet de mettre celle-ci en communication avec la terre.

**145. Lois des forces attractives ou répulsives.** — Les variations de grandeur des forces qui produisent les attractions et les répulsions entre les corps électrisés ont été étudiées principalement par Coulomb. Il mesura, avec une sorte de dynamomètre très sensible (*balance de Coulomb*), les forces attractives ou répulsives qui s'exercent entre deux balles de sureau électrisées, de dimensions assez petites pour être négligeables eu égard à leur distance. Dans ce cas, on peut admettre que les forces électriques agissent suivant la droite qui joint les centres des deux balles. Coulomb fut ainsi conduit aux deux lois suivantes :

**1<sup>re</sup> Loi :** Toutes choses égales d'ailleurs, les forces attractives ou répulsives qui s'exercent entre deux points électrisés sont inversement proportionnelles au carré de leur distance.

Ainsi à des distances de 2, 3, 4<sup>cm</sup>, . . . , les forces attractives ou répulsives sont 4, 9, 16, . . . fois plus petites qu'à 1<sup>cm</sup>. Cette loi s'applique à deux corps électrisés de petites dimensions par rapport à leur distance ; on peut la vérifier directement avec la balance de Coulomb, mais elle est beaucoup mieux vérifiée par ses conséquences.

Il résulte de la première loi de Coulomb que dans un certain espace autour d'un corps électrisé une très petite balle électrisée serait soumise à des forces attractives ou répulsives de grandeur variable avec sa position. Cet espace, appelé *champ électrique* du corps électrisé, est théoriquement indéfini ; pratiquement, il est plus ou moins limité parce que

les forces attractives et répulsives diminuant rapidement avec la distance, cessent bientôt d'être mesurables.

**2<sup>e</sup> Loi :** Pour une distance donnée, les forces attractives ou répulsives qui s'exercent entre deux corps électrisés de petites dimensions par rapport à leur distance sont proportionnelles aux quantités d'électricité qu'ils renferment.

Les corps entre lesquels s'exercent des forces électriques attractives ou répulsives peuvent être plus ou moins chargés d'électricité. Comme l'électricité nous est révélée par l'existence de ces forces, il est naturel de fonder sur leur valeur la comparaison des quantités d'électricité que renferment les corps électrisés.

Considérons deux petites balles électrisées  $b$  et  $b'$ . Si elles exercent une même action à la même distance sur un corps électrisé  $C$ , on dit qu'elles possèdent des quantités d'électricité *égales*. Si l'action de la balle  $b$  sur  $C$  est double, triple, ... de celle exercée par la balle  $b'$  à la même distance, la quantité d'électricité de  $b$  est dite *double, triple, ...* de la quantité de  $b'$ . Supposons maintenant qu'il s'exerce une force répulsive  $f$  entre les deux balles  $b$  et  $b'$  elles-mêmes, séparées par une distance  $d$ . Si l'on touche  $b$  avec une balle  $b''$  identique, mais non électrisée, qu'on enlève ensuite, l'expérience montre que la force répulsive entre  $b$  et  $b'$  n'est plus que  $\frac{f}{2}$  à la même distance  $d$ . En admettant, ce qui est logique, que la quantité de  $b$  s'est répartie également entre  $b$  et  $b''$ , on voit que la quantité de  $b$  devenant moitié, la force répulsive devient aussi moitié moindre.

En résumé, et bien que la nature de l'électricité soit complètement inconnue, on est conduit par la variation de l'effet à admettre la variation de la cause, et à conce-

voir une *quantité d'électricité* ou, autrement dit, une *masse ou charge électrique* comme une grandeur mathématique, que l'on est en état de mesurer par l'action qu'elle est capable d'exercer.

**Unité de quantité. Formule de Goulomb.** — Convenons de prendre pour unité de quantité d'électricité, la *quantité qu'il faut communiquer respectivement à deux petites sphères égales pour que, placées dans l'air à 1<sup>cm</sup> de distance, elles se repoussent mutuellement avec une force égale à 1 dyne*. Si la charge de l'une des sphères devient de  $q$  unités de quantité, la force devient  $q$  fois plus grande; si la charge de l'autre sphère devient de  $q'$  unités, la force devient encore  $q'$  fois plus grande; enfin, si les deux sphères sont amenées à la distance  $d$ , la force devient  $d^2$  fois plus petite: elle a donc pour expression

$$f = \pm \frac{qq'}{d^2} \text{ dynes.}$$

Le signe + correspond à des quantités de même nom et indique une force répulsive; le signe — à des quantités de noms contraires et indique une force attractive.

En particulier, la force répulsive entre deux quantités d'électricité de même nom, toutes deux égales à  $q$  et placées à la distance  $d$ , serait

$$f = \frac{q^2}{d^2} \text{ dynes.}$$

L'unité de quantité que nous avons définie s'appelle l'unité *électrostatique* C. G. S. de quantité; elle est extrêmement petite. Dans la pratique, on emploie une unité beaucoup plus grande appelée *coulomb* (1 coulomb vaut  $3 \times 10^9$  unités électrostatiques C. G. S.).

**REMARQUES.** — 1° L'expérience montre que les quantités

d'électricité, qu'elles soient de même nom ou de noms contraires, s'ajoutent à la manière des quantités algébriques. Ainsi une quantité  $+q$  d'électricité positive ajoutée à une quantité  $-q$  d'électricité négative donne une quantité égale à 0. Réciproquement, si deux quantités s'annulent par leur réunion, on en conclut qu'elles sont égales et de signes contraires : ce sont des quantités *équivalentes*.

2° Nous n'avons considéré jusqu'à présent que des corps électrisés de dimensions très petites, négligeables vis-à-vis des distances. Si un corps électrisé a des dimensions plus ou moins considérables, les lois et définitions qui précèdent s'appliquent aux divers éléments ou parties très petites dont il est formé, de sorte que la quantité  $Q$  d'électricité qui se trouve sur le corps est, par définition, la somme des quantités  $q, q', q'', \dots$  de ses éléments. De même la force attractive ou répulsive exercée par le corps électrisé sur une petite balle chargée de l'unité de quantité d'électricité est la résultante de toutes les forces telles que  $f, f', f'', \dots$  produites par les quantités  $q, q', q'', \dots$ . L'intensité et la direction de cette résultante représentent l'intensité et la direction du champ électrique au point où se trouve la petite balle.

#### 146. Développement simultané des deux électricités. —

On ne peut produire ou annuler une quantité quelconque d'électricité sans produire ou annuler en même temps une quantité équivalente d'électricité de nom contraire. Ce principe général se vérifie facilement dans l'électrisation par le frottement.

##### 1° Deux corps frottés l'un contre l'autre s'électrisent

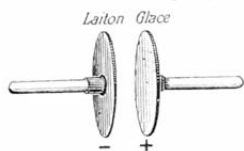


Fig. 223. — Expérience montrant le développement des deux électricités par le frottement.

tous deux. Pour le montrer, on frotte l'un contre l'autre un disque en glace de Saint-Gobain et un disque en laiton, munis d'un manche isolant en verre (*fig. 223*). Si l'on sépare ensuite les deux disques, on

constate avec un pendule électrique que le disque en



laiton porte une charge négative et le disque en verre une charge positive.

2° *Les électricités développées sur les deux corps frottés sont équivalentes au point de vue des effets extérieurs.* On le démontre par l'expérience de Lippmann.

Une éprouvette à pied, isolée par un bloc de paraffine (fig. 224), renferme du mercure sec et une tige de fer reliée par

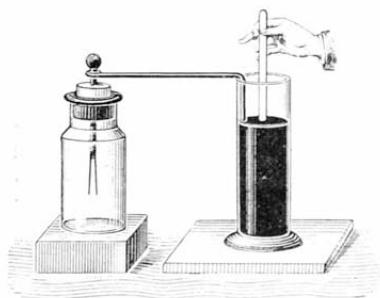


Fig. 224. — Expérience de Lippmann.

une tige métallique au bouton d'un électroscope à feuilles d'or. Si l'on plonge dans le mercure une baguette de verre bien sèche, les feuilles restent en contact ; mais elles divergent dès qu'on retire la baguette. Le mercure s'est donc électrisé ; il en est de même de la baguette, et l'on peut constater

que les électrisations prises par le verre et le mercure sont opposées. En replongeant dans le mercure la même portion de la baguette, les feuilles de l'électroscope reviennent au contact, ce qui prouve que les électricités développées sur les deux corps sont capables d'annuler mutuellement leurs effets et sont, par suite, équivalentes.

**147. Historique des phénomènes fondamentaux.** — Thalès de Milet au <sup>vi</sup> siècle avant J.-C. avait déjà signalé l'attraction des corps légers par l'ambre jaune frotté ; mais ce fait resta longtemps isolé et ce fut seulement vers 1600 que Gilbert, médecin de la reine Elisabeth d'Angleterre, montra que beaucoup de substances, comme le verre, le bois, sont dans le même cas que l'ambre.

En 1727, le physicien anglais Gray découvrit la conductibilité électrique. Un peu plus tard (1733), le physicien français Dufay montra que tous les corps peuvent s'électriser, pourvu qu'ils soient isolés, et établit la distinction des deux espèces d'électricité. Enfin Wilke démontra que deux corps frottés

l'un contre l'autre prennent des électricités de noms contraires.

### RÉSUMÉ DU CHAPITRE XIV

Tous les corps solides acquièrent par le frottement la propriété d'attirer les corps légers ; on dit alors qu'ils sont *électrisés*. Les uns manifestent cette propriété quand on les tient directement à la main : ce sont des corps *mauvais conducteurs* (résine, paraffine, verre, ...); les autres doivent être tenus par l'intermédiaire d'un mauvais conducteur, ce sont les corps *bons conducteurs* (métaux, coton, ...).

Le *pendule électrique* sert à reconnaître si un corps est électrisé. C'est une petite balle de sureau suspendue par un fil métallique (pendule non isolé) ou par un fil de soie (pendule isolé).

Un corps à l'état neutre s'électrise si on le met en contact avec un autre corps électrisé.

Il y a deux espèces d'électricité, que l'on est convenu d'appeler *électricité négative* et *électricité positive*. La première est celle qui se développe sur la résine frottée avec une peau de chat ; la seconde, celle qui se développe sur le verre frotté avec du drap. Deux corps chargés de la même électricité se repoussent, et deux corps chargés d'électricités contraires s'attirent.

La principale application de la répulsion qui s'exerce entre deux corps chargés de la même électricité est l'*électroscope à feuilles d'or*, qui permet de constater l'existence d'une très faible quantité d'électricité par la divergence de deux feuilles d'or.

Les forces attractives ou répulsives qui s'exercent entre deux points électrisés sont inversement proportionnelles au carré de leur distance et proportionnelles aux quantités d'électricité dont ils sont chargés (lois de Coulomb). La quantité d'électricité est une grandeur que l'on mesure par les forces attractives ou répulsives auxquelles elle donne naissance. L'unité adoptée en pratique pour mesurer les quantités d'électricité porte le nom de *coulomb*.

Dans le frottement mutuel de deux corps, l'un s'électrise toujours positivement et l'autre négativement ; les électricités développées sont équivalentes au point de vue des effets extérieurs.

### EXERCICES SUR LE CHAPITRE XIV

42. Deux sphères de même rayon sont électrisées et placées à une distance  $d$  l'une de l'autre. Leur force répulsive est  $f$ . On les met en contact, puis on les éloigne à une distance  $d'$  l'une de l'autre. Leur force répulsive devient alors  $f'$ . On demande les charges primitives des deux sphères.

$$\text{Application : } f = 1 ; \quad f' = 4,5 ; \quad d' = \frac{d}{2}.$$

43. Deux petites sphères A et B sont fixées aux extrémités d'une

droite de longueur  $l$ ; leurs charges électriques sont respectivement  $q$  et  $q'$ . Quelle sera la position d'équilibre d'une sphère  $C$ , mobile sur la même droite et ayant une charge  $q''$ ?

44. On donne deux sphères identiques  $A$  et  $B$  de petites dimensions à une distance  $d$  sur un plateau isolant. La sphère  $A$  est électrisée; la sphère  $B$  est à l'état neutre. Avec une troisième sphère identique  $C$ , on touche d'abord  $A$ , puis  $B$ . En quel point de la droite  $AB$  faut-il placer la sphère  $C$  pour qu'il y ait équilibre?

45. Deux pendules électriques de longueur  $l$ , d'abord en contact, sont chargés d'une certaine quantité d'électricité. Ils s'écartent alors de la verticale et chacun d'eux fait un angle  $\alpha$  avec cette direction. On demande de calculer la charge  $x$  de chaque balle de poids  $p$ , le poids des fils suspendant ces balles étant négligeable.

46. Un corps isolé, de très petites dimensions  $A$ , est électrisé négativement; sa charge est de 3924 unités.

A quelle distance  $d$ , au-dessous de  $A$  et sur la verticale passant par ce point, doit-on placer un autre corps, également très petit,  $B$ , d'une masse égale à 1 décigramme et chargé de l'unité de quantité d'électricité positive, pour que ce corps semble ne plus rien peser?

Quel serait le poids apparent de  $B$  si on le plaçait à une distance  $\frac{d}{2}$  au-dessus de  $A$ ?

On prend comme unité de quantité d'électricité la quantité qui, placée à 1<sup>cm</sup> d'une quantité égale, la repousse avec une force égale à la fraction  $\frac{1}{981}$  du poids de 1<sup>gr</sup> au lieu de l'expérience.

## CHAPITRE XV

### LOCALISATION ET DISTRIBUTION DE L'ÉLECTRICITÉ

148. Localisation de l'électricité à la surface des conducteurs. — Sur les corps *mauvais conducteurs*, l'électricité demeure localisée aux points où on l'a développée. Il n'en est pas de même pour les corps *bons conducteurs*, et

l'expérience ainsi que le calcul conduisent au théorème fondamental suivant, énoncé par Coulomb :

Lorsqu'un conducteur isolé est en équilibre électrique, l'électricité, positive ou négative, n'existe jamais qu'à la surface extérieure.

Parmi les nombreuses expériences qui permettent de vérifier ce théorème, nous en citerons trois :

1° On prend une sphère métallique creuse (*fig. 225*), isolée sur un pied de verre ou mieux de paraffine et pos-

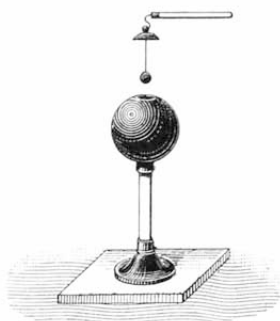


Fig. 225. — Sphère creuse de Coulomb (modifiée par M. Lippmann).

sédant une ouverture juste assez grande pour laisser passer sans frottement une *sphère d'épreuve*. On appelle ainsi une petite boule de cuivre suspendue par un fil de soie blanche au-dessous d'un couvercle ajusté sur l'ouverture de la grosse sphère. Celle-ci étant électrisée par contact avec une source électrique, on l'incline sur son support de

manière à faire toucher la paroi intérieure à la petite boule. On redresse l'appareil, on enlève le couvercle et la boule à l'aide d'un bâton isolant muni d'un petit crochet et on touche le couvercle du doigt (et non la boule) afin de le décharger. En mettant alors la boule en contact avec celle d'un électroscope, on n'observe aucun signe d'électrisation.

Si, au contraire, on présente à l'électroscope la petite boule après l'avoir mise en contact avec la surface extérieure de la sphère creuse, les feuilles de l'électroscope divergent fortement, ce qui montre que la sphère creuse est bien électrisée.

2° On enveloppe une sphère métallique, isolée et électrisée, avec deux hémisphères métalliques de plus grand diamètre tenus par des manches isolants (*fig. 226*). Après avoir abaissé légèrement l'ensemble des deux hémisphères pour leur faire toucher la sphère, on les relève un peu en évitant tout contact avec la sphère, puis on les sépare : les hémisphères sont alors électrisés et la sphère ne l'est plus, ainsi qu'on le constate avec l'électroscope. Ce résultat s'explique en remarquant qu'au moment du contact les hémisphères formant la surface extérieure d'un conducteur creux composé des hémisphères et de la sphère, toute l'électricité est passée sur cette surface extérieure.



Fig. 226. — Sphère de Cavendish.

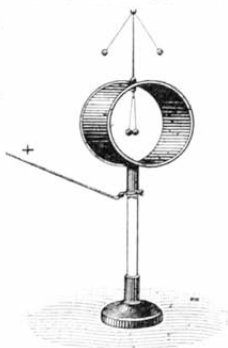


Fig. 227. — Cylindre ouvert pour la démonstration du théorème de Coulomb.

3° On peut enfin démontrer que l'électricité se porte à la surface extérieure des corps en se servant d'un cylindre ouvert, isolé (*fig. 227*), muni de doubles pendules intérieurs et extérieurs. Si l'on électrise le cylindre en lui faisant toucher un des pôles d'une machine électrique, les pendules extérieurs seuls divergent.

Cette expérience démontre que la surface du conducteur ne doit pas avoir nécessairement une continuité parfaite. On peut d'ailleurs lui donner une autre forme indiquée par

Faraday. Une cage métallique formée par un simple grillage, et dans l'intérieur de laquelle on a suspendu aussi bien qu'à l'extérieur des doubles pendules, est mise en contact avec un des pôles d'une machine électrique puissante. Les doubles pendules extérieurs divergent fortement, tandis que les doubles pendules intérieurs restent immobiles; on peut tirer de fortes étincelles à l'extérieur et cependant un oiseau placé à l'intérieur ne ressentirait rien, même s'il s'appuyait contre les barreaux.

En résumé, quand on électrise un conducteur, l'électricité qui lui est communiquée se répand exclusivement à la surface extérieure. De plus cette électricité, pas plus que celle des sources électriques extérieures, n'exerce aucune action en tout point de l'espace compris à l'intérieur : on dit que le conducteur électrisé forme un *écran électrique* pour la région qu'il enveloppe.

**Applications.** — Cette propriété de l'électricité de se répandre exclusivement à la surface extérieure des conducteurs trouve une application très intéressante dans le *cylindre de Faraday*, appareil qui permet de déterminer la charge totale d'un corps conducteur de petites dimensions.

Il se compose d'un cylindre creux (*fig. 228*), qui repose sur un gâteau de paraffine et communique avec la boule d'un électroscope ou mieux avec un électromètre. Le cylindre est muni d'un couvercle à bords arrondis que l'on peut enlever à l'aide d'un manche isolant. Si l'on introduit à l'intérieur un conducteur électrisé, comme une boule métallique suspendue au couvercle par un fil de soie, et qu'on incline le cylindre de manière qu'elle touche la paroi, toute l'électricité de la boule passera sur la surface extérieure et fera diverger plus ou moins

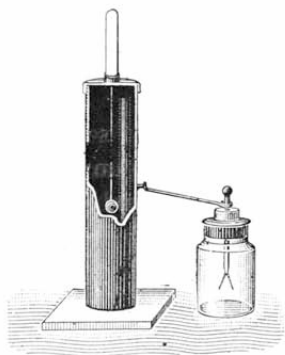


Fig. 228. — Cylindre de Faraday.

les feuilles de l'électroscope. En répétant l'opération, on

peut ainsi doubler, tripler la charge de la surface extérieure du cylindre et doubler, tripler la divergence des feuilles d'or.

**149. Distribution de la couche superficielle d'électricité.** — L'étude de la distribution de l'électricité sur un conducteur quelconque se fait par la méthode dite du *plan d'épreuve*.

Le plan d'épreuve est constitué par un petit disque en clinquant ou en aluminium (*fig. 229*), collé sur la base d'un cylindre en paraffine tenu par un manche en ébonite. Quand on applique le disque sur la surface d'un conducteur électrisé, il se substitue momentanément à l'élément de surface qu'il recouvre et on peut admettre qu'il prend l'électricité chargeant cet élément. En enlevant le disque ainsi chargé et en l'introduisant ensuite dans le cylindre de Faraday, comme il a été dit plus haut, on peut déduire de l'écartement des feuilles d'or la quantité d'électricité qui se trouvait dans la région recouverte par le disque. Cet écartement, s'il n'est pas trop considérable, est proportionnel à la charge du disque. Souvent on installe devant l'électroscope un petit viseur qui permet de mesurer avec quelque précision l'écartement des feuilles d'or.



Fig. 229. —  
Plan d'épreuve  
de  
M. Boudréaux.

**Distribution sur un conducteur sphérique.** — Si l'on explore avec le plan d'épreuve les différents points de la surface d'un conducteur sphérique électrisé et éloigné de tout autre conducteur, on constate que la charge emportée chaque fois par le disque est la même quelle que soit la région touchée : on exprime ce fait en disant que la distribution de la charge est *uniforme*. La quantité d'électri-

ité répandue sur chaque unité de surface ( $1^{\text{re}}$ ) s'appelle la *densité électrique*; en appelant  $\delta$  cette densité,  $Q$  la quantité totale qui charge une sphère de rayon  $R$ , on peut écrire

$$\delta = \frac{Q}{4\pi R^2}.$$

On démontre qu'une sphère en équilibre électrique agit sur un point extérieur de la même manière que si la quantité d'électricité qu'elle contient était concentrée en son centre. D'après cela, son action sur un point extérieur contenant l'unité de quantité d'électricité et situé à une distance  $d$  du centre a pour expression

$$f = \frac{Q}{d^2} = \frac{4\pi R^2 \delta}{d^2}.$$

**Distribution sur un conducteur non sphérique.** — Les charges mesurées par la méthode du plan d'épreuve sur des surfaces égales d'un conducteur non sphérique ne sont pas égales entre elles. On considère alors, dans la pratique, la *densité électrique moyenne* en un point, c'est-à-dire le rapport de la quantité d'électricité qui se trouve sur une petite surface prise autour de ce point, à l'aire de

cette surface. L'expérience montre que la densité électrique moyenne sur un même conducteur est en général d'autant plus grande que la surface a un rayon de courbure plus faible au point considéré.

Sur un ellipsoïde (*fig. 230*), la densité électrique moyenne est d'autant plus grande que le contact du plan d'épreuve a lieu plus près des extrémités du grand axe.



Fig. 230. — Étude de la distribution sur un conducteur ellipsoïde.



Sur un conducteur ayant une forme *ovoïde*, elle est plus grande au petit bout qu'au gros bout.

**450. Pouvoir des pointes.** — Lorsque la surface d'un conducteur électrisé présente des parties aiguës ou des arêtes vives, la densité électrique moyenne y devient très grande.

On constate alors que le conducteur se décharge rapidement; c'est ce qu'on appelle le *pouvoir des pointes*. Ainsi un conducteur électrisé muni d'une pointe perd son électricité par la pointe jusqu'à ce qu'il soit ramené à l'état neutre.

Pour observer facilement ce phénomène, on adapte une tige métallique recourbée et terminée en pointe sur l'un des pôles d'une machine électrique en activité. Dans l'obscurité, l'écoulement de l'électricité par la pointe se manifeste par une aigrette lumineuse violacée si la tige est fixée au pôle positif de la machine, par un point lumineux brillant si la tige est fixée au pôle négatif. De plus, comme les molécules d'air voisines s'électrisent au contact de la pointe puis sont vivement repoussées, il en résulte un véritable courant d'air (*vent électrique*), qui semble venir de la pointe et que l'on sent très bien en plaçant la main à une petite distance. Si l'on approche de la pointe la



Fig. 231. — Expérience montrant l'écoulement de l'électricité par une pointe.

flamme d'une bougie (*fig. 231*), on voit la flamme se courber et souvent s'éteindre. D'un autre côté, si l'air électrisé est repoussé par la pointe, celle-ci est repoussée par l'air, et si elle est mobile elle doit se mettre en mouvement.

On réalise cette condition dans le *tourniquet électrique*.



Fig. 232. — Tourniquet électrique.

Le tourniquet électrique se compose de quatre ou six tiges en laiton, dont les extrémités terminées en pointe sont recourbées en sens opposés (fig. 232). Le système est mobile autour d'un pivot métallique que l'on fixe sur un des pôles de la machine électrique. Lorsque la machine fonctionne, le tourniquet se met en mouvement en sens inverse de la direction des pointes, comme si ces pointes étaient repoussées par l'air qui se trouve devant chacune d'elles.

**451. Conservation de l'électricité.** — Il résulte de ce qui précède que les conducteurs sur lesquels on veut conserver l'électricité doivent être dépourvus de parties saillantes, d'arêtes vives ; on les limite par des surfaces arrondies ou des plans raccordés par des surfaces à rayon de courbure assez grand. Même pour les conducteurs ainsi construits il se produit une déperdition progressive de l'électricité, déperdition qui tient à plusieurs causes : renouvellement de l'air à la surface du conducteur électrisé, d'où déperdition par l'air,

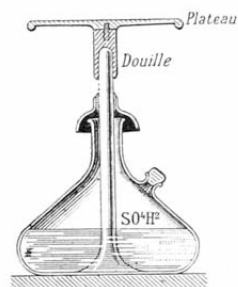


Fig. 233. — Support isolant de M. Mascart.

même sec ; isolement imparfait des supports ; humidité qui se dépose sur les supports isolants et conduit l'électricité dans le sol. Cette dernière cause est presque négligeable quand on emploie les isolants actuels, paraffine ou diélectrine, mais elle est importante avec les supports de verre, même quand ils sont recouverts d'une substance peu hygrométrique, vernis ou gomme-laque. Pour soutenir momentanément des corps électrisés, on emploie soit des gâteaux en

paraffine ou en diélectrine, soit le support à acide sulfurique de M. Mascart (fig. 233) ; les corps électrisés sont placés sur le plateau ou fixés directement sur la douille.

## RÉSUMÉ DU CHAPITRE XV

Lorsqu'un conducteur est en équilibre électrique, l'électricité est

localisée à sa surface extérieure. On le démontre par de nombreuses expériences (sphère creuse et boule d'épreuve, sphère reconverte par deux hémisphères, cylindre ouvert muni de doubles pendules).

Pour étudier la distribution de la couche superficielle d'électricité, on applique un *plan d'épreuve* en différents points de la surface du conducteur à étudier et l'on porte chaque fois le plan d'épreuve en contact avec la surface intérieure du cylindre de Faraday, mis en communication avec un électroscope. On reconnaît ainsi que la distribution de la charge sur une sphère est uniforme. Sur un conducteur non sphérique, la densité moyenne en un point (c'est-à-dire le quotient de la charge sur une petite surface autour de ce point par l'aire de cette surface) varie; elle croît en raison inverse du rayon de courbure et devient très grande sur toutes les parties proéminentes ou aiguës.

Un conducteur muni de pointes ne peut rester électrisé (pouvoir des pointes). Si l'on dispose une pointe sur l'un des pôles d'une machine électrique, l'écoulement de l'électricité se manifeste par une aigrette lumineuse dans l'obscurité, par le vent électrique, par l'extinction d'une bougie. Si la pointe est mobile, elle tend à fuir en sens contraire de l'écoulement de l'électricité (tourniquet électrique).

---

## CHAPITRE XVI

### INDUCTION ÉLECTROSTATIQUE

---

**152. Définitions.** — Le phénomène de l'induction ou de l'influence électrostatique consiste en ce que *tout conducteur à l'état neutre, placé dans le voisinage d'un corps électrisé, se charge d'électricité*. Le corps primitivement électrisé se nomme l'*influençant* ou l'*inducteur*; le conducteur est l'*influencé* ou l'*induit*.

D'une manière générale, la région de l'induit la plus rapprochée de l'inducteur prend une charge électrique de nom contraire à celle de l'inducteur; la région la plus éloignée se charge d'électricité de même nom.

Nous examinerons successivement le cas où l'induit enveloppe complètement l'inducteur et celui où il ne l'enveloppe pas.

**153. Influence à l'intérieur d'un conducteur fermé.** — *Lorsqu'un conducteur électrisé est enveloppé complètement par un autre conducteur, il induit sur la surface intérieure de ce dernier une quantité d'électricité égale à la sienne et de signe contraire.*

Ce théorème, énoncé par Faraday, se démontre expérimentalement avec le cylindre de Faraday. On prend comme corps inducteur une petite sphère (fig. 234), que l'on charge d'électricité positive.

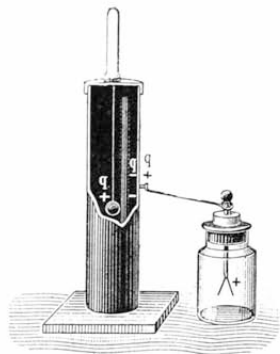


Fig. 234. — Influence à l'intérieur d'un conducteur fermé.

1° Dès que la sphère est introduite dans le cylindre, les feuilles de l'électroscope divergent. L'écart augmente d'abord à mesure que la sphère descend; il atteint son maximum lorsque celle-ci se trouve à une certaine distance

au-dessous de l'orifice et, à partir de ce moment, la divergence des feuilles reste sensiblement constante quelle que soit la position de la sphère. Le cylindre se comporte alors comme un conducteur fermé, et la quantité d'électricité induite a sa valeur maxima. En même temps, on peut constater qu'un plan d'épreuve se charge *positivement* lorsqu'on l'applique sur la surface extérieure du cylindre et *négativement* si on l'applique sur la surface intérieure.

2° A partir du moment où le cylindre se comporte comme une cavité fermée, le plan d'épreuve appliqué sur un même élément de la surface extérieure emporte toujours la même quantité d'électricité quelle que soit la position de la sphère à l'intérieur du cylindre. Donc la distribution sur la surface extérieure est indépendante de la position de la sphère. Au contraire, la distribution interne de l'électricité varie en chaque point lorsqu'on déplace la sphère : la densité électrique est plus grande dans les régions les plus voisines de la sphère.

3° Si l'on retire la sphère du cylindre, les feuilles d'or retombent et le plan d'épreuve ne se charge plus au contact ; donc le cylindre cesse d'être électrisé. Cela prouve que les deux quantités d'électricité positive et négative qui ont pris naissance par influence sont *équivalentes*.

4° Pour montrer que chacune de ces deux quantités est égale en valeur absolue à celle de la sphère, on met la sphère en contact avec la surface intérieure du cylindre : la divergence des feuilles d'or ne varie pas. Or on constate au plan d'épreuve qu'après le contact, il n'y a plus d'électricité ni sur la sphère ni sur la surface intérieure du cylindre, et, de plus, que la distribution sur la surface extérieure est restée la même. Donc la charge interne du cylindre et celle de la sphère se sont exactement neutralisées ; elles étaient donc équivalentes.

5° Enfin, si l'on met le cylindre en communication avec le sol pendant que la sphère est à l'intérieur, l'électricité distribuée sur la surface extérieure disparaît et les feuilles d'or retombent. Mais l'électricité de nom contraire distribuée sur la surface intérieure persiste, et si l'on enlève la sphère après avoir rompu la communication avec le sol,

cette électricité passe sur la surface extérieure et le cylindre se trouve ainsi chargé d'électricité négative.

REMARQUE. — Il résulte des expériences précédentes que, si l'on enveloppe un corps électrisé par un conducteur communiquant avec le sol, on supprime l'influence de ce corps sur les points extérieurs au conducteur. Le conducteur forme un *écran électrique parfait* qui arrête toute action de l'intérieur sur l'extérieur. Il protège également le corps qu'il enveloppe contre les phénomènes d'influence produits par les charges électriques extérieures. En somme, la surface extérieure d'un tel conducteur divise l'espace en deux régions où les phénomènes électriques sont complètement indépendants les uns des autres.

**154. Influence d'un corps électrisé sur les conducteurs extérieurs.**— Quand un conducteur à l'état neutre est placé en présence d'un corps électrisé mais ne l'entoure pas, les deux quantités d'électricité de signes contraires induites sur le conducteur sont encore égales en valeur absolue, mais elles sont *inférieures* à la quantité inductrice, car c'est la quantité induite sur tous les conducteurs enveloppant le corps électrisé qui est égale à la quantité inductrice.

La vérification expérimentale se fait ordinairement avec

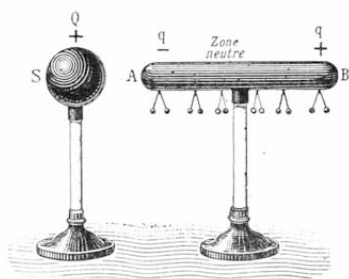


Fig. 235. — Influence d'une sphère électrisée sur un cylindre isolé.

une sphère isolée, électrisée positivement, et le cylindre d'Æpinus (*fig. 235*). Ce cylindre est également isolé; il est terminé par des surfaces arrondies et porte une série de doubles pendules conducteurs qui ont pour but d'indi-

quer, par leur divergence, l'état d'électrisation de la région sous laquelle ils sont suspendus.

1° Le cylindre étant approché de la sphère s'électrise par influence. Vers le milieu, mais plus près de la sphère inductrice, se trouve une petite zone sans électricité (*zone neutre*); le double pendule qui correspond à cette zone reste immobile. Tous les autres pendules divergent d'autant plus qu'ils sont plus voisins des deux extrémités du cylindre. Un bâton de résine électrisé qu'on approche lentement des doubles pendules repousse ceux de la région voisine de la sphère; il attire ceux de la région opposée. On voit ainsi que la surface du cylindre présente deux plages électrisées, séparées par une zone neutre; la plage la plus voisine de la sphère inductrice est chargée d'électricité négative; la plage la plus éloignée, d'électricité positive.

2° Si l'on supprime l'influence en éloignant les deux corps l'un de l'autre, le cylindre revient à l'état neutre: donc les quantités d'électricité induites sont *équivalentes*.

3° Quand on met le cylindre en communication avec le

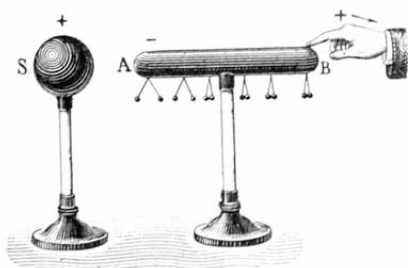


Fig. 236. — Influence d'une sphère électrisée sur un cylindre communiquant avec le sol.

sol en le touchant avec le doigt, par exemple (*fig. 236*), les balles qui forment les doubles pendules de l'extrémité B retombent et les doubles pendules de l'extrémité A divergent

d'avantage; cela tient à ce que l'électricité de même nom que celle de la sphère disparaît, tandis que la quantité d'électricité de signe contraire augmente. Il en est ainsi quel que soit le point touché, fût-ce l'extrémité A.

Si l'on supprime la communication du cylindre avec le sol et si l'on éloigne ensuite la sphère inductrice, on constate que le cylindre est chargé d'électricité négative. Il a pris ainsi par influence une électricité opposée à celle de l'inducteur.

4° Le cylindre étant à l'état neutre comme avant les expériences précédentes, si on l'approche peu à peu de la sphère, on remarque que la divergence des pendules augmente, ce qui prouve que l'influence sur le cylindre est de plus en plus grande. A un moment donné, l'attraction mutuelle de l'électricité inductrice et de l'électricité contraire induite sur la partie du cylindre voisine de la sphère est assez grande pour vaincre la résistance de l'air. On voit alors un trait de feu accompagné d'un bruit sec : c'est ce qu'on appelle une *étincelle électrique* ; une partie de la charge négative de A neutralise une quantité égale et positive de S.

Si le cylindre communique avec le sol, l'étincelle est plus longue et plus brillante, car la quantité d'électricité négative qui est sur AB est plus grande que lorsque le cylindre est isolé ; dans ce cas le cylindre revient à l'état neutre après l'étincelle.

REMARQUES. — 1° Un conducteur isolé, interposé entre la sphère et le cylindre, s'électrise par influence comme ce dernier. Si le conducteur interposé est mis en communication avec le sol, l'influence produite par la sphère sur le cylindre est tellement affaiblie qu'elle ne peut plus être constatée à l'aide des doubles pendules suspendus au cylindre. Le conducteur forme donc un écran électrique, mais imparfait. Cet écran deviendrait parfait, comme nous l'avons vu, si le conducteur entourait complètement la sphère inductrice ou le cylindre induit.

2° L'induction électrostatique s'exerce à travers les substances isolantes comme à travers l'air. Ces substances ne forment donc pas d'écran électrique comme les corps con-



ducteurs : elles portent, pour cette raison, le nom de *diélectriques*.

3° Nous avons supposé les conducteurs induits à l'état neutre ; s'ils sont préalablement électrisés, l'influence s'exerce de la même manière ; seulement, l'électricité développée par influence s'ajoute à celle que possédait déjà le conducteur.

#### APPLICATIONS DE L'INDUCTION ÉLECTROSTATIQUE

**155. Applications générales.** — Le phénomène de l'induction électrostatique joue un rôle important dans la plupart des appareils d'électricité statique : électrophore, électroscope, condensateurs, machines électriques. On l'utilise pour électriser les conducteurs autrement que par contact ou par le frottement. Il permet d'expliquer l'attraction des corps légers par les corps électrisés, l'action préservatrice des paratonnerres, et une foule d'expériences comme celles du carillon électrique, de la grêle de Volta, etc.

**156. Électrophore.** — L'électrophore, imaginé par Volta, est la plus simple des sources d'électricité statique.

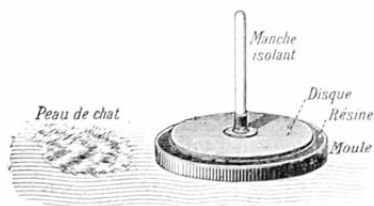


Fig. 237. — Électrophore ordinaire.

Il se compose : 1° d'un gâteau de résine coulé dans un moule en bois ou en métal (fig. 237) ; 2° d'un disque conducteur d'un diamètre un peu moindre. Ce disque

est en bois recouvert de papier d'étain ; il peut être manié au moyen d'un manche isolant.

Pour se servir de cet appareil, on charge d'électricité

négative la surface du gâteau en le frappant avec une peau de chat, puis on y dépose le disque. L'électricité négative de la résine agit par influence sur l'étain, attire l'électricité positive à la face inférieure du disque et repousse l'électricité négative à la partie supérieure (fig. 238). En



Fig. 238. — Influence électrique dans l'électrophore.

touchant le disque avec le doigt, l'électricité négative s'écoule dans le sol et l'électricité positive du disque augmente (154). On ôte alors le doigt, puis on enlève le disque par son manche isolant ; le disque emporte son électricité positive qui, n'étant plus attirée par l'électricité négative de la résine, se distribue sur ses deux faces.

On utilise la charge du disque en l'approchant soit du doigt, soit d'un conducteur quelconque : à une petite distance il se produit une étincelle due à la neutralisation à travers l'air de l'électricité positive du disque et de l'électricité négative développée par influence sur le doigt ou sur le conducteur.

Comme l'électricité de la résine ne subit d'autres pertes que celles qui résultent des défauts d'isolation, on peut, si l'air est très sec, recommencer l'opération un grand nombre de fois sans battre de nouveau le gâteau et obtenir chaque fois de l'électricité positive.

**Électrophores actuels.** — La résine présente l'inconvénient de se fendiller sous l'influence des variations de température, ce qui oblige à refondre souvent le gâteau. Aujourd'hui on substitue à la résine, soit l'ébonite (caoutchouc durci), soit la diélectrine ; de plus, on emploie des disques entièrement métalliques.

La figure 239 représente l'électrophore de M. Hurmuzescu. Le gâteau, en diélectrine, est coulé dans une armature en zinc portant en son centre une petite colonne de même métal qui affleure la surface de la diélectrine. Le disque, en aluminium, est armé d'un manche en diélectrine. On frappe

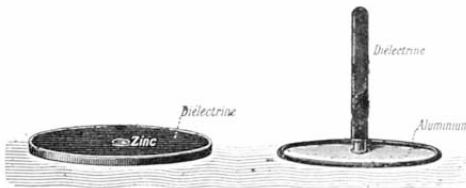


Fig. 239. — Electrophore de M. Hurmuzescu.

le gâteau avec une peau de chat, puis on applique le disque dessus et on l'enlève verticalement. Il est inutile de toucher le disque avec le doigt

comme dans les électrophores ordinaires, la petite colonne centrale de zinc établissant une communication constante entre le disque et le sol. Un électrophore de ce genre donne des étincelles par tous les temps.

**157. Application de l'influence à l'électroscope à feuilles d'or.** — Cet appareil, dont nous avons déjà fait la description (144), sert principalement à reconnaître si un corps est électrisé et quel est le signe de l'électricité dont il est chargé.

1° Tout corps électrisé approché du bouton d'un élec-



Fig. 240. — Manière de reconnaître si un corps est électrisé.

troscopie primitivement à l'état neutre fait diverger les feuilles (fig. 240). En effet, si le corps est chargé, par exemple, d'électricité négative, il se développe par influence de l'électricité positive qui est attirée sur le bouton et de l'électricité négative qui est repoussée dans les feuilles d'or et les fait diverger.

2° Pour reconnaître le signe d'une électricité, on charge d'abord par influence l'électroscope d'une électricité de signe connu. On approche du bouton un bâton de résine

frotté, par exemple (*fig. 241, A*); il y a influence et les feuilles divergent. Pendant que le bâton est approché, on touche un instant le bouton de l'électroscope avec le

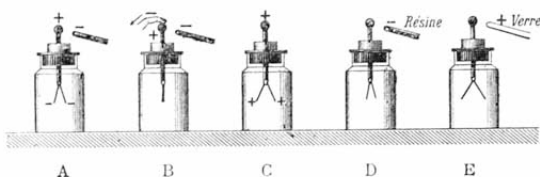


Fig. 241. — Manière de reconnaître le signe de l'électrisation d'un corps.

doigt (B); l'électricité négative disparaît et les feuilles d'or retombent. On retire le doigt, puis on éloigne la résine; les feuilles divergent de nouveau (C), chargées d'électricité positive.

Cela fait, on approche de loin et *lentement* le corps à étudier du bouton de l'électroscope. Si ce corps est chargé négativement (D), il développe par influence de l'électricité négative dans les feuilles qui retombent. S'il est chargé positivement (E), l'électricité de même nom développée par influence est repoussée dans les feuilles, qui divergent davantage.

REMARQUE. — Si l'on approche de loin et lentement de l'électroscope chargé ainsi positivement, un corps chargé négativement, un bâton de résine frotté, par exemple, on voit d'abord les feuilles d'or retomber, puis venir au contact; à un moment donné, si l'on continue d'approcher le bâton de résine, les feuilles divergent de nouveau et leur divergence va en augmentant. Voici l'explication de ce phénomène. Quand le bâton de résine est encore loin, la quantité d'électricité négative induite repoussée dans les feuilles d'or est très faible et ne neutralise qu'une partie de l'électricité positive qui se trouve sur les feuilles : celles-ci se rapprochent. Pour une distance convenable de la résine, les deux quantités sont égales et se neutralisent exactement, de sorte que les feuilles ne divergent plus. Enfin, si le corps influen-

çant est encore approché, la quantité d'électricité négative induite étant supérieure à la quantité positive qui s'y trouvait primitivement, les feuilles divergent de nouveau parce qu'elles contiennent un excès d'électricité négative.

Or, en approchant la résine *brusquement*, au lieu de l'approcher lentement, les feuilles pourraient ne pas avoir le temps de retomber, de venir au contact et de diverger; la divergence des feuilles se verrait seule, et on en tirerait une conclusion fautive sur le signe de l'électrisation du corps.

**158. Explication de l'attraction des corps légers.** — Le phénomène de l'attraction des corps légers par les corps électrisés est toujours précédé d'un phénomène d'influence.

Dans le cas où les corps *ne sont pas isolés* (fragments de papier posés sur une table, balle d'un pendule non isolé), ils se chargent seulement d'électricité contraire à celle du corps électrisé et sont vivement attirés.

Si l'on considère maintenant un corps léger *isolé*, comme

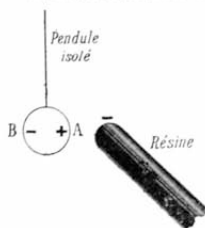


Fig. 242. — Explication de l'attraction d'un corps léger isolé.

la balle d'un pendule isolé (*fig. 242*), elle se charge par influence des deux électricités; la quantité d'électricité induite en A, égale en valeur absolue à la quantité induite en B, est plus rapprochée du corps électrisé. La force attractive est donc plus grande que la force répulsive, et il y a attraction du corps léger; mais cette attraction est moins vive que dans le cas précédent, d'abord à cause de l'existence de la force répulsive, ensuite parce que la force attractive est moins grande, la quantité d'électricité de nom contraire induite étant plus petite que lorsque le corps léger communique avec le sol.

D'après ce qui précède, quand on veut simplement recon-

naitre si un corps est électrisé, un pendule non isolé est plus sensible qu'un pendule isolé, mais il est nécessaire d'employer ce dernier quand on veut reconnaître le signe de l'électrisation. La balle du pendule est amenée en contact avec le corps à étudier et prend la même électricité ; on cherche ensuite si la balle est attirée ou repoussée par un bâton de verre ou de résine électrisé.

**159. Carillon électrique.** — Parmi les nombreuses expériences qui reposent sur l'induction électrostatique, l'une des plus intéressantes est celle du *carillon électrique*.

Le carillon électrique comprend trois timbres métalliques suspendus à une tringle horizontale que l'on met en communication avec l'un des pôles de la machine électrique (*fig. 243*). Le timbre du milieu est suspendu par un fil de soie isolant et communique avec le sol par une petite chaîne ; les deux timbres extrêmes sont suspendus par des fils métalliques. Deux petites balles métalliques pendent par des fils de soie entre le timbre du milieu et les deux autres. Dès que la machine est en activité, les timbres extrêmes s'électrisent, attirent les petites balles jusqu'au contact, puis les repoussent.

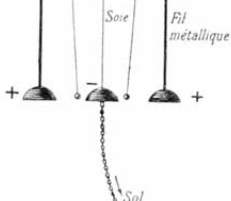


Fig. 243. — Expérience du carillon électrique.

attirent les petites balles jusqu'au contact, puis les repoussent.

Celles-ci arrivent sur le timbre du milieu, qui est chargé par influence d'électricité de nom contraire à celle des deux autres timbres ; elles sont repoussées après le contact, et ainsi de suite, de sorte que les trois timbres résonnent pendant tout le temps que la machine est en activité.

## RÉSUMÉ DU CHAPITRE XVI

Tout conducteur placé dans le voisinage d'un corps électrisé est lui-même électrisé. Le conducteur est l'induit, le corps électrisé, l'inducteur.

Si l'induit enveloppe complètement l'inducteur, la quantité d'électricité induite sur la face intérieure de l'induit est égale à celle de l'inducteur et de signe contraire (théorème de Faraday). Ce théorème se vérifie avec le cylindre de Faraday. On descend une sphère chargée positivement dans ce cylindre et l'on constate d'abord que

la surface intérieure est électrisée négativement, la surface extérieure positivement. Le cylindre cesse d'être électrisé si l'on retire la sphère ; donc les quantités d'électricité induites étaient équivalentes. En mettant la sphère en contact avec la surface intérieure du cylindre, les deux électricités en présence se neutralisent, et la quantité d'électricité induite sur la surface extérieure ne change pas. Enfin, si le cylindre est mis en communication avec le sol pendant que la sphère est à l'intérieur, l'électricité induite positive disparaît.

Si l'induit n'enveloppe pas l'inducteur, les deux quantités d'électricité induites sont encore de signes contraires et égales en valeur absolue, mais elles sont inférieures à la quantité inductrice. On étudie ce cas avec une sphère isolée chargée positivement et un cylindre isolé muni d'une série de doubles pendules. Le cylindre mis en présence de la sphère se divise en deux plages électrisées : une plage négative en regard de la sphère, une plage positive à l'extrémité opposée. Les deux plages sont séparées par une zone neutre vers le milieu, du côté de la sphère. Si l'on éloigne la sphère après avoir touché un instant le cylindre avec le doigt, le cylindre reste chargé d'électricité négative.

L'induction électrostatique joue un rôle important dans tous les phénomènes d'électricité statique.

L'électrophore se compose essentiellement d'un gâteau de résine et d'un disque conducteur à manche isolant. La résine, frottée avec une peau de chat, s'électrise négativement ; on applique dessus le disque, que l'on touche ensuite avec le doigt. En enlevant le doigt puis le disque, on emporte sur ce dernier une charge d'électricité positive utilisable.

L'électroscope à feuilles d'or permet de reconnaître si un corps est électrisé et quelle est la nature de son électricité. Un corps électrisé approché du bouton fait diverger les feuilles immédiatement. Pour reconnaître la nature de l'électricité, on charge l'électroscope par influence d'une électricité connue, puis on en approche de loin et lentement le corps à étudier. Si l'électricité du corps est de même signe que celle de l'électroscope, les feuilles divergent davantage ; si elle est de signe contraire, les feuilles se rapprochent.

L'attraction des corps légers est toujours précédée de l'influence. Dans le cas d'un pendule non isolé, l'attraction s'exerce entre deux électricités de noms contraires. Dans le cas d'un pendule isolé, l'attraction est la résultante d'une force attractive et d'une force répulsive et elle est moins vive que si le pendule n'est pas isolé.

## CHAPITRE XVII

## PREMIÈRES NOTIONS SUR LE POTENTIEL ET LA CAPACITÉ

**160. Considérations générales.** — La notion de potentiel en électricité est analogue à la notion de niveau des liquides en Hydrodynamique et de température en Chaleur. La définition précise du potentiel repose sur la considération du travail électrique; elle sera donnée dans le tome III. Nous nous bornerons pour le moment à étudier expérimentalement cette notion dans le cas le plus simple, celui d'un *conducteur électrisé, isolé et soustrait à toute influence électrique.*

**161. Définition expérimentale du potentiel.** — Considérons un conducteur électrisé non sphérique, comme un cylindre terminé par deux hémisphères (*fig. 244*), isolé et

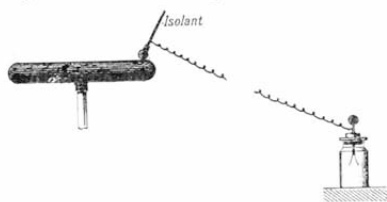


Fig. 244. — Expérience servant à définir le potentiel par l'électroscope.

soustrait à toute influence électrique. Nous savons que si on le touche successivement en ses différents points avec un même plan d'épreuve, les charges emportées

par le plan ne sont pas égales entre elles (149). Au contraire, mettons le conducteur électrisé en communication par un fil métallique fin avec un électroscope de petites dimensions, assez éloigné pour qu'il ne puisse éprouver au-



cune action d'influence; l'électroscope prend la même électricité que le conducteur et *l'écart des feuilles d'or reste constant quel que soit le point touché de la surface extérieure ou de la surface intérieure du conducteur*. Cet écart caractérise un état électrique commun au conducteur et à l'électroscope et que nous appellerons le *potentiel* du conducteur.

En répétant l'expérience précédente avec d'autres conducteurs électrisés de forme quelconque, isolés et soustraits à toute influence électrique, nous constaterions que l'écart des feuilles d'or, toujours constant pour tous les points d'un même conducteur, varie d'un conducteur à l'autre.

En résumé, tous les points d'un conducteur électrisé en équilibre électrique ont *le même potentiel*. Si l'on considère plusieurs conducteurs électrisés en équilibre électrique, le potentiel a une valeur déterminée pour chaque conducteur et variable d'un conducteur à l'autre.

REMARQUES. — 1° Le signe de l'électricité des feuilles d'or étant le même que celui de l'électricité du conducteur, le potentiel du conducteur est dit *positif* ou *négalif* suivant que la charge prise par l'électroscope est positive ou négative.

2° L'électroscope à feuilles d'or joue, dans ces expériences, un rôle analogue à celui d'un tube *indicateur de niveau* mis en communication latérale avec un réservoir contenant un liquide. De même que les dimensions de ce tube doivent être choisies de manière à ne pas abaisser sensiblement le niveau du liquide dans le réservoir, de même les dimensions de l'électroscope indicateur doivent être assez petites pour que sa charge ne diminue pas d'une façon appréciable le potentiel du conducteur.

**162. Conducteurs au même potentiel.** — *On dit que deux conducteurs électrisés ont le même potentiel lorsque, mis successivement en communication lointaine avec un*

*électroscope à l'état neutre, ils lui donnent des charges égales et de même signe.*

L'expérience montre que si l'on établit entre ces conducteurs une communication par un long fil, rien n'est changé dans leur état respectif après la communication : ils donnent encore la même indication à l'électroscope, et les densités en différents points, déterminées à l'aide du plan d'épreuve, n'ont pas varié.

**163. Conducteurs à des potentiels différents.** — *On dit que deux conducteurs ont des potentiels différents lorsqu'ils communiquent des charges différentes à un électroscope avec lequel ils sont mis séparément en communication lointaine.*

Si l'on fait communiquer par un fil long et fin deux conducteurs ayant des potentiels différents, de l'électricité positive passe par le fil du conducteur qui a le potentiel le plus élevé sur celui qui a le potentiel le moins élevé. Après la communication, les deux conducteurs ont un même potentiel, intermédiaire entre les potentiels primitifs, et ils donnent séparément la même indication à l'électroscope.

D'une manière générale, toutes les fois qu'un conducteur électrisé, mis en communication lointaine avec un autre conducteur, perd de l'électricité, c'est que son potentiel est plus élevé que celui de ce dernier ; s'il en gagne, c'est que son potentiel est moins élevé ; s'il n'y a pas transmission d'électricité positive de l'un à l'autre, c'est que les deux conducteurs ont le même potentiel. Cela est encore vrai si les deux conducteurs sont chargés d'électricité négative, car la perte d'une quantité d'électricité négative peut être considérée comme résultant d'un gain d'une quantité égale d'électricité positive.

REMARQUES. — 1° Lorsqu'un électroscope est mis en communication avec le sol, il prend le potentiel de la Terre. Comme à ce moment l'écart des feuilles d'or est nul, on prend comme *potentiel zéro* le potentiel de la Terre. Tout conducteur électrisé mis en communication avec le sol, prend le potentiel zéro ; si la Terre lui enlève de l'électricité positive, il avait un potentiel *positif* ; si tout se passe comme si la Terre lui fournissait de l'électricité positive, il avait un potentiel *négatif*. Les potentiels positifs se comptent au-dessus de zéro ; les négatifs au-dessous.

2° La transmission de l'électricité entre deux conducteurs par un fil long et fin correspond à la transmission d'un liquide entre deux vases communicants. Si l'on réunit par un tube de petites dimensions deux vases contenant un même liquide à des niveaux différents, le liquide s'écoule du vase où le niveau est le plus élevé vers le vase où le niveau est le moins élevé. L'écoulement est déterminé, non par la quantité de liquide contenu dans chaque vase, mais par la différence des niveaux ; il cesse quand les surfaces libres dans les deux vases se trouvent sur un même plan horizontal.

**164. Unité de potentiel.** — Si, dans l'étude expérimentale du potentiel d'un conducteur en équilibre électrique, on emploie comme indicateur de potentiel une sphère conductrice de 1<sup>cm</sup> de rayon, reliée au conducteur par un fil long et fin, elle prend toujours la même charge, quel que soit le point du conducteur avec lequel la communication a été établie. Par *définition*, la charge que prend cette sphère mesure le potentiel commun du conducteur et de la sphère. On appelle donc potentiel d'un conducteur *la charge (en unités électrostatiques) que prend une sphère de 1<sup>cm</sup> de rayon mise en communication lointaine avec ce conducteur.*

D'après cela, *l'unité de potentiel est le potentiel d'une sphère d'un centimètre de rayon, soustraite à toute influence électrique et chargée de l'unité de quantité*

*d'électricité.* Dans la pratique, on emploie une unité de potentiel qui est 300 fois plus petite que celle-ci : c'est le *volt* (du nom du physicien Volta). Le volt correspond au coulomb, c'est-à-dire que si, dans les calculs, on évalue les quantités en coulombs, il faut évaluer les potentiels en volts.

**Mesure des potentiels.** — Les phénomènes électriques qui peuvent se produire entre deux conducteurs électrisés ne dépendent pas de la valeur absolue de leurs potentiels, mais seulement de la différence de ces potentiels. Cette différence est donc seule intéressante à connaître.

Un électroscope gradué de petites dimensions, mis successivement en communication lointaine avec deux conducteurs électrisés, ferait connaître le rapport de leurs potentiels par le rapport des écarts des feuilles d'or. Dans la pratique, on mesure les potentiels ou plutôt les différences de potentiels avec des instruments ayant une sensibilité beaucoup plus grande. Ces instruments, appelés *électromètres*, seront étudiés dans le tome III.

**165. Capacité électrique.** — *Lorsqu'un conducteur électrisé, isolé, est soustrait à toute influence électrique, son potentiel est proportionnel à la quantité d'électricité qu'il contient.*

Reprenons l'expérience qui nous a servi à définir le potentiel (161). Si nous donnons successivement au conducteur électrisé des charges double, triple, ... de la charge primitive, nous constaterons que les écarts successifs des feuilles d'or deviennent double, triple, ... de l'écart primitif. Le potentiel du conducteur prend donc des valeurs proportionnelles aux charges, et le quotient d'une charge déterminée  $Q$  par le potentiel  $V$  correspondant est *constant* : on l'appelle la *capacité électrique* du conducteur. En désignant cette capacité par  $C$ , on a

$$C = \frac{Q}{V}.$$

D'après cette formule, pour un potentiel  $V$  égal à l'unité, on a  $C = Q$ ; à un potentiel  $2V$  correspond une charge  $Q + Q$ ; à un potentiel  $3V$ , une charge

$$Q + Q + Q,$$

etc.

Puisque  $C = Q$  lorsque  $V = 1$ , on peut dire: *la capacité électrique d'un conducteur soustrait à toute influence électrique est la charge qu'il faut communiquer à ce conducteur pour élever son potentiel d'une unité*. Ce coefficient caractérise un conducteur de dimensions et de forme déterminées, soustrait à toute influence électrique.

REMARQUE. — Ici encore on trouve des analogies avec l'hydrodynamique. Considérons un cylindre de section  $S$  contenant de l'eau dont la hauteur est  $h$ ; la masse  $M$  de l'eau est égale à  $Sh$ . La formule  $M = Sh$ , comparée à  $Q = CV$ , montre que la section du cylindre joue un rôle analogue à celui de la capacité électrique. En mettant cette formule sous la forme  $h = \frac{M}{S}$ , on voit que la hauteur de l'eau est en raison inverse de la section et augmente proportionnellement à la masse du liquide; de même le potentiel d'un conducteur est en raison inverse de la capacité et augmente proportionnellement à la charge du conducteur.

**166. Unité de capacité.** — *L'unité électrostatique de capacité électrique est la capacité d'une sphère de 1<sup>m</sup> de rayon, soustraite à toute influence électrique*. Cette définition résulte de celle de l'unité de potentiel.

Dans la pratique, on emploie une unité de capacité correspondant au coulomb et au volt; elle a reçu le nom de *farad* (du nom du physicien Faraday). D'après la formule  $C = \frac{Q}{V}$  (farad =  $\frac{\text{coulomb}}{\text{volt}}$ ), le farad est la capacité d'un conducteur qui, chargé par un coulomb, aurait un potentiel d'un volt.

Le farad vaut  $\frac{3 \times 10^9}{4} = 3^2 \times 10^{11}$  unités électrosta-

tiques de capacité. C'est une capacité extrêmement considérable; aussi évalue-t-on ordinairement les capacités en *microfarads*, c'est-à-dire en millièmes de farad. (1 microfarad vaut donc  $3^2 \times 10^5$  unités électrostatiques de capacité).

**167. Capacité et potentiel d'une sphère.** — L'expérience montre que, si l'on veut qu'une sphère conductrice isolée et soustraite à toute influence électrique ait un potentiel égal à une unité électrostatique, il faut lui donner autant d'unités électrostatiques de quantité que son rayon vaut de centimètres. *La capacité d'une sphère, dans ces conditions, est donc mesurée par son rayon, exprimé en centimètres.*

En remplaçant C par R dans la formule  $Q = CV$ , il vient  $V = \frac{Q}{R}$ , c'est-à-dire que *le potentiel d'une sphère électrisée isolée et soustraite à toute influence électrique, est le quotient de sa charge par son rayon.*

**168. Partage de l'électricité entre deux conducteurs électrisés mis en communication lointaine.** — Considérons deux conducteurs électrisés suffisamment éloignés l'un de l'autre pour ne pas exercer d'influence mutuelle. Appelons C et C' leurs capacités, Q et Q' leurs charges, V et V' leurs potentiels; les charges respectives sont exprimées par  $Q = CV$  et  $Q' = C'V'$ .

Si on les réunit par un fil fin de capacité négligeable, le système constitué par les deux conducteurs et le fil ne forme plus qu'un seul conducteur de capacité  $C + C'$  et ayant une charge  $Q + Q'$ ; le potentiel prend en tous les points de ce système une nouvelle valeur  $V_1$  intermédiaire entre V et V'.

En exprimant que la quantité totale d'électricité n'a pas varié, on a

$$CV + C'V' = CV_1 + C'V_1,$$

d'où 
$$V_1 = \frac{CV + C'V'}{C + C'}$$
,

équation analogue à celle que fournit la méthode des mélanges pour la détermination des chaleurs spécifiques.

Si l'un des conducteurs était primitivement à l'état neutre, la valeur de  $V_1$  se réduirait à  $\frac{CV}{C + C'}$ ; et si enfin les deux conducteurs étaient primitivement au même potentiel  $V$ , on aurait  $V_1 = V$ , et chaque conducteur conserverait sa charge initiale après la communication.

**169. Premières notions sur l'énergie électrique.** — De même qu'une masse d'eau peut donner du travail en passant d'un niveau plus élevé à un niveau moins élevé, l'électricité positive peut donner du travail en passant d'un potentiel plus élevé à un potentiel moins élevé. C'est ainsi qu'un conducteur électrisé que l'on met en communication avec le sol, par exemple, produit en se déchargeant une dépense de travail ou d'énergie qui se manifeste par des effets variés : physiologiques, calorifiques, mécaniques, etc.

Considérons un vase contenant une masse  $m$  d'eau dont le niveau est à une hauteur  $h$  et supposons que l'on fasse écouler le liquide à la partie inférieure. Le travail qu'il produit ne dépend que du poids de l'eau qui s'écoule et de la hauteur de la chute ; d'après le principe des forces vives, il a pour valeur  $\frac{1}{2} Mgh$ , car si les premières couches tombent d'une hauteur  $h$ , les dernières tombent d'une hauteur voisine de zéro.

Pour un conducteur électrisé que l'on met en communication avec le sol, le travail produit par la décharge ne dépend également que de la charge  $Q$  du conducteur et de son potentiel  $V$ . Comme le potentiel va en décroissant pendant la décharge, le travail est le même que si la charge  $Q$  était tombée d'un potentiel moyen entre le potentiel  $V$  du

conducteur et le potentiel 0 du sol. En représentant par  $W$  ce travail, on a

$$W = \frac{1}{2} QV.$$

$Q$  étant exprimé en coulombs et  $V$  en volts, le travail sera donné en unités pratiques, c'est-à-dire en *joules* (le joule vaut  $10^7$  ergs).

Comme  $Q = CV$ , le travail électrique a aussi pour expression

$$W = \frac{1}{2} CV^2.$$

### RÉSUMÉ DU CHAPITRE XVII

Lorsqu'un conducteur électrisé, isolé et soustrait à toute influence électrique, est mis en communication, par un fil long et fin, avec un électroscope à feuilles d'or, les feuilles prennent la même électricité que le conducteur et leur écart reste constant quel que soit le point touché de la surface du conducteur. Cet écart caractérise un état électrique du conducteur que l'on appelle son *potentiel*. Le potentiel est le même pour tous les points d'un même conducteur, mais il varie d'un conducteur à l'autre. Il joue un rôle analogue à celui du niveau des liquides en Hydrodynamique.

Deux conducteurs sont dits au même potentiel ou à des potentiels différents suivant qu'ils donnent le même écart ou des écarts différents aux feuilles d'un électroscope avec lequel on les met séparément en communication lointaine. Si l'on met en communication lointaine deux conducteurs dont les potentiels sont différents, de l'électricité positive passe du conducteur qui a le potentiel le plus élevé sur le conducteur qui a le potentiel le moins élevé et les deux conducteurs ont finalement le même potentiel.

L'unité électrostatique de potentiel est le potentiel d'une sphère de  $1\text{cm}$  de rayon, soustraite à toute influence électrique, et chargée de l'unité de quantité d'électricité. Dans la pratique, on emploie le *volt* ( $\frac{1}{300}$  de l'unité électrostatique de potentiel).

La *capacité* électrique d'un conducteur est la charge qu'il faut communiquer à ce conducteur, soustrait à toute influence, pour élever son potentiel d'une unité. L'unité électrostatique de capacité est la capacité d'une sphère de  $1\text{cm}$  de rayon. Dans la pratique on emploie le *farad*, capacité d'un conducteur qui, chargé par un coulomb, aurait un potentiel d'un volt.

La capacité d'une sphère, soustraite à toute influence électrique, est égale à son rayon exprimé en centimètres. Le potentiel d'une



sphère dans les mêmes conditions est le quotient de sa charge par son rayon.

L'électricité positive peut donner du travail en passant d'un potentiel plus élevé à un potentiel moins élevé. Ce travail se manifeste par des effets variés. Il ne dépend que de la quantité d'électricité qui tombe et de la différence des potentiels, et il est proportionnel au produit de ces deux facteurs.

### EXERCICES SUR LE CHAPITRE XVII

47. Une sphère conductrice de  $10^{\text{cm}}$  de rayon a un potentiel  $+5$ ; une deuxième sphère de  $15^{\text{cm}}$  de rayon a un potentiel  $-10$ . On les met en communication lointaine. Quel est le potentiel commun après la communication ?

48. Calculer en farads la capacité du globe terrestre. Rayon du globe terrestre  $6363^{\text{km}}$ .

49. La capacité d'une sphère est de 1 farad ; trouver son rayon. Trouver aussi le rapport entre son volume et celui du globe terrestre.

50. Quelle est la densité électrique à la surface d'une sphère de  $5^{\text{cm}}$  de rayon soustraite à toute influence électrique ? Cette sphère a un potentiel  $V$  égal à 18850 volts.

---

## CHAPITRE XVIII

### CONDENSATION ÉLECTRIQUE

---

**170. Variation de la capacité d'un conducteur.** — Pour un conducteur de forme et de dimensions déterminées, la capacité électrique n'est une constante que s'il est soustrait à toute influence électrique ; elle varie lorsqu'il y a dans le voisinage d'autres conducteurs électrisés ou à l'état neutre, isolés ou non, simplement soumis à l'influence.

Considérons un conducteur électrisé S (*fig. 245*), ayant une charge positive  $q$  et une capacité  $c$ , et mis en communication par un long fil avec un électroscope de petites dimensions ; l'écart  $\alpha$  des feuilles d'or mesure le potentiel  $V$  du conducteur, et l'on a  $q = cV$ . Approchons de S un conducteur isolé à l'état neutre, par exemple le cylindre d'Æpinus (154) ; l'écart  $\alpha$  diminue, et d'autant plus que la distance des deux conducteurs est moindre. Ainsi le potentiel de S est d'autant moins élevé, pour la même charge  $q$ ,

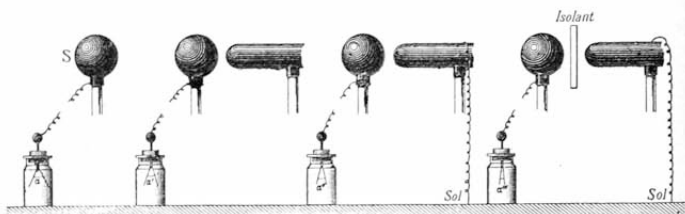


Fig. 245. — Variation de la capacité d'un conducteur.

que le conducteur influencé est plus voisin de lui : on en conclut que sa capacité augmente. En effet, d'après la formule  $q = cV$ , si  $V$  devient deux fois plus petit, par exemple, sa capacité devient deux fois plus grande puisque la charge  $q$  reste invariable, et il faudrait une charge double pour rendre à S son potentiel primitif.

Laissons maintenant le cylindre en place et mettons-le en communication avec le sol : l'écart  $\alpha'$  des feuilles d'or diminue de nouveau. Cette diminution est plus sensible encore à égalité de distance si l'on interpose entre les deux conducteurs un isolant solide, une lame de verre par exemple.

En résumé, la capacité électrique d'un conducteur augmente lorsqu'on en approche un autre conducteur, surtout si ce conducteur est en communication avec le sol ; l'aug-

mentation est plus grande lorsque l'isolant interposé est un solide mauvais conducteur que lorsqu'il est de l'air.

**171. Condensateurs en général.** — On donne le nom de condensateur à un système de deux conducteurs dont la disposition permet d'accumuler sur l'un d'eux une quantité d'électricité plus grande que lorsque ce même conducteur est isolé.

Les condensateurs sont ordinairement constitués par deux surfaces conductrices parallèles ou *armatures*, séparées par une mince couche isolante (lame de verre, feuille de mica ou de papier paraffiné). L'une des armatures est mise en communication avec une source d'électricité de potentiel constant; on l'appelle *collecteur* à cause de sa fonction. L'autre armature, appelée *condenseur*, est mise en communication avec le sol.

**172. Expérience fondamentale.** — Pour bien suivre les diverses phases que présente le phénomène de la condensation nous nous servirons du *condensateur à plateaux*

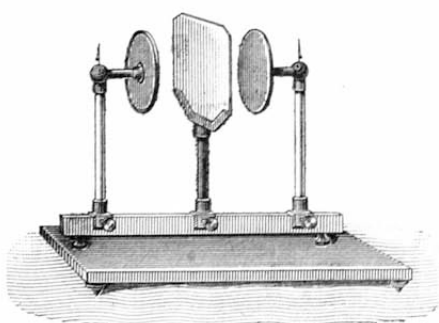


Fig. 246. — Condensateur à plateaux d'Æpinus.

d'*Æpinus*, devenu classique

Il se compose de deux plateaux de laiton (fig. 246), munis chacun d'un petit pendule à fil conducteur, et isolés sur deux colonnes

de verre dont les pieds peuvent se déplacer à volonté le long d'une règle horizontale. Une lame de verre, supportée par la même règle, sépare les deux plateaux.

1° Le plateau B étant placé le plus loin possible du plateau A (*fig. 217, I*: le plateau B n'y est pas figuré), mettons ce dernier en communication par une longue tige métallique avec le pôle positif d'une machine en activité dont le pôle négatif est mis au sol.

L'équilibre s'établit lorsque le plateau A a pris le potentiel  $V$  du pôle positif; le pendule fixé à ce plateau diverge alors d'un angle  $\alpha$ , et l'on a  $q = cV$ ,  $q$  dési-

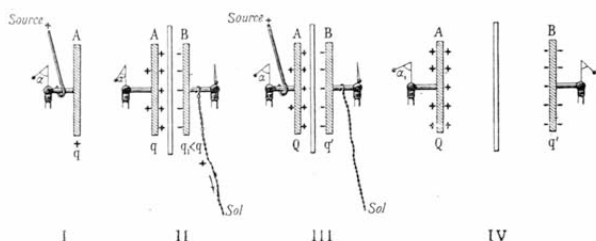


Fig. 217. — Diverses phases de la condensation électrique.

gnant la charge du plateau A,  $c$  sa capacité lorsqu'il est ainsi soustrait à toute influence.

2° Supprimons la communication du plateau A avec la machine et approchons le plateau B, relié au sol par une chaîne métallique (*fig. II*). L'équilibre établi précédemment ne peut plus subsister: le plateau B se charge par influence d'électricité négative; en même temps, le potentiel du plateau A diminue (170), et l'écart de son pendule devient  $\alpha' < \alpha$ . En appelant C la nouvelle capacité du plateau A,  $v$  son nouveau potentiel, on a  $q = Cv$ , puisque la charge de ce plateau n'a pas varié.

3° Si le plateau A est de nouveau mis en communication avec le pôle positif de la machine (*fig. III*), il reçoit une nouvelle quantité d'électricité et reprend le potentiel  $V$  de ce pôle positif; la divergence du pendule rede-

vient donc  $\alpha$ , comme en l'absence du plateau B. La nouvelle charge Q a pour valeur  $Q = CV$ .

On dit alors que le condensateur est *chargé*. Cependant, le pendule du plateau B ne diverge pas. Cela tient à ce que le collecteur n'étant pas complètement enveloppé par le condensateur, la quantité  $q'$  d'électricité induite sur ce dernier est inférieure à Q. La charge  $q'$  du plateau B et une partie de la charge Q du plateau A égale à  $q'$  sont *dissimulées* à l'observateur par leur attraction réciproque. La différence  $Q - q'$  représente de l'*électricité libre*; c'est cette électricité qui agit à l'extérieur du plateau A et repousse le pendule correspondant.

4° Supprimons maintenant les communications, d'abord avec la machine, puis avec le sol, et écartons les deux plateaux (*fig. IV*), de manière à supprimer entre eux toute influence : une charge négative considérable se distribue sur les deux faces du plateau B, et son pendule diverge fortement. Le plateau A reprend sa capacité primitive  $c$  et son pendule prend un écart  $\alpha_1 > \alpha$ . On voit en effet que son nouveau potentiel doit avoir une valeur  $V'$  supérieure à  $V$  pour satisfaire à la relation  $Q = cV'$ .

**173. Force condensante.** — On appelle *force condensante* ou *pouvoir condensant* d'un condensateur le rapport  $\frac{Q}{q}$  des charges qu'il faut donner au collecteur pour l'élever au même potentiel quand il fait partie du condensateur et quand il est isolé. On a dans le premier cas  $Q = CV$  et dans le second  $q = cV$ . Par suite

$$\frac{Q}{q} = \frac{C}{c}.$$

La force condensante est donc aussi égale au rapport de la capacité C du collecteur lorsqu'il fait partie du condensateur, à la capacité  $c$  de ce même collecteur pris isolément.

Le calcul de la capacité  $C$  est facile dans le cas d'un condensateur fermé, constitué par deux sphères concentriques séparées par une faible épaisseur d'air. On trouve alors

$C = \frac{S}{4\pi e}$ , ce qui montre que la capacité du collecteur est proportionnelle à sa surface  $S$  et en raison inverse de l'épaisseur  $e$  de la lame d'air.

Cette capacité varie en outre avec la nature de l'isolant ou diélectrique interposé. Le rapport de la capacité d'un condensateur construit avec une lame d'un isolant solide à la capacité d'un condensateur à lame d'air de forme et de dimensions identiques s'appelle la *capacité diélectrique* ou la *capacité inductive spécifique* de l'isolant; ce pouvoir est de 2 environ pour le verre, le soufre et la paraffine, de 5 pour le mica.

D'après cela, la capacité du collecteur d'un condensateur sphérique à lame isolante de capacité diélectrique  $k$  a pour valeur  $\frac{kS}{4\pi e}$ . Ce résultat est sensiblement exact pour tous les condensateurs dont les armatures sont parallèles et de dimensions très grandes par rapport à l'épaisseur de la lame isolante.

**174. Décharge d'un condensateur.** — On peut décharger un condensateur de deux manières, soit instantanément, soit lentement.

**Décharge instantanée.** — La décharge instantanée se fait en établissant une communication conductrice entre les deux armatures. Si l'on touche d'une main l'une des armatures et de l'autre main la seconde armature, la réunion des deux électricités contraires à travers les bras et le corps de l'opérateur lui fait sentir une commotion plus ou moins violente.

Pour éviter la décharge à travers le corps, on se sert de l'*excitateur universel* (fig. 248). C'est une sorte de compas en laiton à deux branches terminées par deux boules et munies de deux poignées isolantes. On met l'une des

boules en contact avec le condensateur et l'on approche lentement l'autre boule du collecteur. Un peu avant que la communication soit établie, il jaillit une étincelle plus ou moins forte qui accompagne l'égalisation de potentiel des deux armatures.

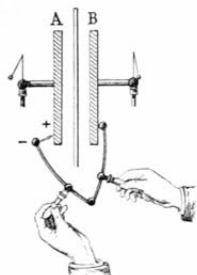


Fig. 248. — Décharge instantanée d'un condensateur à plateaux.

DÉCHARGES RÉSIDUELLES. — Un condensateur dans lequel le corps isolant est un corps solide n'est pas complètement déchargé après cette première étincelle. Si l'on réunit de nouveau les armatures à des intervalles de quelques minutes, il se produit une deuxième, une troisième, ... étincelle, de plus en plus faibles. Ces décharges secondaires s'appellent *décharges résiduelles*. Elles s'expliquent, comme nous le verrons plus loin, par la pénétration partielle des deux électricités dans la lame isolante qui sépare les armatures.

Décharge lente. — Elle se fait par contacts successifs des deux armatures, en commençant par le collecteur. Un condensateur d'Épinus, par exemple, ayant été chargé et les communications avec la machine et avec le sol ayant été rompues, on approche le doigt du plateau A (fig. 249);

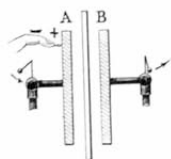


Fig. 249. — Décharge lente d'un condensateur à plateaux.

l'électricité libre de ce plateau s'écoule, on obtient une petite étincelle, et le pendule du plateau B s'élève, car la partie de l'électricité négative qui était neutralisée par l'électricité écoulée devient libre à son tour. Ce pendule retombe quand on touche le plateau B; tandis que celui du plateau A diverge. En touchant alternativement A et B, on obtient des étincelles de plus

en plus faibles et on finit par décharger complètement le condensateur.

#### APPLICATIONS DE LA CONDENSATION

**175. Bouteille de Leyde.** — La bouteille de Leyde est la forme la plus ancienne et en même temps la plus usitée des condensateurs. Elle est ainsi appelée du nom de la ville où elle fut inventée, en 1746, par Cunéus.

C'est un flacon cylindrique en verre mince, recouvert extérieurement d'une feuille d'étain jusqu'à une certaine distance du goulot (*fig. 250*). L'intérieur est rempli de feuilles de clinquant ou d'or battu, dans la masse desquelles plonge une tige de laiton qui passe à frottement

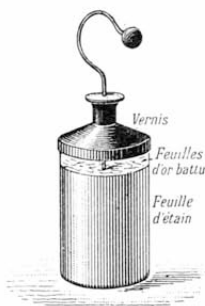


Fig. 250. — Bouteille de Leyde.

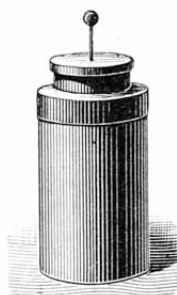


Fig. 251. — Jarre.

dur dans le bouchon du flacon. La partie de cette tige située hors du flacon est recourbée et se termine par un bouton. Enfin l'intervalle isolant paissé entre l'armature externe et le goulot est ordinairement recouvert d'un vernis à la gomme laque ou à la cire rouge.

On construit aussi des bouteilles de Leyde de grandes dimensions et à large ouverture (*fig. 251*) dans lesquelles l'armature intérieure est constituée par une feuille d'étain collée sur la face interne. La tige centrale est droite et se termine inférieurement par une petite chaîne métallique



qui repose sur cette feuille d'étain. Les bouteilles ainsi construites s'appellent des *jarres*; on les adjoint souvent aux machines électriques pour en augmenter la capacité.

**Charge et décharge d'une bouteille de Leyde.** — Pour charger une bouteille de Leyde, on prend ordinairement la panse à la main, ce qui met l'armature extérieure en communication avec le sol, et l'on présente le bouton au pôle positif d'une machine électrique en activité dont le pôle négatif est au sol. L'armature intérieure prend une charge positive  $Q = CV$ ,  $C$  désignant sa capacité,  $V$  le potentiel du pôle positif de la machine; l'armature extérieure se charge d'une quantité *presque* égale d'électricité négative, parce que la bouteille de Leyde diffère peu d'un condensateur fermé.

La décharge se fait instantanément ou par contacts successifs. Après la décharge instantanée, on peut obtenir plusieurs décharges résiduelles sans communication nouvelle avec la machine électrique. Pour montrer que les électricités ne restent pas sur les armatures mais qu'elles semblent pénétrer les deux faces de la partie isolante, on



Fig. 252.— Bouteille de Leyde décomposable.

emploie une *bouteille de Leyde décomposable* (fig. 252). La partie isolante est un vase conique en verre trempé qui peut se séparer facilement des

armatures. Après avoir chargé la bouteille on l'isole sur un gâteau de résine ou de paraffine, et avec la main on enlève successivement l'armature intérieure, le vase de verre et l'armature extérieure. Les deux armatures ont été évidemment déchargées par le contact. Cependant

si on reconstitue la bouteille, on obtient avec l'excitateur une étincelle presque aussi forte que si la bouteille n'avait pas été démontée.

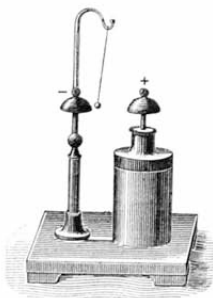


Fig. 253. — Bouteille de Leyde à carillon.

La décharge lente s'effectue d'elle-même à l'aide de certaines dispositions dont la plus curieuse est la *bouteille à carillon* (fig. 253). Une petite balle métallique, isolée par un fil de soie, peut osciller entre deux timbres communiquant avec chacune des armatures d'une bouteille de Leyde; elle est attirée successivement par les deux timbres et porte de l'un à l'autre l'électricité disponible après chaque contact. On obtient ainsi un carillon continu jusqu'à décharge à peu près complète de la bouteille.

**Association des bouteilles de Leyde.** — Quand on veut obtenir un condensateur d'une grande capacité, on réunit

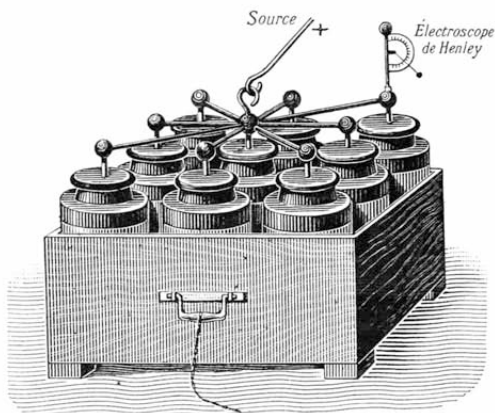


Fig. 254. — Batterie de jarres en surface.

plusieurs bouteilles de Leyde que l'on groupe de manière à former une *batterie en surface*.

On dispose dans une caisse de bois un certain nombre de jarres dont les armatures intérieures communiquent entre elles au moyen de tiges métalliques horizontales convergentes (*fig. 254*). Les armatures extérieures se trouvent en contact avec une feuille d'étain qui revêt le fond de la caisse et se prolonge latéralement jusqu'à la rencontre de deux poignées métalliques fixées aux parois.

Pour charger une batterie en surface, on relie l'anneau qui surmonte les tiges horizontales à l'un des pôles d'une machine électrique dont l'autre pôle est mis au sol; les armatures extérieures sont également mises au sol par une chaîne fixée à l'une des poignées. On peut aussi mettre en communication l'un des pôles de la machine avec les armatures intérieures et l'autre pôle avec les armatures extérieures. On est renseigné à chaque instant sur la charge que possède la batterie par l'électroscope de Henley (*fig. 254*). C'est un pendule dont la tige conductrice est articulée à l'extrémité d'une tige vissée sur l'armature intérieure de l'une des jarres. Le pendule étant chargé de la même électricité que la tige vissée, subit une répulsion variable avec la charge de la batterie, et cette répulsion est mesurée sur un cadran d'ivoire par la tige qui supporte le pendule.



Fig. 255. — Batterie en cascade.

Le nombre de jarres qui composent une batterie est en général de 9. La batterie équivaut à une jarre unique dont la surface d'armatures serait égale à la somme des armatures de toutes les jarres; sa capacité est la somme des capacités des jarres.

REMARQUE. — Dans certains cas, notamment quand l'isolant est très mince, on doit grouper les bouteilles de Leyde, de manière à former une *batterie en cascade* (*fig. 255*). L'armature extérieure de chaque bouteille communique avec l'armature intérieure de la suivante. L'armature intérieure de la première bouteille est reliée au pôle positif de potentiel  $V$ , l'armature extérieure de la dernière est mise en communication

avec le sol. On démontre que, dans l'association en cascade, la capacité du système formé par  $n$  bouteilles identiques est la  $n^{\text{ième}}$  partie de la capacité d'une seule bouteille. En revanche, la différence de potentiel sur chaque bouteille est la  $n^{\text{ième}}$  partie de celle des armatures extrêmes, c'est-à-dire que la différence de potentiel  $V$  est répartie sur  $n$  épaisseurs d'isolants, ce qui permet de faire supporter à l'association une différence de potentiel  $n$  fois plus forte qu'à une batterie en surface.

**176. Condensateurs à feuilles alternantes.** — Ce sont des condensateurs dont la disposition permet d'obtenir une très grande capacité sous un petit volume. Ils sont formés de feuilles d'étain alternant avec des feuilles de papier paraffiné ou de mica



Fig. 256. — Condensateur à feuilles alternantes.  
(Disposition théorique.)

(fig. 256). Toutes les feuilles d'ordre impair par exemple sont en étain et communiquent ensemble d'un côté ; elles constituent le

collecteur ; les feuilles d'ordre pair sont réunies de l'autre côté et constituent le condensateur.

Les condensateurs à feuilles alternantes sont employés notamment dans les bobines de Ruhmkorff. Dans ceux de ces condensateurs qui doivent servir de *condensateurs étalons* pour la mesure des capacités, on règle le nombre des feuilles d'étain de manière que la capacité du collecteur soit de 1 microfarad ou d'un sous-multiple.

**177. Électroscope condensateur.** — L'électroscope condensateur, imaginé par Volta, permet de mettre en évidence des charges avec lesquelles l'électroscope ordinaire ne donnerait aucune indication.

C'est un électroscope à feuilles d'or dont la boule est remplacée par un plateau métallique (fig. 257), recouvert sur sa face supérieure d'une couche de vernis à la gomme laque ; un second plateau recouvert de vernis sur sa face inférieure et muni d'un manche isolant s'applique sur le

premier. Les deux plateaux forment un condensateur, dont la partie isolante est constituée par les deux couches de vernis.



Fig. 257. — Électroscope condensateur.

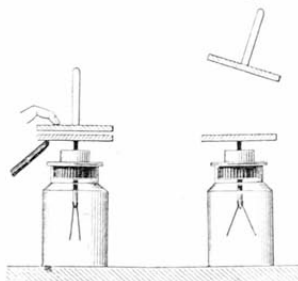


Fig. 258. — Emploi de l'électroscope condensateur.

Le corps électrisé à étudier étant mis en communication avec le plateau inférieur (*fig.* 258), on touche le plateau supérieur avec le doigt. Il y a condensation, mais les feuilles d'or ne divergent pas, parce que le potentiel du plateau inférieur est trop faible; la charge que prend ce plateau est  $Q = CV$ ,  $C$  désignant sa capacité quand il fait ainsi partie du condensateur. On supprime alors les communications et on enlève le plateau supérieur : la capacité du plateau inférieur est réduite dans une proportion considérable; sa charge est restée  $Q$ , mais son potentiel prend une valeur  $V'$  telle que l'on ait  $Q = cV'$ ,  $c$  désignant la capacité du plateau inférieur quand il est soustrait à l'influence du plateau supérieur. On a donc  $CV = cV'$ , d'où  $\frac{V'}{V} = \frac{C}{c}$ . Comme la force condensante  $\frac{C}{c}$  est considérable à cause de la faible épaisseur du vernis isolant, le nouveau potentiel  $V'$  peut être suffisant pour faire diverger les feuilles d'or.

REMARQUE. — Comme les électricités contraires pénètrent en partie dans la lame isolante (175), il est nécessaire que cette lame soit constituée par deux couches de vernis, afin

que chaque plateau emporte la charge absorbée par la couche de vernis adhérente.

### RÉSUMÉ DU CHAPITRE XVIII

La capacité d'un conducteur n'est une constante que s'il est isolé et soustrait à toute influence électrique ; elle augmente lorsqu'on approche un autre conducteur mis en communication avec le sol ; elle augmente encore si l'on interpose entre les deux conducteurs un isolant solide.

Un *condensateur* est constitué par deux conducteurs séparés par un isolant solide ; le premier conducteur (*collecteur*) est mis en communication avec une source électrique ; le second (*condenseur*) communique avec le sol. Un tel système permet d'accumuler sur le collecteur une charge plus grande que lorsque ce conducteur est isolé.

Pour étudier le phénomène de la condensation on se sert ordinairement du *condensateur à plateaux d'Æpinus*. Le plateau condenseur étant d'abord éloigné, on fait communiquer le plateau collecteur avec une source de potentiel  $V$ . Le collecteur prend une charge  $q = cV$ . On supprime la communication et on approche le condenseur ; la capacité du collecteur augmente et sa charge  $q$  a pour valeur  $q = Cv$  ; le condenseur se charge par influence d'électricité négative. Le potentiel du collecteur étant devenu plus petit, si l'on remet ce plateau en communication avec la source, sa charge augmente et devient  $Q = CV$  ; elle est donc plus grande que lorsqu'il est isolé. Le rapport  $\frac{Q}{q} = \frac{C}{c}$  s'appelle la *force condensante*.

On peut décharger un condensateur soit *instantanément*, en touchant à la fois les deux armatures, soit *lentement*, par contacts successifs des deux armatures, en commençant par le collecteur.

La bouteille de Leyde est un condensateur dans lequel la partie isolante est constituée par un flacon de verre, le condenseur par une feuille d'étain collée extérieurement, et le collecteur par des feuilles d'or et une tige métallique terminée par un bouton. Dans les jarres, les feuilles d'or sont remplacées par une feuille d'étain collée intérieurement. Après avoir déchargé instantanément une bouteille de Leyde, on peut obtenir des décharges résiduelles comme avec les autres condensateurs. Ces décharges résultent de la pénétration partielle des deux électricités dans la partie isolante (bouteille de Leyde décomposable).

Quand on veut obtenir un condensateur de grande capacité, on associe des bouteilles de Leyde ou des jarres en faisant communiquer entre elles d'une part toutes les armatures intérieures, d'autre part toutes les armatures extérieures (batterie en surface).

L'électroscope condensateur est employé pour déceler des charges

très faibles. Le corps à étudier étant mis en contact avec le plateau inférieur, on touche le plateau supérieur, puis on supprime successivement ces deux communications et on enlève le plateau supérieur. Comme ce dernier ne fait plus alors partie du condensateur, sa capacité diminue ; son potentiel augmente et peut être suffisant pour produire la divergence des feuilles d'or.

### EXERCICES SUR LE CHAPITRE XVIII

51. Quelle devrait être la surface d'un condensateur à air dans lequel la distance entre les armatures serait de  $25^{\text{cm}}$ , pour que la capacité du collecteur soit de 1 microfarad ?

52. Déterminer la charge que prend un condensateur d'un mètre carré de surface, dont les armatures sont séparées par une couche d'air de  $2^{\text{mm}}$  d'épaisseur, sachant que le collecteur est en communication avec un conducteur au potentiel constant  $\phi$ , tandis que le condensateur est relié au sol.

53. Une batterie de 9 jarres identiques ayant chacune une surface de  $250^{\text{cm}^2}$ , et dont le verre interposé, épais de  $2^{\text{mm}},5$ , a une capacité diélectrique 2, est chargée à refus par une machine dont le potentiel est 500, l'armature extérieure étant à la terre.

Quelle est en unités électrostatiques de quantité et en coulombs la charge totale acquise par les armatures intérieures ?

54. Quel est le rapport des capacités de deux batteries dont les surfaces sont respectivement  $s$  et  $4s$ , et dont les lames isolantes, de même nature, ont pour épaisseurs  $e$  et  $8e$  ?

---

## CHAPITRE XIX

### MACHINES ÉLECTROSTATIQUES

---

178. Définition et classification. — On appelle machines électrostatiques des sources d'électricité dont le fonctionnement repose sur l'électrisation par frottement ou sur les phénomènes d'influence. Dans l'un comme dans l'autre cas, les deux électricités se produisent toujours simultanément et en

quantités égales : elles se portent dans deux régions distinctes que l'on appelle les *pôles* de la machine. Le *débit* des machines électrostatiques, c'est-à-dire la quantité d'électricité qu'elles peuvent fournir en une seconde, est relativement faible ; en revanche, elles sont capables d'établir entre leurs pôles une *différence de potentiel* considérable.

Les machines électrostatiques se divisent en deux catégories : les machines à *frottement* et les machines à *influence*.

Dans les machines à frottement, les électricités sont produites par le frottement réciproque d'organes mauvais conducteurs. Les machines de Ramsden, de Nairne, de Van Marum, d'Armstrong, appartiennent à cette catégorie ; elles ne sont plus guère employées aujourd'hui, parce qu'elles sont trop encombrantes eu égard à leur faible puissance.

Dans les machines à influence, les électricités résultent de l'induction électrostatique d'organes mauvais conducteurs qui se déplacent devant des organes bons conducteurs fixes. Les principales sont celles de Carré, de Holtz, de Voss et de Wimshurst.

Que la machine soit à frottement ou à influence, le développement des électricités exige une dépense successive de travail, consommé pour produire le mouvement de la machine.

Nous décrirons comme type des machines à frottement la *machine de Ramsden*, qui est devenue classique, et comme type des machines à influence la *machine de Wimshurst*, qui est de beaucoup la plus employée.

479. Machine de Ramsden. — La machine de Ramsden,



appelée aussi machine électrique ordinaire, se compose d'un plateau circulaire de verre (*fig. 259*) que l'on fait tourner à l'aide d'une manivelle entre deux paires de coussins ou *frottoirs*, fixés sur deux montants de bois. Les coussins sont en soie ou en cuir rembourré; ils sont main-

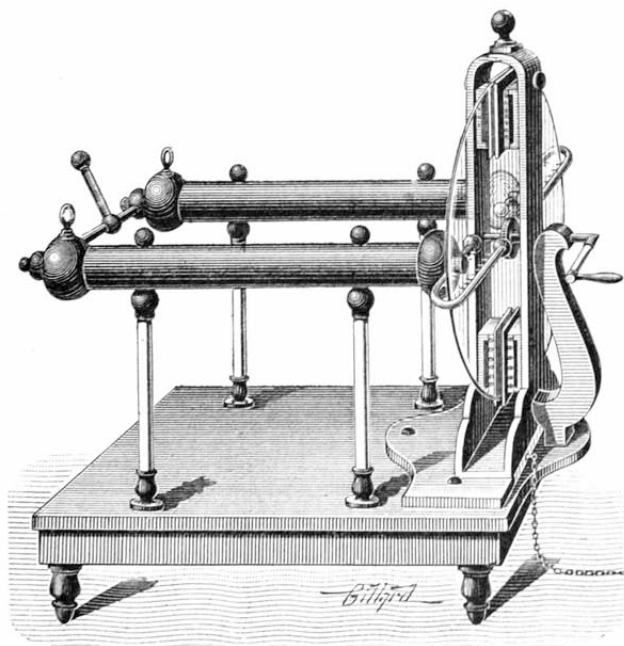


Fig. 259. — Machine de Ramsden.

tenus au contact du plateau par des ressorts et sont mis en communication avec le sol. Aux extrémités du diamètre horizontal se trouvent deux conducteurs en fer à cheval, appelés *peignes* ou *mâchoires*, qui embrassent le plateau de verre et qui sont munis de pointes tournées du côté du verre. Ces conducteurs communiquent avec deux gros

cylindres horizontaux, reliés entre eux par un tube de plus petit diamètre.

**Fonctionnement.** — Le frottement du plateau contre les coussins développe de l'électricité positive sur le verre et de l'électricité négative sur les coussins. L'électricité négative se perd dans le sol par l'intermédiaire de bandes d'étain et d'une chaîne métallique ; l'électricité positive est transportée par le plateau jusqu'aux peignes. Là, elle agit par influence sur les cylindres ; de l'électricité positive est repoussée dans la région des cylindres qui est la plus éloignée du plateau, et de l'électricité négative s'écoule par les pointes des peignes, ce qui ramène à l'état neutre les points du plateau qui ont franchi les peignes. Il en résulte que le plateau d'une machine de Ramsden en activité peut

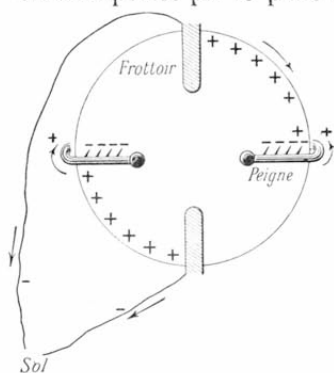


Fig. 260. — Distribution de l'électricité positive sur le plateau d'une machine de Ramsden en activité.

être divisé en quatre quadrants (*fig. 260*) : deux quadrants positifs, deux à l'état neutre.

Le *pôle positif* est constitué par les cylindres ; le *pôle négatif*, par les coussins. Quand les coussins sont mis en communication avec le sol, ce qui est la disposition généralement adoptée, la machine ne fournit que de l'électricité positive. On obtiendrait aussi de l'électricité négative en isolant les coussins et en les mettant en communication avec des conducteurs ; ceux-ci se chargeraient d'électricité négative.

**Limite de la charge.** — Les phénomènes que nous venons de décrire se reproduisant à chaque tour du plateau, la charge des cylindres augmente et il en est de même, par

suite, de leur potentiel (ou de la différence entre leur potentiel et celui du sol). Lorsque le potentiel des cylindres est devenu assez grand pour qu'une décharge éclate entre les coussins et les conducteurs, la limite de la charge est atteinte.

Dans la pratique, plusieurs causes empêchent d'atteindre cette limite ; la plus importante est la *déperdition par l'air et les supports* ; aussi a-t-on soin par les temps humides de dessécher l'air qui entoure la machine avec des fourneaux, de frotter les supports et le plateau avec des linges secs et chauds pour leur enlever toute trace d'humidité. Pour atténuer la déperdition de l'électricité positive du plateau pendant son mouvement de rotation, on place, sur le trajet que fait le plateau pour aller d'une paire de frottoirs au peigne suivant, des quarts de cercle formés de deux feuilles de soie dans l'intervalle desquelles passe le plateau.

La *nature des corps frottés* influe également sur la limite de charge. On obtient de bien meilleurs résultats, par exemple, en enduisant la surface des coussins d'une matière pulvérulente telle que l'or mussif (variété de bisulfure d'étain très friable) ou l'amalgame d'étain. On rend cette matière adhérente avec un peu de suif.

Pour juger approximativement de la charge des cylindres, on fixe sur l'un d'eux un électromètre de Henley (175).

REMARQUE. -- Pour une machine de Ramsden de dimensions données, le débit est proportionnel à la vitesse de rotation et à l'étendue de la surface frottée, mais il est indépendant de la pression exercée par les coussins sur le plateau. Par suite, le travail dépensé pour vaincre le frottement n'est pas converti en énergie électrique. Il est très probable, en effet, que la cause de la production de l'électricité est due au simple contact de deux substances différentes, le verre et les coussins. Ce contact suffit pour établir entre le verre et

le cuir une différence de potentiel, différence qui augmente lorsque, par suite de la rotation du plateau, l'électricité positive du verre n'est plus soumise à l'influence de l'électricité négative des coussins. Or, pour éloigner ainsi l'électricité positive et vaincre la force d'attraction, il faut dépenser un certain travail. C'est ce travail qui est converti en énergie électrique. Il ne représente qu'une faible partie du travail consommé ; le reste est dépensé en pure perte par le frottement du plateau et des coussins.

**180. Machine de Wimshurst.** — La machine de Wimshurst est une machine à influence *auto-excitatrice* : il suffit de la mettre en mouvement pour qu'elle s'amorce d'elle-même en partant d'une charge initiale extrêmement faible.

**Description.** — Elle se compose de deux plateaux de verre identiques (*fig. 261*), vernis à la gomme laque, et

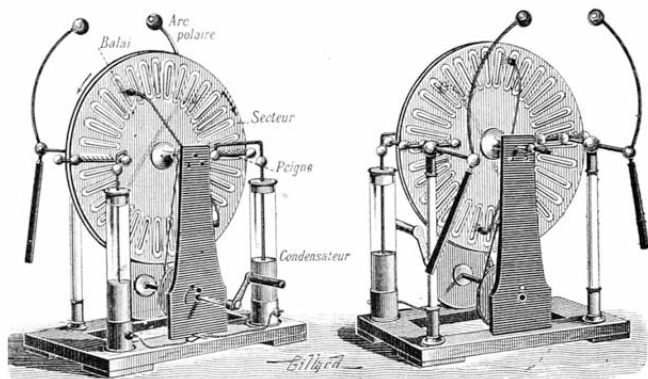


Fig. 261. — Machine de Wimshurst (vue antérieure et vue postérieure).

munis extérieurement d'un même nombre de secteurs d'étain gaufrés en relief. Une manivelle met les deux plateaux en mouvement autour du même axe géométrique ; le plateau antérieur tourne dans le sens des aiguilles

d'une montre par l'intermédiaire d'une corde de transmission droite, le plateau postérieur tourne en sens contraire par l'intermédiaire d'une corde de transmission croisée. En regard de chaque plateau se trouvent deux conducteurs diamétraux communiquant entre eux par l'axe et avec le sol. Ces conducteurs sont inclinés l'un et l'autre d'environ  $60^\circ$  sur l'horizon, mais en sens contraires, de manière à se trouver à  $60^\circ$  l'un de l'autre ; leurs extrémités portent des petits *balais* métalliques souples qui frottent légèrement contre les secteurs d'étain et les mettent ainsi successivement en communication avec le sol pendant la rotation. Enfin deux peignes métalliques embrassent les deux plateaux dans le plan horizontal et communiquent avec deux arcs mobiles, terminés par des boules de décharge que l'on peut écarter plus ou moins au moyen de manches en ébonite. Ces arcs forment les *pôles* de la machine.

Pour augmenter la capacité des arcs polaires, on adjoint à la machine deux bouteilles de Leyde dont les armatures extérieures communiquent entre elles et dont les armatures intérieures communiquent respectivement avec chacun des deux peignes.

**Fonctionnement.** — Pour faire fonctionner la machine de Wimshurst, on approche au contact les boules qui terminent les arcs polaires ; puis on met les plateaux en mouvement. On entend bientôt un bruissement particulier, indiquant que la machine est amorcée. Si l'on écarte alors un peu les deux boules, il se produit entre elles une série d'étincelles bruyantes, dont la longueur varie entre 10 et 15<sup>cm</sup> dans les machines de dimensions ordinaires.

Plusieurs théories ont été données pour expliquer la production des électricités dans la machine de Wimshurst.

Elles ne sont pas complètement satisfaisantes, en ce sens qu'elles ne rendent pas compte de tous les faits observés. L'expérience montre que les peignes ne servent pas seulement à soutirer l'électricité aux secteurs et qu'ils peuvent être avantageusement remplacés par des peignes droits. D'un autre côté, M. Bonetti a récemment perfectionné la machine de Wimshurst au point de vue du débit en lui donnant des plateaux sans secteurs, en verre ou en ébonite (*fig. 262*), et en augmentant le nombre des balais sur les conducteurs. Nous reviendrons ultérieurement sur cette question, s'il y a lieu.

**Reconnaissance des pôles.** — La reconnaissance des pôles d'une machine de Wimshurst est basée sur ce fait

qu'une flamme présentée aux boules des arcs polaires est fortement *attirée* au pôle négatif et *refoulée* au pôle positif.

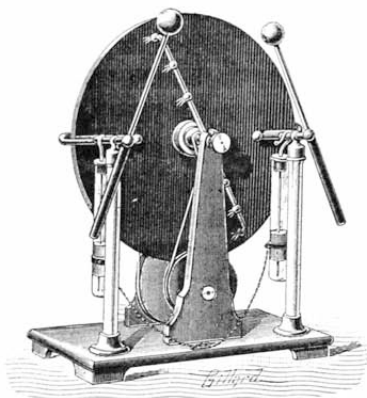


Fig. 262. — Machine de Bonetti.

L'expérience se fait ordinairement avec une lampe à essence minérale tenue à la main. La machine étant en marche, si l'on approche la flamme du pôle négatif, l'attraction est tellement forte que la lampe s'éteint; elle se rallume si on l'approche du pôle positif à cause de l'étincelle qui jaillit entre la lampe et la

boule de l'arc polaire, et ainsi desuite, la lampe étant éteinte ou rallumée suivant qu'on la présente à l'un ou à l'autre pôle.

**Réversibilité.** — La machine de Wimshurst est *réversible*, c'est-à-dire qu'elle peut convertir de l'énergie électrique en travail.

Cette expérience curieuse nécessite deux machines de Wimshurst. L'une sert de *génératrice*, l'autre de *réceptrice*.

On enlève les cordes de la machine réceptrice, on

retourne ses porte-balais de manière que les balais ne frottent plus sur les secteurs, puis on réunit les peignes de cette machine aux peignes correspondants de la génératrice à l'aide de gros fils isolés. Si l'on fait alors tourner la génératrice, on voit les plateaux de la réceptrice se mettre en mouvement.

**Machines de Wimshurst composées.** — On construit des machines de Wimshurst à quatre plateaux montés sur le même axe. Elles forment en réalité deux machines réunies en *quantité*, c'est-à-dire réunies par les pôles de même nom. Leur débit est beaucoup plus grand que celui des machines simples.

À l'Exposition universelle de 1889 figurait une machine de Wimshurst à douze plateaux de verre formant six machines accouplées. Cette machine, qui fonctionnait par tous les temps, donnait couramment des étincelles de 40<sup>cm</sup> de longueur.

#### 181. Constantes des machines électrostatiques. —

Trois qualités caractérisent les machines électrostatiques : ce sont le débit, la différence de potentiel qui s'établit entre leurs pôles, et la puissance.

**Débit.** — La quantité d'électricité positive ou négative que peut fournir une machine électrostatique en une seconde est, comme nous l'avons vu, très faible. Elle ne dépasse guère quelques dix-millièmes de coulomb dans les machines à frottement; dans les machines à influence, le débit est plus grand, mais il est encore insignifiant si on le compare à celui des piles et autres sources d'électricité dynamique.

Le débit des machines électrostatiques se mesure à l'aide de l'*électromètre-bouteille de Lane* (fig. 263). C'est une bouteille de Leyde dont l'armature extérieure communique avec une tige en laiton dans laquelle glisse à frottement une tige horizontale terminée par une boule *b*; celle-ci peut être

amenée à une distance connue de l'armature intérieure à l'aide d'une vis micrométrique.

Les deux armatures étant mises en communication avec les deux pôles de la machine, la bouteille se charge jusqu'au moment où la différence de potentiel sur les boules  $b$  et  $b'$  est assez grande pour qu'une étincelle jaillisse entre elles. Après quelques étincelles, on peut admettre qu'il n'y a plus accumulation d'électricité sur le verre; dès lors, la quantité d'électricité débitée par chaque étincelle est constante tant qu'on ne modifie pas la

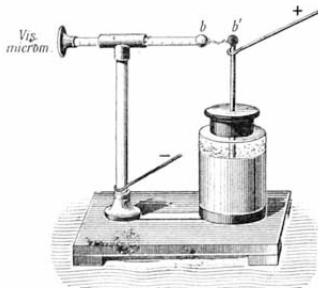


Fig. 263. — Électromètre-bouteille de Lane.

distance  $bb'$ , appelée *distance explosive*. On compte le nombre d'étincelles qui se produisent dans l'unité de temps pour une même distance explosive: ce nombre est proportionnel à la quantité d'électricité fournie par la machine.

**Différence de potentiel entre les pôles.** — Les machines électrostatiques sont des sources à haut potentiel. Ce potentiel, ou plutôt la différence de potentiel qui s'établit entre les deux pôles s'évalue approximativement par la longueur de l'étincelle que peut fournir la machine en se déchargeant, et rigoureusement à l'aide d'instruments appelés *électromètres*.

Dans les machines de Ramsden, la différence de potentiel qui s'établit entre les cylindres et le sol, lorsque les frottoirs sont mis en communication avec le sol, ne dépasse guère 45000 volts. Dans une bonne machine de Wimshurst qui donne des étincelles de 15 à 18<sup>cm</sup> de longueur, la différence de potentiel entre les deux pôles peut atteindre 100000 volts.

**Puissance.** — La puissance d'une machine électrostatique est le travail qu'elle fournit par seconde. Cette puis-



sance s'évalue en *watts*, le watt correspondant au travail d'un joule par seconde.

Soit une machine dont la différence de potentiel entre les pôles est  $V$ . Si elle est capable de charger  $n$  fois par seconde un électromètre-bouteille de Lane dont la capacité est  $C$ , elle produit par seconde un travail  $W$  égal à  $\frac{nCV^2}{2}$  (169); la puissance de la machine est donc égale à  $\frac{nCV^2}{2}$  watts,  $C$  étant exprimé en farads,  $V$  en volts.

**182. Applications des machines électrostatiques.** — On n'utilise guère le débit des machines électrostatiques. On les emploie pour charger les condensateurs, pour donner aux conducteurs un potentiel élevé, pour répéter les expériences qui montrent la distribution superficielle de l'électricité, l'induction électrostatique, le pouvoir des pointes, etc.

En médecine cependant, les machines à influence et principalement la machine de Wimshurst sont aujourd'hui d'un grand usage pour le traitement des affections nerveuses. La machine de Wimshurst sert en outre à produire de l'oxygène ozonisé. On fait arriver un courant d'air ou d'oxygène préalablement desséché dans l'arbre de la machine, qui est creux; le gaz s'échappe d'entre les plateaux pendant leur rotation, et son électrisation produit une certaine quantité d'ozone qui se répand dans la salle où est la machine.

REMARQUE. — Lorsqu'on veut électriser au maximum un conducteur isolé avec une machine électrostatique, il faut faire communiquer un des pôles de cette machine avec le conducteur, et mettre l'autre pôle en communication avec le sol. C'est ainsi qu'on établit entre le conducteur et les parois de la pièce la plus grande différence de potentiel que peut donner la machine. Une machine de Ramsden dont les cou-

sins communiquent avec le sol réalise toujours cette condition.

### RÉSUMÉ DU CHAPITRE XIX

Les machines électrostatiques sont des sources d'électricité à faible débit et à haut potentiel; on les divise en machines à frottement et machines à influence.

Le type des machines à frottement est la *machine de Ramsden*.

Un plateau de verre s'électrise positivement par frottement entre deux paires de coussins en communication avec le sol; cette électricité est transportée jusqu'en regard de peignes en fer à cheval qui laissent écouler de l'électricité de nom contraire. En même temps de l'électricité positive est refoulée dans deux gros cylindres reliés par un tube de plus petit diamètre. La machine ne fournit donc que de l'électricité positive.

Théoriquement, la limite de charge est atteinte lorsqu'une décharge peut éclater entre les conducteurs et les coussins; mais on atteint rarement cette limite, principalement à cause de la déperdition par l'air et par les supports.

La *machine de Wimshurst* est une machine à influence auto-excitatrice. Deux plateaux garnis de secteurs d'étain tournent en sens contraire: deux conducteurs inclinés à 60° portent des balais qui frottent légèrement contre les secteurs. Enfin deux peignes embrassent les plateaux sur un diamètre horizontal et communiquent avec les arcs polaires. La capacité de la machine est augmentée par deux bouteilles de Leyde. Quand les plateaux sont en mouvement, la machine s'amorce d'elle-même, et si l'on écarte alors les deux boules il jaillit entre elles des étincelles.

Cette machine est réversible: si l'on envoie dans une machine réceptrice les électricités développées par une machine génératrice, les plateaux de la réceptrice se mettent aussitôt en mouvement.

Une machine électrostatique est caractérisée par son débit, son potentiel et sa puissance. Le débit est très faible; on l'évalue par le nombre d'étincelles qui se produisent dans l'unité de temps. La différence de potentiel entre les deux pôles est considérable; elle se mesure approximativement par la longueur de l'étincelle que fournit la machine en se déchargeant.

Les machines électrostatiques n'ont pas d'applications industrielles. Elles ne servent qu'en médecine (production d'ozone, traitement des affections nerveuses) et pour les expériences de cours.

---

## CHAPITRE XX

## EFFETS DES DÉCHARGES ÉLECTRIQUES

**183. Effets généraux.** — L'énergie qui a été dépensée dans la charge des condensateurs et des conducteurs électrisés doit se retrouver dans la décharge ; elle se manifeste par des effets qui varient suivant le milieu à travers lequel se produit la décharge et que l'on classe en effets *physiologiques, mécaniques, calorifiques, lumineux et chimiques*.

Soit un conducteur chargé de  $Q$  coulombs et dont le potentiel est de  $V$  volts ; sa décharge rend disponible une quantité d'énergie égale à  $\frac{QV}{2}$  joules. Or le conducteur par lequel s'effectue la décharge oppose une certaine *résistance* au mouvement de l'électricité ; une partie plus ou moins grande de l'énergie est donc employée à vaincre cette résistance et se transforme en énergie calorifique, le reste se dépense dans l'étincelle électrique. D'après cela, si les conducteurs employés pour la décharge n'ont qu'une très faible résistance, ils n'absorbent qu'une petite partie de l'énergie et ne s'échauffent pas sensiblement. Si l'on emploie au contraire des conducteurs très résistants, comme des fils métalliques longs et fins, la plus grande partie de l'énergie se dépense dans le conducteur et l'étincelle obtenue est beaucoup moins bruyante.

**184. Effets physiologiques.** — Les effets physiologiques de l'électricité statique varient suivant qu'ils proviennent d'une commotion ou d'une simple électrisation.

**Commotions.** — Les commotions consistent en contractions musculaires et en une excitation violente de la sensibilité ; elles sont produites principalement par les décharges des condensateurs.

Avec une petite bouteille de Leyde, la commotion ne se fait guère sentir qu'aux poignets ; elle peut être ressentie aux coudes, aux épaules et produire même un fort ébranlement de la poitrine avec des bouteilles de plus grande capacité. La commotion peut être donnée simultanément à un grand nombre de personnes. Pour cela, celles-ci forment la chaîne en se plaçant à la suite les unes des autres et se tenant par la main ; la première prend dans la main la panse d'une bouteille de Leyde chargée, la dernière touche en même temps le bouton de l'armature intérieure.

Les batteries de plusieurs jarres donnent des commotions qui ne peuvent plus être subies impunément ; les décharges des batteries puissantes sont foudroyantes, aussi est-il bon de se défier même de leurs décharges résiduelles.

**Electrisation.** — L'électrisation, employée surtout pour le traitement de diverses maladies, se pratique avec une machine de Wimshurst dont on a enlevé les condensateurs. Suivant la maladie à traiter, on procède de quatre manières différentes : le malade peut recevoir le bain électrique, ou le souffle, ou la friction, ou l'étincelle.

Pour donner un *bain électrique*, on isole le malade sur un

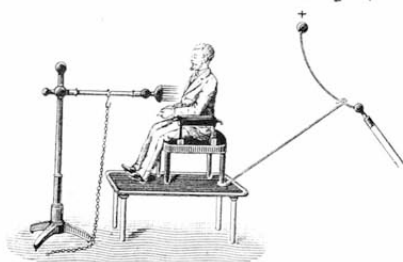


Fig. 264. — Électrisation par le souffle électrique.

tabouret à pieds de verre et on le met en communication avec un des pôles de la machine. Dès que celle-ci fonctionne, le malade ressent un frisson caractéristique par tout le corps ; ses cheveux se dressent et il a la propriété d'attirer les corps légers. Le bain électrique n'est pas cu-

ratif ; il a pour but d'habituer le malade à l'action électrique.

Le *souffle électrique* est employé pour le traitement des

maladies nerveuses douloureuses. Pour le produire, on présente en face des parties sensibles du malade une pointe ou une série de pointes reliées au sol (*fig. 264*) ; l'écoulement de l'électricité par les pointes donne une impression de souffle (vent électrique) douée de propriétés calmantes.

Si l'on applique exactement de la flanelle sur une partie du corps, et si l'on promène légèrement sur cette partie ainsi recouverte, une boule métallique reliée au sol, il jaillit entre la flanelle et le sol une série de petites étincelles qui rougissent la peau et provoquent une sensation de chaleur (*frictions électriques*).

Enfin l'électrisation par étincelles se produit également en employant une boule métallique, mais sans l'amener au contact du corps. La boule est approchée ou éloignée alternativement du malade, de manière à faire éclater des étincelles par intermittences. Ces étincelles ne donnent ni choc ni secousse : elles déterminent une légère sensation de piquûre et de chaleur. Le traitement par étincelles est employé avec succès dans la paralysie, l'engourdissement, l'atrophie musculaire, et dans les maladies nerveuses qui ont résisté au souffle électrique.

**185. Effets mécaniques.** — Lorsqu'une décharge traverse un corps mauvais conducteur qui n'arrête pas cependant la décharge, la plus grande partie de l'énergie électrique se dépense en travaux de rupture, de déchirements, d'expansions.

Si l'on déplace une carte entre les deux pôles d'une machine de Wimshurst en activité, elle se trouve criblée de trous en quelques instants. Pour percer une lame de verre, surtout quand elle est un peu épaisse, il est nécessaire d'employer des conducteurs en pointe et de les noyer, ainsi que la lame, dans un corps mauvais conducteur comme la cire ou la paraffine. On empêche ainsi l'étincelle de contourner la lame de verre. Le *perce-verre de Terquem* (*fig. 265*) permet, avec une batterie en cascade, de percer du verre ayant de 3 à 4<sup>cm</sup> d'épaisseur.

Pour faire passer la décharge dans un liquide, on emploie la

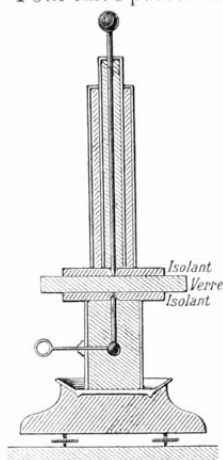


Fig. 265. — Perce-verre de Terquem.

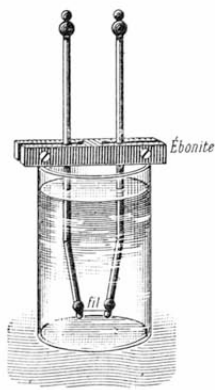


Fig. 266. — Torpille électrique de Guillemin.

*torpille électrique de Guillemin* (fig. 266). Elle se compose de deux tiges métalliques isolées par un support en ébonite et dont les extrémités sont réunies par un fil métallique. Le fil est volatilisé par la décharge se produisant entre les extrémités des tiges, et l'ébranlement communiqué au

liquide est tel que l'eau est projetée à plusieurs décimètres de hauteur et que le verre est très souvent brisé avec un grand fracas. Cet effet est analogue à celui des torpilles.

**486. Effets calorifiques.** — L'expérience montre que la quantité de chaleur dégagée dans un conducteur par lequel s'opère la décharge est d'autant plus grande que la résistance de ce conducteur est elle-même plus grande. D'après cela, si l'on intercale entre deux gros conducteurs de faible résistance un fil métallique très fin et ayant par conséquent une très grande résistance, la chaleur concentrée dans ce fil pourra le fondre et même le volatiliser. L'expérience se fait avec l'*excitateur universel* (fig. 267). Le fer brûle avec une vive lumière en produisant de l'oxyde  $\text{Fe}^3\text{O}^4$ . Dans les mêmes conditions, l'or se volatilise ; si l'on tend entre les conducteurs un fil de soie doré à sa surface, le métal est réduit en vapeur, qui vient se

déposer en une poussière violette sur une carte placée der-

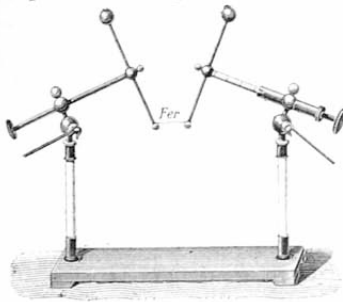


Fig. 267. — Excitateur universel de Mascart.

rière. L'expérience dite du *portrait de Franklin*, dans laquelle on volatilise une feuille d'or appliquée contre un portrait découpé, repose sur le même principe.

Entin la chaleur due à l'étincelle produit l'inflammation des liquides combustibles comme l'al-

cool, l'éther. On le démontre aisément en plaçant de l'éther

dans une cuiller et en l'approchant d'un des pôles de la machine de Wimshurst. De même, l'étincelle enflamme les gaz combustibles, les mélanges d'oxygène et d'hydrogène, d'oxygène et de gaz d'éclairage, etc. L'audiométrie repose

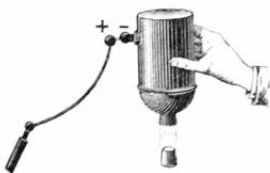


Fig. 268. — Pistolet de Volta.

sur cette propriété.

— Le *pistolet de Volta* (fig. 268) est un flacon métallique que l'on remplit de gaz d'éclairage, puis que l'on secoue légèrement pour y laisser rentrer de l'air. Si, après avoir bouché le flacon, on présente le bouton extérieur *b* à une machine électrique, une étincelle jaillit entre la paroi et le bouton intérieur *b'*; le mélange s'enflamme brusquement et l'augmentation de force élastique qui en résulte chasse le bouchon avec explosion.

trer de l'air. Si, après avoir bouché le flacon, on présente le bouton extérieur *b* à une machine électrique, une étincelle jaillit entre la paroi et le bouton intérieur *b'*; le mélange s'enflamme brusquement et l'augmentation de force élastique qui en résulte chasse le bouchon avec explosion.

**187. Effets lumineux.** — Les effets lumineux résultent du passage de l'électricité d'un conducteur sur un autre à travers un milieu non conducteur; ils affectent trois formes principales : l'*étincelle*, les *aigrettes* et les *lueurs*.

**Étincelle électrique.** — La longueur de l'étincelle qui

éclate entre deux conducteurs déterminés ou, autrement dit, la *distance explosive*, croît avec la différence de potentiel des deux conducteurs. Si l'étincelle est courte, elle a la forme d'un trait rectiligne très lumineux ; à mesure que la distance augmente, le trait devient étroit, sinueux et ramifié.

La planche I représente, en réduction, une étincelle électrique de 16<sup>m</sup> de longueur obtenue par M. H. Langumier, directement sur une plaque photographique sur laquelle on faisait arriver les deux extrémités du fil d'une bobine de Ruhmkorff, sans interposition aucune de limaille métallique ou de fleur de soufre.

Les planches II et III reproduisent, avec des réductions moindres, des photographies obtenues en amenant seulement soit le pôle positif, soit le pôle négatif en contact avec la partie sensible de la plaque photographique, l'autre pôle étant en contact avec l'autre face de la plaque.



Fig. 269. —  
Tube  
étincelant.

Une seule décharge fournit un grand nombre d'étincelles lorsqu'elle se produit à travers une suite de conducteurs laissant entre eux de petits intervalles. Le *tube étincelant* est un tube de verre terminé par deux montures en laiton, entre lesquelles on a collé à l'intérieur du tube une série de losanges de clinquant séparés par de très petits intervalles (*fig.* 269). En mettant les montures extrêmes en contact avec les deux pôles d'une machine de Wimshurst, la décharge se fait par la bande conductrice interrompue, et on voit des étincelles jaillir simultanément dans tous les intervalles des losanges.

Si l'on suspend aux deux pôles d'une machine de Wimshurst un plateau en verre sur lequel on a fixé par un enduit de la limaille de zinc, les



étincelles jaillissent sur toute la surface de ce plateau métallisé sous forme de traits lumineux présentant des ramifications nombreuses et irrégulières. L'ensemble lumineux simule l'éclair; la coloration des traits de feu est due à la volatilisation des parcelles de zinc déposées sur ce tableau étincelant.

**Aigrettes.** — Lorsqu'un conducteur électrisé présente des parties où la densité électrique acquiert une très grande valeur, comme des arêtes, des pointes, l'écoulement de l'électricité par ces parties se manifeste sous forme d'*aigrettes* d'une teinte pâle violacée, accompagnées d'un bruissement particulier. Ce phénomène s'observe très nettement dans l'obscurité aux pointes des peignes d'une machine de Wimshurst amorcée. Les pointes chargées d'électricité négative présentent à leur extrémité une

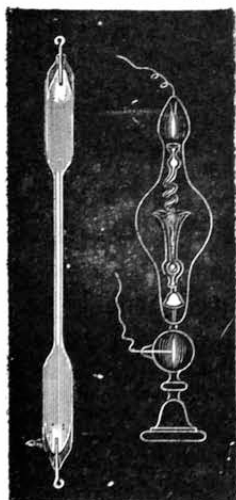


Fig. 270. — Tubes de Geissler.

petite étoile brillante; les pointes positives donnent des aigrettes de forme ovoïde, moins brillantes, mais s'étendant et se ramifiant assez loin des pointes.

**Lueurs.** — Les lueurs, appelées aussi *effluves*, se produisent principalement quand la décharge a lieu dans les gaz raréfiés. L'expérience se fait avec les *tubes de Geissler* (fig. 270). Ce sont des tubes clos en verre contenant un gaz dont la force élastique a été réduite à quelques millimètres au plus. Deux fils de platine soudés dans le verre aux extrémités du

tube servent d'électrodes. Si l'on met ces fils en contact avec les pôles d'une machine de Wimshurst amorcée,

le tube est parcouru par une lueur présentant des *stratifications*, c'est-à-dire des parties alternativement brillantes et obscures. La lueur a une teinte qui varie avec la nature du gaz ; elle semble partir du pôle positif. Le pôle négatif est entouré d'une auréole violacée suivie d'un espace noir.

Dans les *tubes de Crookes* (fig. 271), la raréfaction est poussée de manière que la force élastique du gaz ne soit

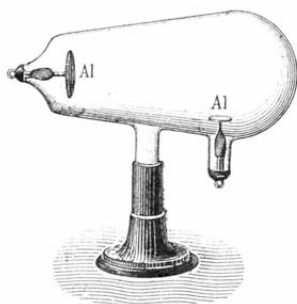


Fig. 271. — Tube de Crookes.

plus que quelques millimètres de millimètre. Les lueurs disparaissent et le passage de l'électricité est marqué par des effets d'un caractère tout particulier : le tube de verre acquiert une *fluorescence* verte très vive dans la partie opposée à l'électrode négative ou cathode ; en même temps

il subit une élévation de température qui peut aller jusqu'à 200°. Ces rayons obscurs émanés de la cathode (rayons cathodiques) disparaissent si le vide est poussé à ses dernières limites. Nous étudierons dans le tome III les belles applications des tubes de Crookes à la radiographie et à la fluoroscopie.

**188. Effets chimiques.** — Enfin l'électricité des décharges peut produire des effets purement chimiques. Une série d'étincelles détermine la décomposition du gaz ammoniac en azote et hydrogène, la combinaison de l'azote et de l'oxygène, etc.; elle produit la décomposition des sels, mais très faiblement, à cause de la quantité relative-

ment très faible d'électricité qui est mise en jeu. Les effluves transforment partiellement l'oxygène en ozone (V. Chimie).

### RÉSUMÉ DU CHAPITRE XX

La décharge d'un conducteur ou d'un condensateur électrisés se manifeste par des effets qui varient suivant la nature du milieu à travers lequel elle se produit.

Les *effets physiologiques* proviennent d'une commotion ou d'une électrisation. Les commotions (contractions musculaires, etc.) sont produites principalement par les décharges des bouteilles de Leyde et des batteries. L'électrisation, employée surtout pour le traitement des maladies nerveuses, est utilisée sous forme de bain, de souffle, de friction, d'électrisation par étincelles.

Les *effets mécaniques* (ruptures, déchirements) se produisent avec les corps mauvais conducteurs. On les met en évidence dans le perce-verre et dans la torpille électrique.

Les *effets calorifiques* sont surtout sensibles lorsque la décharge s'opère dans des conducteurs de grande résistance comme des fils métalliques très fins. La chaleur produite par la décharge enflamme l'éther, les mélanges détonants, etc.

Les *effets lumineux* affectent la forme d'étincelle, d'aigrettes ou de lueurs. L'étincelle est rectiligne lorsqu'elle est courte; elle devient ramifiée et sinueuse à mesure que la distance explosive augmente. Les aigrettes sont dues à l'écoulement de l'électricité par des pointes. Enfin les lueurs se produisent dans les gaz raréfiés; l'expérience se fait avec les tubes de Geissler. Dans les tubes de Crookes, il y a fluorescence et élévation de température dans la partie opposée à la cathode.

Les *effets chimiques* proprement dits consistent en décompositions ( $AzH^3$ ) ou combinaisons ( $Az$  et  $O$ ). L'effluve transforme partiellement l'oxygène en ozone.

### EXERCICES SUR LE CHAPITRE XX

55. Après avoir déchargé partiellement un condensateur dont la capacité est de 1 microfarad et le potentiel de 100 000 volts, on trouve que le potentiel n'est plus que de 50 000 volts. Quelle est la chaleur produite par la décharge si toute l'énergie électrique est convertie en chaleur?

56. La capacité d'un conducteur est de  $\frac{1}{20}$  de microfarad; quel potentiel en volts faut-il lui donner pour que son énergie électrique soit équivalente à 10 petites calories?

## CHAPITRE XXI

## ÉLECTRICITÉ ATMOSPHÉRIQUE

**189. Phénomènes généraux.** — Lorsqu'un conducteur, isolé et à l'état neutre, est placé dans l'atmosphère en un lieu découvert et par un temps serein, il y subit une influence électrique : il s'électrise *négativement* du côté du ciel et *positivement* du côté du sol. Cette expérience se fait aisément avec une longue barre métallique verticale dont



Fig. 272. — Électromètre de Saussure.

les extrémités communiquent chacune avec deux électroscopes sensibles placés près de ces extrémités et eux-mêmes isolés ; elle donne toujours le même résultat. On constate de plus que le potentiel du conducteur ainsi disposé est *positif*, supérieur par conséquent à celui du sol. L'atmosphère peut donc être assimilée à un champ électrique dans lequel tout se passe comme si la terre était électrisée négativement à sa surface ou comme si une charge positive existait à une grande hauteur dans l'atmosphère.

**Détermination du potentiel en un point de l'atmosphère.** — Pour constater que, dans un milieu découvert, le potentiel en un point de l'atmosphère diffère toujours de celui du sol, on emploie l'*électromètre de Saussure* (fig. 272).

C'est un électroscope à feuilles d'or dont la monture qui supporte les feuilles est surmontée d'une tige en cuivre de 60<sup>cm</sup> de hauteur, terminée par une pointe. Un chapeau métallique, placé entre la naissance de la tige de cuivre et la cage en verre, protège celle-ci contre la pluie. Enfin un arc de cercle divisé, fixé sur les parois intérieures de la cage, permet de mesurer la divergence des feuilles d'or. Si l'on élève cet électromètre dans l'atmosphère, il se produit une divergence qui augmente avec la hauteur et qui, jusqu'à 25° environ, est proportionnelle à la charge électrique acquise par l'appareil.

L'électromètre de Saussure mesure le potentiel de l'atmosphère à l'extrémité même de la pointe. En effet, l'électricité positive de l'atmosphère agit par influence sur la tige ; de l'électricité négative s'écoule par la pointe jusqu'à ce que le potentiel de la pointe et par suite de la tige dont elle fait partie ne présente plus aucune différence avec celui de l'air au voisinage de la pointe. A ce moment, la divergence des feuilles ne varie plus et elle mesure ce potentiel.

Comme la pointe qui termine l'électromètre de Saussure ne peut être parfaite, il y a toujours, au moment où la divergence des feuilles d'or reste constante, une petite différence de potentiel entre la pointe et l'air qui l'entoure. Dans les recherches de précision, on se sert d'appareils qui produisent le même effet qu'une pointe parfaite. Ces appareils (collectionneur d'électricité de Thomson, potentiographe enregistreur de Mascart, etc.) reposent sur des considérations qui seront étudiées dans le tome III.

**Résultats.** — Par un ciel serein, le potentiel en un point quelconque de l'atmosphère est toujours *positif* ; il augmente à peu près proportionnellement à l'altitude. En un lieu découvert, les variations en volts par mètre sont mesurées selon les jours par des nombres qui oscillent ordinairement entre 10 et 1000, mais des variations beaucoup plus grandes peuvent se produire brusquement en un même point.

Quant à la rapidité avec laquelle le potentiel croît à partir du sol, elle dépend beaucoup de la forme du sol à l'endroit où l'on fait l'expérience ; elle est relativement grande sur une éminence, très faible dans un creux. On se rendrait compte qu'il doit en être ainsi en traçant à un moment donné les surfaces de niveau ou surfaces *équipotentielles* qui correspondent à des valeurs égales et équidistantes du potentiel ; on verrait ces surfaces se disposer en plans parallèles et à peu près équidistants dans une région plane, comme une plaine ou la surface de la mer, suivre les accidents de terrain en se déformant et se resserrant au-dessus des éminences ou des objets en contact avec le sol, et au contraire se raréfier dans les régions encaissées comme le fond d'un ravin, une cour entourée de murs. Loin du sol, ces surfaces sont des plans horizontaux.

Le potentiel de l'atmosphère n'est pas toujours positif ; il devient négatif et celui du sol positif par les temps variables, surtout par la pluie, la neige ou la grêle, mais cette inversion doit être regardée comme accidentelle et essentiellement temporaire.

#### PHÉNOMÈNES DES ORAGES

**490. Définitions.** — Les orages sont des manifestations électriques temporaires produites par des nuages électrisés.

Les nuages *orageux* peuvent être électrisés positivement ou négativement, soit que leur électrisation provienne de l'atmosphère, soit qu'ils aient agi par influence les uns sur les autres. L'expérience montre qu'ils sont assimilables à des conducteurs électrisés. Les étincelles qui jaillissent entre deux nuages dont les potentiels sont différents se nomment *éclairs*. Lorsque l'éclair éclate entre un nuage orageux et le sol, on dit que la *foudre tombe*. Dans tous les cas, l'éclair est suivi d'un bruit plus ou moins fort dû à l'ébranlement de l'air et que l'on appelle le *tonnerre*.

**491. Historique.** — L'identité de la foudre et des décharges

électriques ordinaires, soupçonnée par les physiciens depuis qu'ils connaissaient les effets de la machine électrique et surtout ceux de la bouteille de Leyde, fut démontrée directement par le physicien américain Franklin.

Dans un ouvrage publié en 1749, Franklin proposa de *soutirer* aux nuages orageux leur électricité au moyen de barres métalliques terminées en pointe et isolées. Cet ouvrage parvint entre les mains de Dalibard, curé de Marly-la-Ville, qui exécuta l'expérience indiquée par Franklin. Dalibard éleva dans son jardin une longue perche de fer, coudée à sa partie inférieure et isolée du sol par une table de bois reposant sur quatre bouteilles. Le 10 mai 1752, pendant un orage, il put tirer des étincelles de la base de la tige.

Un mois plus tard, Franklin qui ne connaissait pas encore l'expérience de Dalibard lança, par un temps d'orage, un cerf-volant muni d'une pointe métallique et soutenu par une corde de chanvre terminée par un cordon de soie isolant. La corde de chanvre étant peu conductrice, il ne recueillit d'abord aucune étincelle, mais une petite pluie étant venue rendre le chanvre conducteur, la corde donna les étincelles attendues. Franklin admettait que le cerf-volant *soutirait* au nuage son électricité; en réalité, il se produisait un phénomène d'influence et c'était l'électricité de même signe que celle du nuage qui, étant repoussée à la partie inférieure de la corde, donnait des étincelles à l'approche d'un corps communiquant avec le sol.

Une fois le point de départ donné, une foule d'expériences analogues suivirent, mais un événement tragique vint en montrer le danger. En 1753, Richmann, membre de l'Académie impériale de Saint-Petersbourg, s'étant approché par mégarde pendant un orage d'une tige de fer installée dans son cabinet de travail et aboutissant sur le toit de sa maison, reçut la décharge au front et fut foudroyé.

Le résultat pratique des expériences de Dalibard et de Franklin fut l'invention du paratonnerre.

**192. Éclairs.** — Les éclairs sont de gigantesques étincelles généralement très ramifiées, qui éclatent entre deux nuages électrisés ou entre un nuage électrisé et le sol. Leur lumière est blanche dans les régions inférieures de

l'atmosphère; elle est plus ou moins violacée dans les hautes régions où l'air est très raréfié.

L'étincelle qui constitue l'éclair a une durée très courte (à peine  $\frac{1}{4000}$  de seconde). Sa longueur peut atteindre  $10^{\text{km}}$  et plus. Lorsqu'elle éclate derrière un nuage ou au-

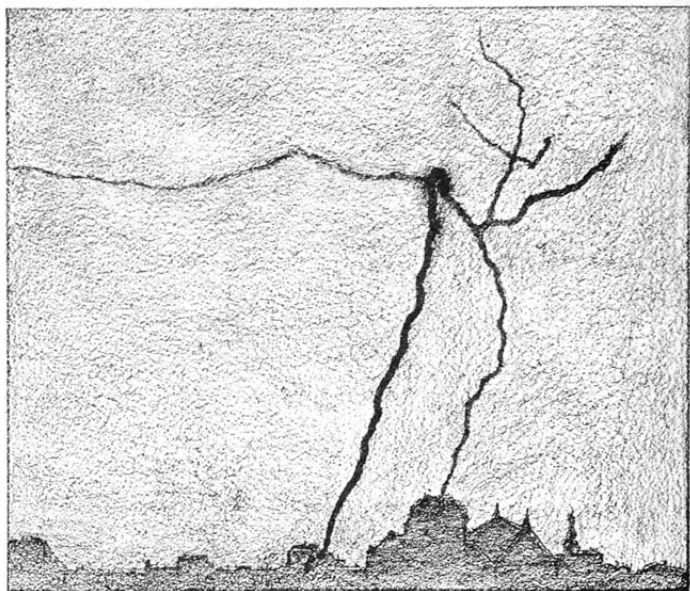


Fig. 273. — Image de l'éclair, d'après une photographie.

dessous de l'horizon, le trait de feu se trouve masqué et l'éclair apparaît sous forme d'une lueur diffuse qui illumine subitement le ciel.

Il n'y a pas très longtemps qu'on est arrivé à prendre des photographies d'éclair. Celles qu'on a obtenues montrent que l'éclair n'affecte pas la forme en zigzag sous laquelle on le représentait autrefois; il comprend un trait de feu



principal, accompagné souvent de très nombreuses ramifications.

La figure 273 a été faite d'après une photographie d'éclair prise par M. F.-M. Richard le 25 juin 1887, à Paris, et représente la foudre tombant sur une maison de la rue Picpus. La planche IV est la reproduction d'une photographie d'éclair prise récemment par M. L. Gaumont.

**193. Tonnerre.** — Le tonnerre est le bruit plus ou moins violent qui accompagne la décharge électrique ; il se fait entendre après qu'on a vu la lumière de l'éclair, bien que le phénomène sonore et le phénomène lumineux se produisent simultanément. Cet intervalle est dû à ce que le son ne parcourt qu'environ  $340^m$  par seconde et n'est perçu qu'après  $\frac{D}{340}$  secondes,  $D$  désignant la distance en mètres qui sépare l'éclair de l'observateur, tandis que la lumière met un temps inappréciable à franchir cette même distance.

Le tonnerre est sec et de courte durée quand on est près du lieu où se produit la décharge ; si l'on est plus loin, il se compose de plusieurs bruits qui se succèdent rapidement ; enfin, à une grande distance, il est d'abord faible, puis forme un roulement prolongé paraissant dû aux échos. Dans les pays montagneux, la durée du roulement est relativement plus grande.

**194. Effets de la foudre.** — Lorsque l'attraction qui s'exerce entre les électricités répandues sur un nuage et sur le sol l'emporte sur la résistance de l'air, l'étincelle éclate entre le nuage et le sol : on dit que la *foudre tombe*.

Les coups de foudre sont généralement accompagnés d'une odeur pénétrante caractéristique d'ozone, semblable à celle que l'on perçoit dans le voisinage d'une machine de Wimshurst en activité. Leurs effets sont, aux propor-

tions près, ceux que produisent les décharges électriques obtenues dans les laboratoires. Les conducteurs de grande résistance qui se trouvent sur le trajet de la décharge s'échauffent au point d'être fondus et même volatilisés; les corps mauvais conducteurs comme le bois, la brique sont brisés, dispersés; les matières combustibles sont enflammées; les hommes, les animaux sont renversés, brûlés, parfois frappés instantanément de mort. Enfin en pénétrant dans le sol, la foudre fond souvent les matières siliceuses sur son passage et forme ainsi des sortes de tubes vitrifiés que l'on appelle des *fulgurites*.

REMARQUES. — 1° La foudre frappe de préférence les points les plus saillants du sol (arbres, cheminées, clochers); ce sont en effet les points où s'accumule l'électricité contraire attirée par l'influence du nuage orageux. D'un autre côté, les corps bons conducteurs livrent plus facilement passage à la foudre que les corps mauvais conducteurs; aussi est-il imprudent de s'abriter trop près d'un arbre pendant un orage; si la foudre tombe sur l'arbre, elle quitte le tronc à la hauteur de la tête de la personne pour passer à travers son corps, le corps humain étant meilleur conducteur que le bois. En temps d'orage, on est plus en sûreté à l'intérieur d'une maison que dehors, surtout si les murs extérieurs ont été mouillés par la pluie et rendus conducteurs; quand la foudre pénètre à l'intérieur d'une maison, c'est presque toujours que la maison est surmontée d'une cheminée élevée et tapissée d'une couche de suie conductrice. Cet inconvénient ne se présente pas pour la cave; aussi y est-on en sécurité presque absolue.

2° Un être vivant peut recevoir une commotion même mortelle sans être frappé directement par la foudre. Supposons un nuage électrisé assez voisin du sol; un corps communiquant avec le sol se charge par influence d'une électricité contraire à celle du nuage. Si la foudre tombe en un point peu éloigné, le nuage se décharge, l'influence cesse, et le corps revient brusquement à l'état neutre. Cette modification équivaut à un courant de décharge et peut être aussi dangereuse. On appelle ce phénomène le *choc en retour*.

## PARATONNERRES.

**195. Définition.** — On donne le nom de paratonnerre à tout appareil qui sert à protéger les édifices de la foudre. Les principaux types employés aujourd'hui sont le paratonnerre de Franklin et le paratonnerre de Melsens.

**196. Paratonnerre de Franklin.** — Le paratonnerre de Franklin est une application du pouvoir des pointes. Il se compose d'une longue tige en fer, de section suffisante pour n'être pas fondue par la foudre, dressée au sommet de l'édifice que l'on veut protéger. Cette tige se termine à la partie supérieure par une pointe en cuivre rouge (fig. 274), doré à sa surface pour éviter l'oxydation, et

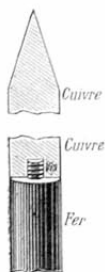


Fig. 274. —  
Extrémité  
d'un paratonnerre.

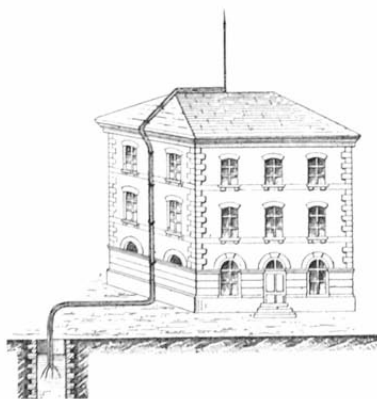


Fig. 275. — Installation d'un paratonnerre  
de Franklin.

communique avec le sol par un conducteur formé de cordes de fil de fer ou mieux de fil de cuivre rouge. Le conducteur suit le toit et les murs de l'édifice d'une façon *ininterrompue*; il est relié sur son trajet aux principales

pièces métalliques de l'édifice et se rend dans l'eau d'un puits ou dans de la braise de boulanger, où il se ramifie en plusieurs branches (*fig. 275*).

**Théorie.** — Lorsqu'on présente une pointe métallique tenue à la main à l'un des pôles d'une machine électrique en activité (*fig. 276*), on n'observe pas d'étincelle. Par suite de l'induction électrostatique exercée par le pôle, l'électricité de même signe se perd dans le sol par le corps de l'opérateur, qui ne ressent aucune commotion; l'électricité de nom contraire s'écoule par la pointe et neutralise sans bruit l'électricité du pôle.



*Fig. 276.* — Expérience montrant le mode d'action d'un paratonnerre.

Le mode d'action d'un paratonnerre est analogue à celui de la pointe précédente. Lorsqu'un nuage orageux, électrisé positivement par exemple, se trouve au-dessus d'un paratonnerre, l'électricité négative développée par influence s'écoule silencieusement par la pointe dans l'atmosphère et va décharger partiellement le nuage, qui devient ainsi moins dangereux.

**Effets du paratonnerre.** — Outre l'*effet préventif* que nous venons de signaler, le paratonnerre exerce un *effet préservatif* si la foudre tombe malgré la pointe. Dans ce cas, la foudre frappe la tige du paratonnerre de préférence aux autres parties de l'édifice, et l'électricité s'écoule dans le sol par le conducteur sans aucun dommage pour l'édifice.

On admet généralement qu'une tige de paratonnerre protège autour d'elle un espace circulaire d'un rayon double de la hauteur de cette tige, mais cette règle ne repose sur aucune donnée certaine. Quoi qu'il en soit, la condition essentielle pour qu'un paratonnerre soit réellement efficace, c'est que la communication entre la pointe et le sol soit le

plus intime possible : un paratonnerre en mauvaise communication avec le sol est plus dangereux pour un édifice que l'absence de paratonnerre.

**197. Paratonnerre de Melsens.** — Le paratonnerre de Melsens repose sur la considération des écrans électriques : *les corps placés à l'intérieur d'un conducteur communiquant avec le sol sont soustraits à l'influence des corps électrisés extérieurs.* Il n'est pas nécessaire, comme nous l'avons vu, que le conducteur soit continu pour former écran électrique ; un simple grillage suffit.

Pour réaliser cette disposition, on enveloppe l'édifice à préserver d'un réseau métallique en communication parfaite

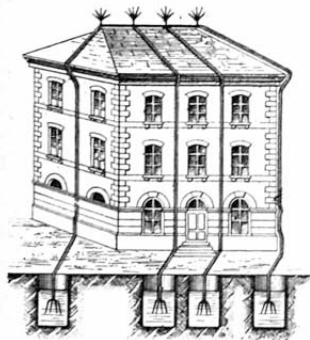


Fig. 277. — Installation d'un paratonnerre de Melsens.

avec le sol (fig. 277). Le réseau est constitué par de simples fils de fer galvanisé que l'on fait courir tout le long du faite des toits, des angles des murs, et que l'on relie métalliquement entre eux et avec les pièces métalliques de l'édifice (gouttières, toitures, conduites d'eau et de gaz). La communication avec le sol est assurée soit par des tubes de fonte enfoncés dans le sol humide et auxquels vient se souder le conducteur, soit par de

larges plaques plongeant dans l'eau d'un puits ou d'une nappe aquifère souterraine. Pour plus de sûreté, on munit toutes les intersections des conducteurs à la partie supérieure de houppes de pointes fines en cuivre ; ces pointes jouent le rôle de petits paratonnerres ; elles laissent écouler l'électricité développée par influence sur l'édifice, et empêchent ainsi les accumulations de charges qui provoquent les coups de foudre.

Les paratonnerres de Melsens ont été employés pour la première fois à Bruxelles ; ils sont moins coûteux et paraissent au moins aussi efficaces que le paratonnerre de Franklin.

## RÉSUMÉ DU CHAPITRE XXI

Tout conducteur isolé, placé dans l'atmosphère par un temps serein, s'électrise négativement du côté du ciel et positivement du côté du sol. De plus, son potentiel est positif. Pour déterminer approximativement le potentiel en un point de l'atmosphère, on se sert de l'électromètre de Saussure. C'est un électroscope à feuilles d'or dont le bouton est remplacé par une longue tige terminée en pointe. Si l'on élève cet instrument dans l'atmosphère par un temps serein, on constate que le potentiel en un point quelconque est toujours positif et qu'il augmente avec l'altitude.

Les *orages* sont produits par des nuages électrisés. Les *éclairs* sont de gigantesques étincelles ramifiées qui éclatent soit entre deux nuages électrisés, soit entre un nuage électrisé et le sol. Le *tonnerre* est le bruit qui accompagne la décharge ; il n'est pas perçu en même temps que l'éclair, mais au bout d'un temps plus ou moins long, parce que le son se propage avec une vitesse incomparablement moins grande que la lumière.

Les effets de la foudre sont en grand ceux des décharges ordinaires : fusion des conducteurs, rupture des mauvais conducteurs, foudroiement des hommes et des animaux, formation des fulgurites.

Les *paratonnerres* protègent les édifices contre la foudre. Celui de Franklin se compose d'une tige verticale terminée par une pointe inoxydable et communiquant par l'intermédiaire d'un conducteur en fils de cuivre avec l'eau d'un puits. Son principe repose sur le pouvoir des pointes. De l'électricité de nom contraire à celle du nuage électrisé s'écoule par la pointe et va décharger partiellement le nuage (effet préventif). Le paratonnerre de Melsens joue le rôle d'un écran électrique : l'édifice est enveloppé d'un réseau de fils de fer en communication parfaite avec le sol.

---

# ÉLECTRICITÉ DYNAMIQUE

## CHAPITRE XXII

### PILES HYDRO-ÉLECTRIQUES

**198. Définition.** — Les piles hydro-électriques sont des sources d'électricité dans lesquelles l'énergie électrique résulte de la transformation de l'énergie des réactions chimiques. A l'inverse des machines électrostatiques, dont le débit est très faible et le potentiel élevé, les piles sont capables de débiter de grandes quantités d'électricité sous un faible potentiel.

**199. Élément de pile.** — Soit un vase contenant de l'eau légèrement acidulée par de l'acide sulfurique (*fig. 278*). Plongeons dans le liquide une lame de cuivre et une lame de zinc pur, et fixons à chacune de ces lames un fil de cuivre : nous avons ainsi formé un *élément de pile*. Les lames métalliques s'appellent les *électrodes*; les fils de cuivre

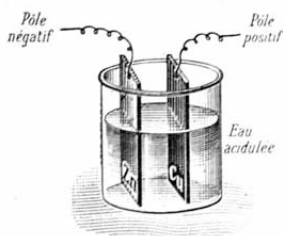


Fig. 278. — Élément de pile.

sont les *pôles* de l'élément. Une réunion d'éléments convenablement associés constitue une *pile*.

**200. Force électromotrice.** — L'élément ainsi construit est une source d'électricité; ses deux pôles sont électrisés, et il existe entre eux une différence de potentiel qui reste constante tant que l'on maintient les deux pôles *écartés*. Cette différence de potentiel s'appelle la *force électromotrice* de l'élément de pile; elle est d'environ *un volt*. Le pôle en contact avec la lame de cuivre est celui dont le potentiel est le plus élevé; on lui donne le nom de *pôle positif* ou d'*anode*; le pôle en contact avec la lame de zinc s'appelle le *pôle négatif* ou la *cathode*.

Un élément de pile peut être construit avec un liquide quelconque dans lequel on plonge deux conducteurs inégalement attaqués par le liquide. Le pôle négatif est toujours du côté de l'électrode la plus attaquée; le pôle positif du côté de l'autre électrode.

La force électromotrice dépend de la nature des électrodes et du liquide qui les baigne; mais elle est complètement indépendante de la forme des électrodes, de leur grandeur et de la distance qui les sépare. Un élément de pile est donc défini par la nature des deux électrodes et du liquide qui les baigne; il est caractérisé par sa force électromotrice.

La force électromotrice d'un élément de pile est trop faible pour que le rapprochement des pôles jusqu'au contact produise une étincelle visible. Si l'on reliait l'un des pôles à la boule d'un électroscope à feuilles d'or, l'autre pôle étant en communication avec le sol, on n'observerait aucun écart, la charge transmise aux feuilles d'or étant trop faible pour déterminer leur divergence. On peut toutefois mettre cette force électromotrice en évidence en se servant de l'électroscope condensateur de Volta (177). Après avoir



réuni simultanément les deux pôles de l'élément de pile aux

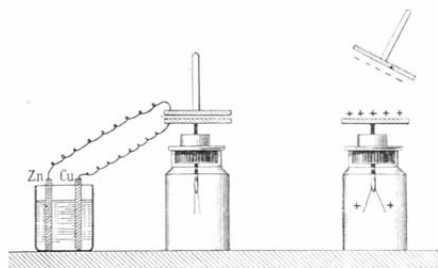


Fig. 279. — Expérience mettant en évidence la force électromotrice d'un élément de pile.

deux plateaux (fig. 279), on enlève le plateau supérieur ; les feuilles divergent, indiquant ainsi que le plateau inférieur s'est chargé d'électricité. On peut constater en même temps que le plateau supérieur s'est

électrisé et que son électricité est contraire à celle du plateau inférieur. La charge négative appartient au plateau qui a été relié au pôle du zinc ou du métal le plus attaqué par le liquide. Si l'on répète l'expérience avec un élément de pile de même constitution, en faisant varier chaque fois la forme, la grandeur ou la distance des électrodes, les feuilles d'or accusent toujours la même divergence.

Nous verrons dans le tome III que la force électromotrice d'un élément de pile se mesure très exactement à l'aide d'instruments appelés *électromètres*.

**201. Production du courant électrique.** — Réunissons

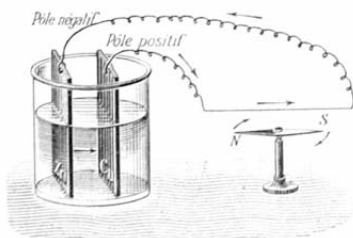


Fig. 280. — Production du courant électrique.

les deux fils métalliques qui forment les deux pôles d'un élément de pile (fig. 280) ; l'équilibre électrique ne peut s'établir dans un pareil système. Comme le potentiel du pôle positif est plus élevé que celui du pôle négatif, l'élec-

tricité positive se met en mouvement dans le conducteur

extérieur, en allant du pôle positif vers le pôle négatif. Ce mouvement d'électricité ne pourrait cesser que si le potentiel devenait constant dans tout le circuit, mais cette égalisation de potentiel n'a pas lieu à cause des réactions chimiques qui se produisent dès que les deux pôles sont réunis. Dans l'élément zinc-cuivre que nous avons considéré, le zinc est oxydé, puis transformé en sulfate de zinc; de l'hydrogène se dégage sous forme de bulles le long de la lame de cuivre. Par cette dépense d'énergie chimique, l'élément de pile maintient constamment son pôle positif à un potentiel plus élevé que son pôle négatif, de sorte qu'il se produit un mouvement continu d'électricité positive dans le conducteur extérieur et dans l'élément de pile. Ce mouvement d'électricité s'appelle *courant électrique*; il est accompagné de manifestations particulières d'énergie, parmi lesquelles nous citerons la déviation d'une aiguille aimantée (*fig. 280*).

Nous n'avons considéré jusqu'à présent que la marche de l'électricité positive; il est évident qu'un courant d'électricité négative parcourt le circuit en sens inverse du courant d'électricité positive. Par convention et pour simplifier, on suppose toujours que l'électricité négative ne se déplace pas et que l'électricité positive seule voyage. On appelle, par suite, *sens du courant*, le sens du déplacement de l'électricité positive; il a lieu du pôle positif au pôle négatif dans le conducteur extérieur aux deux pôles, et du pôle négatif au pôle positif à l'intérieur de l'élément de pile.

REMARQUE. — Un élément de pile dont les pôles sont réunis constitue ce que l'on appelle un *circuit fermé*. Dans un circuit fermé, une fraction de la force électromotrice de l'élément de pile est absorbée par la résistance que ses électrodes et

son liquide opposent au passage du courant, l'autre partie reste disponible dans le conducteur extérieur sous forme de force électromotrice *efficace* entre les deux pôles. Il en résulte que la différence de potentiel entre les deux pôles d'un élément de pile en circuit fermé est toujours *plus petite* que la différence de potentiel existant entre ses pôles en *circuit ouvert*, lorsque les deux électrodes ne sont pas réunies par un conducteur. Nous verrons plus tard que ces deux différences de potentiel sont reliées entre elles par une relation simple.

**202. Premières notions sur les propriétés du courant électrique.** — Le courant électrique se produit, comme une décharge électrostatique, sous l'influence d'une différence de potentiel entre deux conducteurs que l'on met en communication. Seulement, tandis que dans la décharge, l'échange d'électricités s'effectue dans un temps très court à cause de l'égalisation rapide des potentiels des conducteurs, le mouvement électrique qui se produit quand on réunit les deux pôles d'un élément de pile dont la production d'électricité est continue, donne lieu à une circulation continue d'électricité. Cette circulation est telle que chaque section du circuit est traversée au même instant par la même quantité d'électricité.

Une comparaison simple va nous permettre de nous rendre compte des éléments principaux qu'il y a à consi-

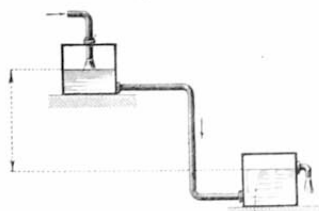


Fig. 281. — Comparaison d'un courant liquide avec un courant électrique.

dérer dans l'étude d'un courant électrique. Soient deux réservoirs situés à des hauteurs différentes et réunis par un tuyau (*fig. 281*). Supposons qu'on y mette de l'eau et qu'on établisse entre les niveaux de l'eau une différence constante. Il y aura dans le tuyau de com-

munication production d'un courant constant, qui sera caractérisé par la *différence des niveaux* et par le *débit*. De plus, ce tuyau agit par la *résistance* qu'il oppose à l'écoulement.

Dans l'étude d'un courant électrique on doit considérer de même la *différence de potentiel* existant entre les deux extrémités de l'élément de pile qui fournit le courant, le *débit* et la *résistance* du circuit.

1° *Force électromotrice*. — La différence de potentiel entre les deux pôles d'un élément de pile en circuit ouvert agit en réalité comme force produisant le courant ; c'est pourquoi on lui a donné le nom de *force électromotrice*. On l'appelle aussi le *voltage* entre les deux pôles.

Les différences de potentiel s'expriment en *volts*. Le volt représente à peu près la force électromotrice d'un élément zinc-cuivre-eau acidulée, en circuit ouvert.

2° *Intensité*. — L'intensité du courant est la quantité d'électricité qui traverse par seconde une section quelconque du circuit.

L'unité d'intensité a reçu le nom d'*ampère* ; elle correspond à un débit d'un coulomb par seconde. Nous verrons plus loin comment on définit pratiquement l'ampère (222).

3° *Résistance*. — La résistance qu'oppose le circuit au mouvement de l'électricité s'évalue en *ohms*.

L'ohm est la résistance opposée à un courant électrique constant par une colonne de mercure de 14 grammes-masse, 4521, d'une section transversale constante, et d'une longueur de 106<sup>cm</sup>, 3 à 0°.

On dira qu'un conducteur a une résistance de 10 ohms, par exemple, si sa résistance est 10 fois plus grande que celle de la colonne de mercure définie comme il vient d'être dit.

REMARQUES. — 1° Lorsque le courant fourni par un élément de pile ne produit aucun travail particulier, il existe une relation très simple entre la force électromotrice  $E$  de l'élément de pile en circuit ouvert, la résistance totale  $R + r$  du circuit ( $R$  désignant la résistance intérieure de l'élément,  $r$  la résistance extérieure) et l'intensité  $I$  du courant fourni par l'élément :

$$I = \frac{E}{R + r}.$$

Cette relation, connue sous le nom de loi d'Ohm, exprime que l'intensité du courant exprimée en ampères est égale à la force électromotrice exprimée en volts divisée par la résistance totale exprimée en ohms.

2° Les lois fondamentales du courant électrique, ainsi que le travail et la puissance d'un courant, les différentes manières d'associer les éléments de pile, etc., seront étudiés dans le tome III.

**203. Historique des piles hydro-électriques.** — La construction des éléments de piles hydro-électriques a eu pour point de départ une série d'expériences de Galvani et de Volta.

En 1786, Galvani, médecin de Bologne, fut amené par plusieurs observations à exécuter une expérience célèbre que l'on répète dans les cours de la manière suivante :

On coupe une grenouille vivante au-dessous des membres antérieurs, et l'on met

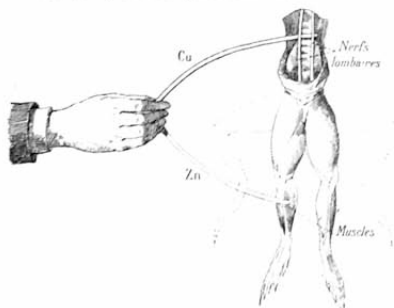


Fig. 282. — Expérience de Galvani.

à nu les deux nerfs lombaires, situés le long de la colonne vertébrale (fig. 282). On prend alors un arc métallique formé par une lame de cuivre et une lame de zinc et on passe l'une quelconque des extrémités de cet arc sous les nerfs lombaires. Chaque fois que l'on touche avec l'autre extrémité de l'arc le muscle mis à nu de la cuisse, on observe une vive contraction des pattes. — Pour expliquer cette expérience, Galvani admit dans les muscles et les

nerfs l'existence d'électricités contraires produites par un phénomène corrélatif de la vie ; les muscles et les nerfs formeraient ainsi les armatures d'une sorte de condensateur dont l'arc métallique produirait la décharge.

Volta, professeur à Pavie, en répétant et variant l'expérience de Galvani, fut frappé du fait que les contractions sont beaucoup moins vives avec un arc formé d'un seul métal qu'avec un arc formé de deux métaux. Il émit alors une opinion contraire à celle de Galvani. Pour Volta, les électricités contraires ne résidaient pas dans la grenouille, mais elles se développaient au contact des métaux différents et se combinaient à travers les organes conducteurs interposés en provoquant les contractions que donne toute décharge électrique dans ces conditions.

Galvani et Volta soutinrent leurs opinions par diverses expériences. Le premier montra que l'on obtient encore de faibles secousses en repliant une patte de la grenouille et en faisant toucher directement les muscles de la cnisse à la moelle épinière mise à nu. Volta, ayant reconnu l'exactitude de cette expérience, l'expliqua en étendant son hypothèse sur le contact de deux métaux à deux corps hétérogènes quelconques, et il posa un principe que l'on énonce aujourd'hui de la manière suivante :

**PRINCIPE DE VOLTA.** — *Le contact de deux substances hétérogènes quelconques suffit pour établir entre elles une différence de potentiel. Cette différence varie avec la nature des deux substances et leur température ; mais elle est indépendante de leur forme, de leurs dimensions, de l'étendue des surfaces en contact et de la valeur absolue du potentiel sur chacune d'elles.* Quant à la quantité d'électricité produite par le contact, elle est beaucoup plus grande quand on emploie des métaux que lorsqu'on prend d'autres substances.

Des expériences postérieures à celles de Galvani et de Volta ont montré l'existence d'une électricité propre aux animaux, ce qui explique en partie les expériences de Galvani ; d'un autre côté, des expériences délicates établissent que le contact de deux corps hétérogènes, organiques ou inorganiques, développe de l'électricité. On doit donc, en somme, donner raison à Galvani et à Volta. Toutefois, l'opinion de Volta a été beaucoup plus féconde, puisqu'elle l'a conduit à l'invention de la pile.

**Pile de Volta.** — La pile de Volta se compose d'une suite

d'éléments empilés dans le même ordre (fig. 283). Chaque

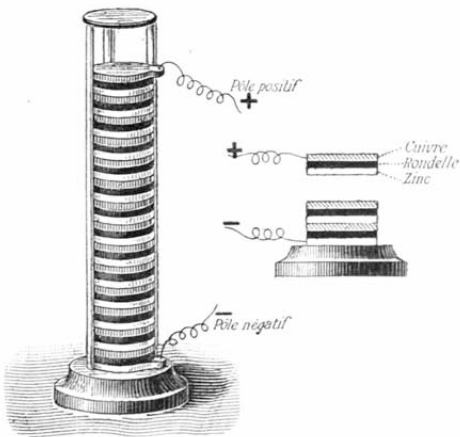


Fig. 283. — Pile de Volta.

élément est constitué par un disque de zinc et un disque de cuivre séparés par une rondelle de drap imprégné d'eau acidulée par l'acide sulfurique. La colonne formée par ces éléments est maintenue par trois montants en verre. Enfin, aux disques extrêmes zinc et cuivre sont fixés

des fils métalliques qui sont les pôles de la pile.

Dans une pile dont les éléments sont associés de cette manière, la différence de potentiel entre les deux pôles ou la force électromotrice de la pile est la somme des forces électromotrices de chaque élément considéré séparément. Le pôle positif ou pôle de plus haut potentiel est le fil fixé au disque de cuivre supérieur ; le pôle négatif ou de plus bas potentiel, le fil fixé au disque de zinc inférieur.

La pile de Volta n'est plus employée. Son principal inconvénient était de soumettre les rondelles de drap à une compression ; le liquide qui en était exprimé ruisselait sur la surface extérieure de la colonne et établissait des communications entre les éléments, ce qui affaiblissait rapidement le courant.

**Théorie de l'élément de pile.** — Deux théories ont été émises pour expliquer les phénomènes présentés par les éléments de pile. Dans la théorie de Fabroni, la production d'électricité est attribuée aux actions chimiques qui s'exercent entre les métaux et les liquides. Dans la théorie de Volta, qui est la plus généralement adoptée, le point de départ est la différence de potentiel qui se produit par le contact entre deux substances de nature différente. La force

électromotrice de l'élément zinc-cuivre-eau acidulée serait alors la somme des forces électromotrices créées au contact de l'eau acidulée et du cuivre d'une part, du zinc et de l'eau acidulée d'autre part. La discussion approfondie de ces théories sortirait du cadre de cet ouvrage.

**204. Premières notions sur la polarisation des électrodes.** — Reprenons l'élément zinc-cuivre-eau acidulée que nous avons considéré précédemment. Si l'on réunit les deux pôles de cet élément, l'expérience montre que le courant produit s'affaiblit rapidement. Cet affaiblissement est dû en grande partie à ce que l'hydrogène qui se dégage forme un grand nombre de petites bulles adhérentes à la surface de la lame de cuivre. Or l'hydrogène étant plus oxydable que le zinc, forme avec la lame de zinc un véritable élément, dans lequel cette lame constitue l'électrode positive, tandis que l'hydrogène joue le rôle d'électrode négative. Un courant de sens contraire au premier tend donc à se produire; autrement dit, il se crée une nouvelle force électromotrice (*force contre-électromotrice*), inverse de celle de l'élément zinc-cuivre. Au bout de peu de temps, les deux forces électromotrices se font sensiblement équilibre et le courant cesse presque complètement. On dit alors que les électrodes de l'élément de pile sont *polarisées* et on désigne ce phénomène sous le nom de *polarisation*.

Si l'on promène un pinceau à la surface de la lame de cuivre de manière à enlever l'hydrogène qui y adhère, l'élément de pile reprend sa force électromotrice primitive, puis au bout de quelque temps les phénomènes de polarisation se reproduisent de nouveau.

Le procédé le plus pratique pour empêcher le dépôt d'hydrogène sur la lame de cuivre est d'absorber ce gaz au fur et à mesure de sa formation à l'aide de composés



riches en oxygène ou en chlore. Ces composés portent le nom de corps *dépolarisants*, et leur emploi fournit des éléments de pile à *courant sensiblement constant*. Suivant que le dépolarisant est employé à l'état liquide ou à l'état solide, l'élément de pile est dit à *dépolarisant liquide* ou à *dépolarisant solide*. Nous n'étudierons que les éléments de pile qui sont d'un usage courant.

#### ÉLÉMENTS DE PILE A DÉPOLARISANT LIQUIDE

**205. Élément Daniell.** — Cet élément, construit par Daniell en 1836, est le plus ancien des éléments à courant constant; il a pour dépolarisant le *sulfate de cuivre* en dissolution concentrée.

La figure 284 représente la forme la plus usitée de l'élé-

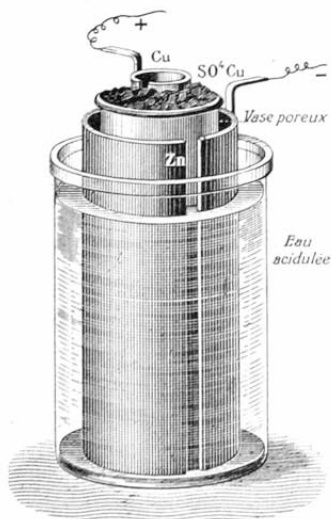


Fig. 284. — Élément Daniell.

ment Daniell. Il comprend, de dehors en dedans : un vase de verre ou de faïence; une lame de zinc amalgamé (206), contournée en forme de cylindre; un vase en terre poreuse ou en porcelaine dégorée; et enfin un cylindre de cuivre. Le vase extérieur contient de l'eau acidulée par  $\frac{1}{10}$  environ d'acide sulfurique ou une dissolution moyennement concentrée de sulfate de zinc; le vase poreux, une dissolution de sulfate de

cuivre que l'on entretient *saturée* en plaçant des cristaux

de sulfate de cuivre sur une galerie disposée à cet effet à la partie supérieure de l'élément. Les pôles sont constitués par deux lames minces de cuivre fixées, l'une à l'électrode de zinc, l'autre à l'électrode de cuivre. La force électromotrice de cet élément (en circuit ouvert) est égale à 1 volt,07.

Si l'on ferme le circuit en réunissant les pôles par un fil conducteur, l'élément fournit un courant dont l'intensité reste sensiblement constante ; en même temps il se produit des réactions chimiques. L'acide sulfurique hydraté et le sulfate de cuivre sont tous deux décomposés par le passage du courant, le premier en  $\text{SO}^4$  et  $\text{H}^2$ , le second en  $\text{SO}^4$  et  $\text{Cu}$ . Le radical  $\text{SO}^4$  provenant de la décomposition de l'acide sulfurique se porte sur l'électrode en zinc et forme du sulfate de zinc ; l'hydrogène passe à travers le vase poreux, s'unit au radical  $\text{SO}^4$  provenant de  $\text{SO}^4\text{Cu}$  et reforme de l'acide sulfurique. Quant au cuivre mis en liberté, il se dépose sur l'électrode en cuivre, dont la nature n'est ainsi nullement modifiée. En résumé, il n'y a pas d'appauvrissement en acide sulfurique : l'ensemble des réactions chimiques a pour résultat une simple substitution du zinc de l'électrode négative au cuivre du sulfate de cuivre.

L'élément Daniell présente l'avantage d'avoir une force électromotrice bien constante ; en revanche, cette force électromotrice est relativement faible. De plus, il se produit des variations de résistance intérieure, ce qui fait varier légèrement dans un sens ou dans l'autre la quantité d'électricité fournie par l'élément de pile pendant chaque unité de temps. Ces variations sont dues à diverses causes : enrichissement en sulfate de zinc de la dissolution excitatrice, mélange des deux dissolutions de sulfate à travers le vase poreux, formation de sels grimpants ( $\text{SO}^4\text{Zn}$ ) le long du vase poreux. Enfin l'élément Daniell a l'inconvénient de consom-

mer en circuit ouvert ; la dissolution de sulfate de cuivre traverse le vase poreux et vient en contact avec le zinc, de là la formation d'un dépôt de cuivre à l'état de boue, ce qui occasionne une dépense en pure perte.

**Élément Callaud.** — L'élément Callaud est une modification de l'élément Daniell dans lequel on a supprimé le vase poreux afin de diminuer la résistance intérieure ; les deux liquides se séparent simplement par suite de la différence de leurs densités.



Fig. 285. — Élément Callaud ordinaire.

Le cylindre en zinc amalgamé est supporté par des crochets s'appuyant sur le bord du vase contenant les liquides ; sa hauteur ne dépasse pas la moitié de celle du vase (*fig.* 285).

Au fond du vase est une bande mince de cuivre enroulée en cylindre et fixée à une tige verticale de cuivre protégée

par de la gutta-percha contre l'action destructive des liquides. — On verse d'abord de l'eau pure ou mieux une dissolution faible de sulfate de zinc et l'on amène au-dessous, avec un siphon, une dissolution saturée de sulfate de cuivre. Quand cette dernière dissolution s'épuise, ce que l'on reconnaît à ce qu'elle devient moins bleue, on enlève un peu d'eau à la partie supérieure du vase et l'on ajoute une nouvelle quantité de sulfate de cuivre en dissolution concentrée.

Dans un modèle tout récent de l'élément Callaud, la construction est un peu différente (*fig.* 286). L'électrode de cuivre est entourée d'un gobelet en verre dans lequel pénètre le goulot d'un ballon rempli de cristaux de sulfate de cui-

vre. Le bouchon qui ferme le ballon est traversé par un tube de verre. — On remplit le vase d'eau pure jusqu'au niveau supérieur du cylindre de zinc ; l'eau monte dans le ballon d'une certaine quantité ; du sulfate de cuivre se dissout, et la dissolution, plus dense que l'eau, déplace peu à peu cette dernière et remplit le gobelet. La pile est alors prête à fonctionner.

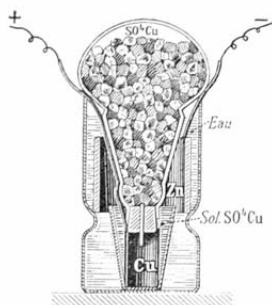


Fig. 286. — Élément Callaud (nouveau modèle).

faible. De plus la diffusion des liquides est moindre que lorsqu'ils sont séparés par un vase poreux.

**206. Élément Bunsen.** — L'élément Bunsen diffère essentiellement de l'élément Daniell en ce que le dépolarisant est de l'acide azotique et l'électrode positive du *charbon de cornues*.

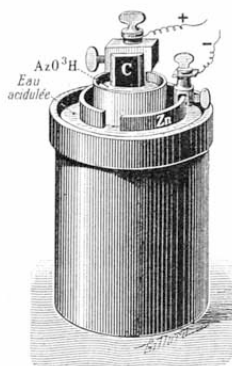


Fig. 287. — Élément Bunsen.

Il comprend : 1° un vase en grès contenant de l'eau acidulée par l'acide sulfurique (*fig. 287*) ; 2° une lame de zinc amalgamé, recourbée en forme de cylindre et servant d'électrode négative ; 3° un vase poreux contenant de l'acide azotique ; 4° un parallélépipède de charbon de cornues servant d'électrode positive. Le pôle positif est une pince à vis en cuivre serrée à la partie supérieure du charbon ; le pôle négatif est une pince à vis plus petite fixée au zinc. La force électromo-

trice d'un élément Bunsen est de 1 volt,8. La résistance intérieure de l'élément de 20<sup>cm</sup> de hauteur est de 0,08 à 0,11 d'ohm.

Quand le circuit est fermé, il se produit une décomposition de l'acide sulfurique hydraté :  $\text{SO}^4$  s'unit au zinc comme dans l'élément Daniell et forme du sulfate de zinc; l'hydrogène réduit l'acide azotique en produisant de l'eau et des composés oxygénés de l'azote, parmi lesquels domine le peroxyde  $\text{AzO}^2$ , et qui se dégagent dans l'air.

L'élément Bunsen est plus puissant que l'élément Daniell, mais il ne fournit un courant sensiblement constant que pendant quelques heures. Après ce temps, le courant s'affaiblit rapidement; la solution excitatrice s'appauvrit en acide sulfurique et s'enrichit en sulfate de zinc, ce qui a pour effet d'augmenter la résistance de l'élément, la dissolution de sulfate de zinc à son maximum de saturation étant moins conductrice que lorsqu'elle est étendue d'eau. D'un autre côté, l'acide azotique devient de plus en plus étendu; quand il est trop dilué, l'hydrogène ne le réduit plus assez rapidement et l'électrode de charbon se polarise. Un inconvénient d'un autre genre présenté par l'élément Bunsen est le dégagement de vapeurs nitreuses, dégagement qui rend l'atmosphère insupportable quand les éléments sont un peu nombreux.

**Montage des éléments Bunsen.** — Comme les éléments Bunsen sont très employés dans les laboratoires, nous allons donner quelques renseignements pratiques pour faciliter leur montage.

1<sup>o</sup> L'eau acidulée usitée couramment est au vingtième, c'est-à-dire qu'elle contient 1 vol d'acide pour 20 vol d'eau; on la prépare dans un vase à part, en versant l'acide dans l'eau par un mince filet et en agitant constamment le mélange. Le niveau de l'eau acidulée dans le vase extérieur doit arriver à environ 1<sup>cm</sup> du bord. Ce liquide peut servir pendant 8 à 9<sup>h</sup>, après quoi on le jette pour en employer de nouveau.

On obtient de meilleurs résultats en employant comme liquide excitateur un mélange de 20 vol d'eau, 1 vol d'acide sulfurique et 1 vol d'acide chlorhydrique (d'Arsonval).

2° Le zinc doit être bien amalgamé ; sa surface doit être brillante et sans taches.

Pour amalgamer un zinc, on le trempe d'abord dans l'eau et on le brosse jusqu'à ce que sa surface soit complètement mouillée, puis on le plonge dans une cuvette demi-cylindrique en bois ou en fonte émaillée, contenant un peu de mercure et de l'eau acidulée avec  $\frac{1}{10}$  d'acide sulfurique. On retourne le zinc sur lui-même et, en se servant d'un chiffon ou d'une brosse en fils de cuivre, on frotte en même temps la surface du zinc jusqu'à ce qu'elle soit partout recouverte d'amalgame brillant. Il ne reste plus qu'à laver le zinc et à le mettre égoutter.

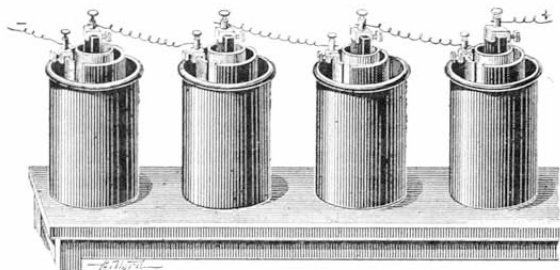


Fig. 288. — Pile d'éléments Bunsen (disposition dite en série).

Le zinc amalgamé, de même que le zinc pur, n'est sensiblement attaqué par l'eau acidulée qu'en circuit fermé. Le zinc ordinaire du commerce, au contraire, s'use rapidement en circuit ouvert ; il contient des métaux étrangers tels que le plomb qui forment des éléments locaux dans lesquels le zinc est l'électrode attaquée.

3° L'acide azotique que l'on met dans le vase poreux est de l'acide du commerce de 36 à 40° Baumé ; son niveau doit être à environ 2<sup>cm</sup> du bord. Il peut servir jusqu'à 28° Baumé.

4° Il est bon de s'assurer avant de monter l'élément que les pinces sont bien propres ; on les décape au besoin avec du papier de verre. Quand l'élément a déjà servi un certain temps, il est bon également de limer la surface du charbon, puis de le chauffer fortement.

5° Enfin, lorsqu'on veut former une *pile* d'éléments, on

les dispose en nombre voulu sur un plancher bien sec et l'on réunit les pôles de noms contraires par des pinces d'assemblage, comme le montre la figure 288.

REMARQUE. — L'élément Bunsen a été, en réalité, imaginé par Grove (1839). Ce physicien employait comme électrode positive une lame de platine recourbée en S. La force électromotrice était de 1<sup>volt</sup>,96. Malgré cette grande force électromotrice, l'usage de l'élément Grove était peu pratique à cause du prix élevé du platine. Bunsen eut l'idée de remplacer le platine par le charbon de cornues, et l'usage de l'élément ainsi modifié s'est répandu depuis rapidement.

**207. Élément au bichromate.** — L'élément au bichromate, imaginé par Poggendorff, a comme liquide dépolarisant une dissolution de bichromate de potassium ou de sodium que l'on mélange ordinairement au liquide actif. Parmi les nombreuses formes qui ont été proposées pour cet élément, nous décrirons les deux plus usitées : l'élément Grenet et l'élément Radiguet.

**Élément Grenet.** — Le modèle Grenet, appelé aussi



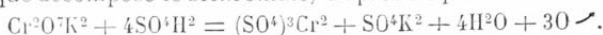
Fig. 259. — Élément Grenet au bichromate.

*pile-bouteille*, se compose d'une bouteille sphérique en verre (fig. 289), contenant le mélange du liquide actif et du liquide dépolarisant (eau 1000<sup>gr</sup>, acide sulfurique 300<sup>gr</sup>, bichromate 100<sup>gr</sup>). Le couvercle de la bouteille est en ébène ; il porte deux plaques de charbon parallèles qui plongent dans la dissolution. Entre ces deux plaques est une lame de zinc amalgamé que l'on peut sortir du liquide à

l'aide d'une glissière maintenue par une vis de pression.

Les pôles sont constitués par deux bornes communiquant l'une avec le zinc, l'autre avec les charbons. La force électromotrice est d'environ 2 volts.

Voici les principales réactions chimiques qui se produisent dans cet élément. Une partie de l'acide sulfurique est décomposée par le courant en  $\text{SO}^2$  et  $\text{H}^2$ ;  $\text{SO}^2$  attaque le zinc et forme du sulfate de zinc. Une autre partie de l'acide sulfurique décompose le bichromate, d'après l'équation suivante :



L'oxygène produit dans cette réaction s'unit à l'hydrogène et supprime la polarisation. Le sulfate de chrome et le sulfate de potassium forment de l'*alun de chrome*, qui se dépose en octaèdres violets au fond de la bouteille et sur les charbons.

L'élément Grenet peut fonctionner pendant 9 à 10<sup>h</sup> sans qu'il soit nécessaire de renouveler le liquide ; il ne dégage

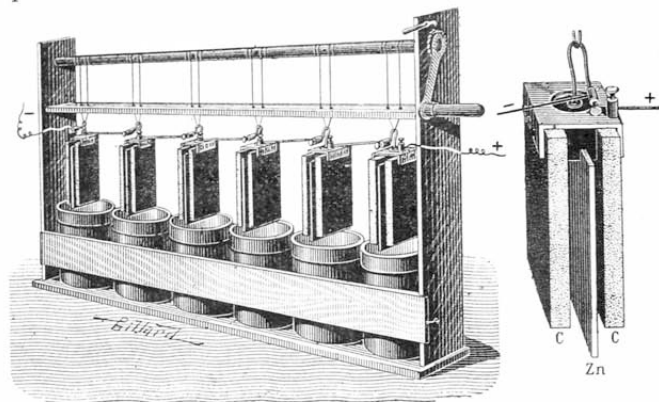


Fig. 290. — Batterie à treuil d'éléments Grenet.

ni odeur ni vapeurs acides ; de plus, c'est un élément puissant, à cause de sa grande force électromotrice et de sa faible résistance. En revanche, la polarisation n'y est pas complètement évitée, ce qui produit un affaiblissement assez rapide du courant.



La figure 290 représente une pile d'éléments Grenet à grande surface très usitée dans les laboratoires. Les vases ont la forme cylindrique ; les charbons et les zincs sont suspendus à une barre horizontale et peuvent être à volonté plongés dans les vases ou retirés du liquide à l'aide d'une manivelle.

**Élément Radiguet.** — Le modèle Radiguet ne diffère en principe de l'élément Bunsen que par la substitution du bichromate de potassium à l'acide azotique comme dépolarisant.

Il comprend un vase en grès, un charbon circulaire servant

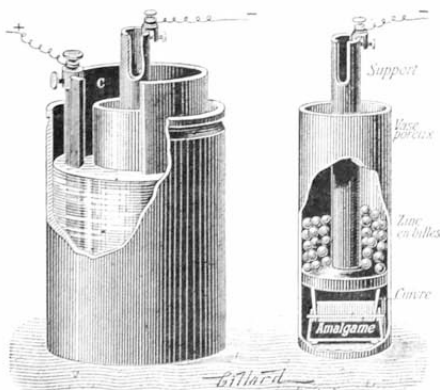


Fig. 291. — Élément Radiguet (pile domestique).

d'électrode positive, un vase poreux et un support à amalgamer le zinc qui sert d'électrode négative (fig. 291). Le support à amalgamer se compose d'un tube portant une sorte de corbeille destinée à recevoir le zinc sous forme de billes ou simplement de rognures. Sous

la corbeille, et reliée avec elle par deux tiges de cuivre, est une cuvette contenant un amalgame spécial destiné à entretenir l'amalgame du zinc. — Cet élément, connu sous le nom de *pile domestique*, est très pratique et toujours prêt à fonctionner ; il permet d'user les déchets de zinc. — Sa force électromotrice est de 2<sup>volts</sup>,43.

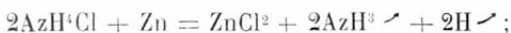
#### ÉLÉMENTS DE PILE A DÉPOLARISANT SOLIDE

**208. Élément Leclanché.** — Dans l'élément Leclanché les électrodes sont constituées, l'une par du zinc amalgamé, l'autre par du charbon. Le dépolarisant est le *bioxyde de*

*manganèse*, le liquide excitateur une dissolution de chlorure d'ammonium. La force électromotrice de l'élément est d'environ 1 volt,5.

Les principales réactions chimiques qui se produisent dans l'élément sont :

1° la réduction du chlorure d'ammonium par le zinc :



2° la réduction du bioxyde de manganèse par l'hydrogène ainsi mis en liberté :



Les modèles les plus usités de l'élément Leclanché sont l'élément à agglomérés, l'élément Leclanché-Barbier, et l'élément sec.

Élément à agglomérés. — L'électrode positive est une lame de charbon (*fig. 292*) enfouie entre deux plaques de charbon et de bioxyde de manganèse agglomérés avec de la gomme-laque à 300<sup>atm</sup> à 100°. L'électrode négative est une tige de zinc, serrée contre les plaques par des bandes de caoutchouc et isolée par l'interposition d'une plaque en bois. L'ensemble des électrodes et des plaques est placé dans un vase en verre de forme spéciale contenant la dissolution de chlorure d'ammonium.

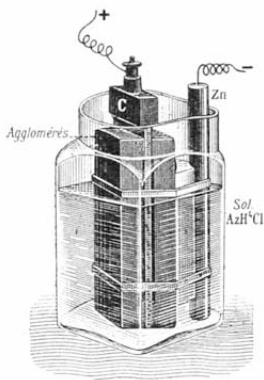


Fig. 292. — Élément Leclanché à agglomérés.

Les avantages de cet élément sont d'avoir une longue durée, de ne rien consommer en circuit ouvert, d'être d'un prix peu élevé et de ne pas geler par les froids rigou-

reux. En revanche, il finit par se polariser si on le laisse longtemps en circuit fermé; aussi l'emploie-t-on ordinairement lorsque l'on n'a besoin que d'un fonctionnement intermittent.

**Élément Leclanché-Barbier.** — Dans ce modèle, plus récent que le précédent, le mélange aggloméré de charbon et de bioxyde de manganèse est façonné en forme de cylindre creux (fig. 293). Ce cylindre est muni à sa partie supérieure

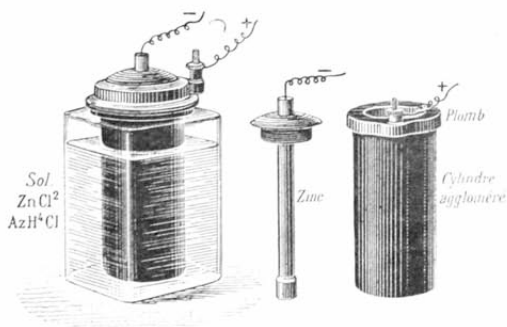


Fig. 293. — Élément Leclanché-Barbier.

d'un anneau de plomb dans lequel s'adapte un bouchon de bois portant la tige de zinc. Une bande de caoutchouc s'appuie à la fois sur l'anneau de plomb et sur le col du vase de manière à former joint hermétique. Le vase contient une dissolution saturée de chlorure de zinc et de chlorure d'ammonium.

**Élément sec.** — Il se compose d'un vase cylindrique en zinc à l'intérieur duquel est placé un cylindre aggloméré. La partie annulaire comprise entre ces deux électrodes est remplie par une pâte formée de plâtre gâché avec du chlorure d'ammonium; la cavité centrale du cylindre aggloméré reste vide.

Cet élément a l'avantage de pouvoir être transporté facilement et manié sans aucune précaution. Sa résistance varie de 0,3 à 0,6 ohm, suivant la grandeur.

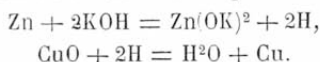
209. **Élément de Lalande et Chaperon.** — C'est un élément dans lequel le dépolarisant est l'oxyde de cuivre.



Fig. 294. — Élément de Lalande et Chaperon.

Il se compose d'un vase de verre (fig. 294) dont le fond est recouvert par de l'oxyde de cuivre surmonté d'une dissolution de potasse caustique à 30 ou 40 %. L'électrode positive est une lame de cuivre ou de fer disposée de manière à être recouverte par l'oxyde de cuivre; l'électrode négative est une spirale de zinc amalgamé. La force électromotrice est d'environ 0 volt,8.

L'élément de Lalande et Chaperon ne consomme pratiquement rien en circuit ouvert. En circuit fermé, le zinc se dissout dans la potasse caustique et forme du zincate de potassium, très soluble; l'hydrogène dégagé réduit l'oxyde de cuivre et précipite le cuivre à l'état métallique.



La résistance intérieure est très faible; le courant possède une très grande constance et l'élément ne nécessite aucun entretien jusqu'à complet épuisement.

#### APPLICATIONS DES PILES HYDRO-ÉLECTRIQUES

210. Les piles hydro-électriques ont été pendant longtemps les seules sources d'électricité dynamique. Aujourd'hui que l'on a des machines magnéto et dynamo-électriques puissantes, fournissant de l'électricité plus

économiquement, l'emploi des piles se restreint de plus en plus, surtout dans l'industrie.

On utilise les piles pour les expériences de laboratoire, pour actionner les sonneries électriques, les bobines d'induction; on les emploie en télégraphie, en téléphonie, dans les ateliers où l'on fait de la galvanoplastie, etc. Pour tous ces usages, les différents éléments de pile que nous avons étudiés conviennent plus ou moins suivant leur constance, leur durée, leur puissance, etc.

Pour les expériences de laboratoire et les usages médicaux, on a besoin de piles dont on règle facilement la marche; la question d'économie est peu importante; on emploie les éléments Bunsen ou les éléments au bichromate. La galvanoplastie, la dorure, l'argenture, etc., nécessitent des courants constants, fournis par des éléments d'entretien peu coûteux; les éléments Daniell et Callaud sont les plus employés. Les éléments Leclanché

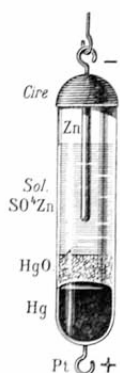


Fig. 295. — Élément - étalon de Gouy.

ne peuvent convenir que pour les usages intermittents ne demandant pas une grande dépense d'électricité (sonneries domestiques, appareils avertisseurs, téléphones domestiques). Enfin, en télégraphie, en téléphonie, on utilise principalement les éléments Daniell, Callaud, de Lalande, et, si les piles n'ont pas à travailler d'une façon continue, l'élément Leclanché.

**211. Éléments-étalons.** — Les éléments-étalons sont des éléments dont la force électromotrice est des plus constantes. Cette propriété est fait employer comme étalons dans la comparaison des forces électromotrices des divers éléments de pile. Nous décrirons celui de M. Gouy, tel qu'il est usité au laboratoire de la Sorbonne.

Il se compose d'un tube de verre contenant, de bas en haut: du mercure, de l'oxyde jaune de mercure et une dissolution de sulfate de zinc (fig. 295). L'électrode négative est un bâton de zinc amalgamé plongeant dans la dissolution de sulfate; l'électrode positive, un fil de platine qui pénètre par le fond du tube jusque dans le mercure et est recourbé à l'extérieur en forme de crochet. Enfin le tube est fermé par un bouchon bien ajusté et recouvert de cire.

La force électromotrice d'un élément Gouy est de 1 volt,389 à 17°.

### RÉSUMÉ DU CHAPITRE XXII

Les éléments hydro-électriques débitent des quantités d'électricité relativement grandes sous un faible potentiel. On obtient un élément en plongeant par exemple une lame de zinc et une lame de cuivre dans de l'eau acidulée par l'acide sulfurique et en fixant à chacune de ces lames un fil de cuivre. Les deux fils de cuivre s'électrisent et il existe entre eux une différence de potentiel constante (*force électromotrice*) qui caractérise l'élément de pile. Cette force électromotrice est très faible (environ 1 volt); on la met en évidence avec un électroscope condensateur. Si l'on réunit les deux fils de cuivre, il se produit dans le circuit un mouvement de l'électricité, mouvement qui est entretenu (*courant électrique*) par les réactions chimiques (formation de sulfate de zinc, dégagement d'hydrogène).

La force électromotrice d'un élément de pile s'évalue en *volts*; l'intensité du courant (quantité d'électricité par seconde), en *ampères*; la résistance du circuit, en *ohms*.

La construction des éléments de pile a pour origine les expériences de Galvani (réunion des systèmes nerveux et musculaire de la grenouille par un arc métallique) et de Volta (contact de deux substances hétérogènes). La pile de Volta se composait d'éléments empilés, constitués chacun par un disque de zinc et un disque de cuivre séparés par une rondelle de drap imprégné d'eau acidulée.

Le principal inconvénient des anciennes piles est l'affaiblissement progressif du courant dû à la polarisation des électrodes (dégagement d'hydrogène sur l'électrode positive). Dans les piles modernes, on absorbe l'hydrogène à l'aide d'un dépolarisant liquide ou solide.

Dans l'élément Daniell, le liquide attaquant le zinc est de l'eau acidulée, le liquide dépolarisant est une dissolution de sulfate de cuivre placée dans un vase poreux; l'électrode positive est un cylindre de cuivre. Il y a substitution du zinc de l'électrode négative au cuivre du sulfate de cuivre. La force électromotrice est constante, mais faible (1,07). La résistance intérieure est rendue moindre si les deux liquides sont séparés simplement grâce à leur différence de densités (élément Callaud).

L'*élément Bunsen* a comme dépolarisant l'acide azotique; l'électrode positive est un prisme de charbon de cornues. Il y a encore formation de sulfate de zinc; l'acide azotique est réduit par l'hydrogène. Force électromotrice 1<sup>r</sup>,8. Inconvénients: affaiblissement du courant par la variation de résistance des liquides, émanation de vapeurs nitreuses, etc.

Dans l'*élément au bichromate*, le liquide actif et le liquide dépolarisant sont mélangés (eau, acide sulfurique, bichromate alcalin); l'électrode négative est une lame de zinc placée entre deux lames de charbon parallèles. Force électromotrice 2<sup>r</sup>.

L'*élément Leclanché* est un élément à dépolarisant solide (bioxyde de manganèse); le liquide actif est une dissolution de chlorure d'ammonium; l'électrode positive est une plaque de charbon de cornues enfouie entre deux plaques de bioxyde et de charbon agglomérés. Force électromotrice 1<sup>r</sup>,5. Cet élément convient pour les fonctionnements intermittents.

Enfin l'*élément de Lalande et Chaperon* est aussi à dépolarisant solide (oxyde de cuivre). Le liquide actif est une dissolution de potasse dans laquelle plonge une spirale de zinc (électrode négative). L'oxyde de cuivre est réduit par l'hydrogène. Force électromotrice 0<sup>r</sup>,8.

L'usage des piles se restreint depuis l'invention des magnétos et dynamos. Les piles servent à actionner les téléphones, sonneries, bobines d'induction; à faire les expériences de laboratoire; en galvanoplastie, etc.

### EXERCICES SUR LE CHAPITRE XXII

57. Quelle est la force électromotrice d'un élément de pile sachant que l'intensité du courant qu'il fournit est de 3<sup>amp</sup>,6 et que la résistance totale de l'élément et du fil interpolaire est de 0<sup>ohm</sup>,5 ?

58. Un élément de pile a une force électromotrice égale à 1<sup>r</sup>,48 en circuit ouvert. La résistance totale de la pile et du circuit interpolaire est de 0<sup>ohm</sup>,25. Quelle quantité d'électricité évaluée en coulombs fournira le courant en une heure ?

### CHAPITRE XXIII

#### PILES THERMO-ÉLECTRIQUES

212. **Considérations générales.** — Les piles thermo-électriques sont des sources d'électricité dans lesquelles l'énergie

électrique résulte de la transformation de l'énergie calorifique. Leur force électromotrice est relativement faible, mais comme leur résistance intérieure est presque négligeable, elles peuvent néanmoins donner des courants assez intenses.

Le point de départ des piles thermo-électriques est l'ex-

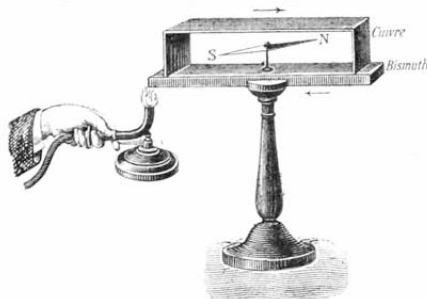


Fig. 296. — Expérience de Seebeck.

périence suivante due à Seebeck (1821).

**Expérience de Seebeck.** — Un barreau de bismuth est soudé à une lame de cuivre deux fois recourbée (fig. 296).

Dans le rectangle ainsi formé est placée une aiguille aimantée mobile sur un pivot.

On oriente le rectangle dans la direction de l'aiguille et l'on chauffe légèrement l'une des soudures : l'aiguille est déviée, ce qui prouve l'existence d'un courant électrique. Le sens de la déviation permet, comme nous le verrons plus loin, de trouver le sens du courant ; il va du bismuth au cuivre en passant par la soudure chaude. On dit que le bismuth est *positif* par rapport au cuivre, le cuivre *néga-*  
*tif* par rapport au bismuth.

Le principe de Volta permet de se rendre compte de la production d'un courant dans cette expérience. D'après ce principe, le contact de deux métaux suffit pour établir entre eux une différence de potentiel qui ne dépend que de la nature de ces métaux et de leur température. Il en résulte que si toutes les régions du circuit constitué par le cuivre et le bismuth sont à la même température, il se produit aux



deux soudures des différences de potentiel égales entre elles. Ces différences étant de sens contraires, se font mutuellement équilibre. Mais si l'on chauffe l'une des soudures, les différences de potentiel aux deux soudures ne sont plus égales et il y a production d'un courant, qui est entretenu par l'énergie calorifique dépensée.

REMARQUE. — Les courants thermo-électriques peuvent être obtenus avec deux métaux quelconques, mais le sens du courant dépend de la nature des deux métaux associés. Quant à l'intensité du courant, elle augmente à mesure qu'on élève la température de la soudure chaude, mais cette augmentation n'a pas toujours lieu d'une façon continue. Le plus souvent, l'intensité atteint un maximum, puis décroît, devient nulle et enfin le courant change de sens. Ce phénomène, appelé phénomène de *l'inversion*, se produit à une température déterminée pour chaque élément thermo-électrique.

**213. Principales piles thermo-électriques.** — Les éléments thermo-électriques sont le plus souvent groupés de manière à former une pile. Ce groupement se fait en *série*, en reliant le pôle positif du premier élément au pôle négatif du second, le pôle positif du second au pôle négatif du troisième, etc. Le circuit est fermé par un fil qui réunit le pôle positif du dernier au pôle négatif du premier.

Nous étudierons, parmi les piles de laboratoire, la pile de Melloni, et parmi les piles industrielles, la pile de Clamond.

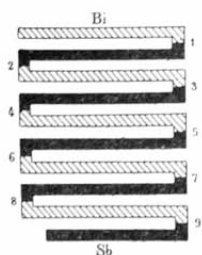


Fig. 297. — Disposition théorique de la pile de Melloni.

**Pile de Melloni.** — Elle est constituée par des petits barreaux de bismuth alternant avec des barreaux d'antimoine (*fig. 297*) et disposés de manière que toutes les soudures impaires soient d'un côté et les soudures paires de l'autre. Pour réduire

le volume de la pile, on superpose plusieurs séries semblables, le dernier barreau de bismuth

de la première série se soudant latéralement au premier barreau d'antimoine de la deuxième série et ainsi de suite. L'ensemble a la forme d'un parallélépipède rectangle dont les faces antérieure et postérieure correspondent aux soudures (*fig.* 298). La partie latérale est protégée par une monture en cuivre supportée par un pied à charnière. Les barreaux extrêmes sont reliés à deux bornes isolées qui forment les pôles de la pile. Enfin deux étuis rectangulaires fixés sur la monture sont munis à leurs extrémités

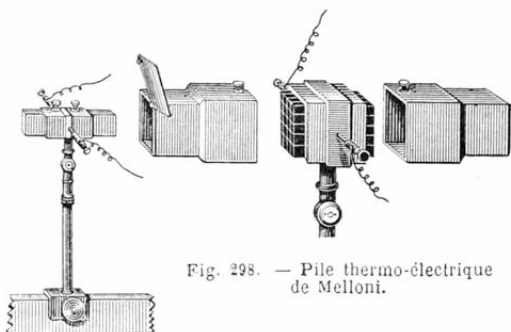


Fig. 298. — Pile thermo-électrique de Melloni.

de petits écrans mobiles qui permettent de soustraire à volonté l'une ou l'autre face aux actions calorifiques extérieures.

Lorsqu'on fait tomber de la chaleur rayonnante sur l'une des faces de la pile, sur les soudures impaires par exemple, les soudures paires restant à une température uniforme, il se développe une force électromotrice proportionnelle au nombre des éléments et à la différence de température des deux faces. L'aiguille d'un galvanomètre de faible résistance introduit dans le circuit est déviée, et la déviation, si elle ne dépasse pas un petit nombre de degrés, est proportionnelle à l'intensité du courant pro-

duit et, par suite, à la différence de température des deux faces de la pile.

La pile de Melloni est employée comme thermomètre différentiel dans l'étude de la chaleur rayonnante (133).

**Pile de Clamond.** — Les éléments de la pile de Clamond sont formés de fer et d'un alliage de zinc et d'antimoine. Ils sont disposés en séries de 10, chaque série for-

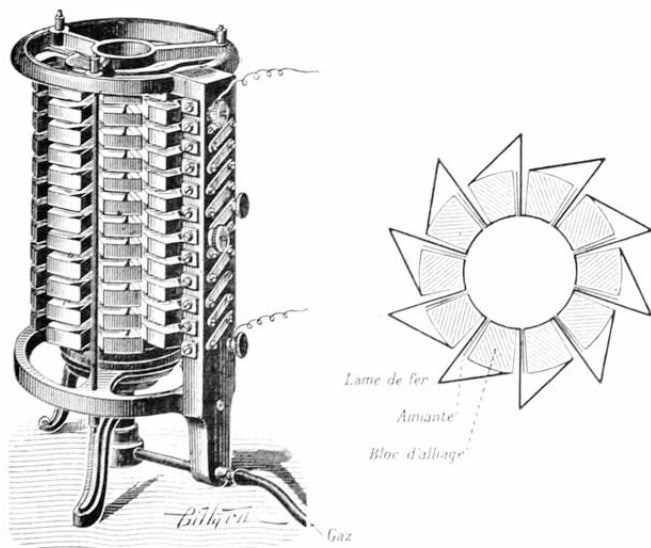


Fig. 299. — Pile thermo-électrique de Clamond.

mant une couronne circulaire contenant 10 blocs d'alliage (fig. 299), reliés l'un à l'autre par des lames de fer très minces et présentant une forte saillie à l'extérieur de manière à faciliter le refroidissement. Les couronnes sont superposées et séparées les unes des autres par des rondelles d'amiante; elles sont généralement réunies en série par leurs pôles de noms contraires. A l'intérieur, un tuyau en terre réfractaire percé de trous amène du gaz d'éclairage permettant de porter les soudures intérieures à environ 350°.

La pile de Clamond donne un courant très constant et nécessite peu d'entretien. On ne l'emploie guère que pour la galvanoplastie. Dans le type de 12 couronnes (120 éléments) la force électromotrice est de 8 volts et la résistance intérieure de 30 ohms,2. La consommation de gaz est de 180<sup>lit</sup> par heure.

**214. Aiguilles et pyromètres thermo-électriques.** — Ce sont des éléments thermo-électriques que l'on emploie pour la mesure des températures.

En Physiologie et en Médecine, on emploie le plus sou-

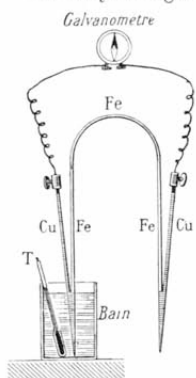


Fig. 300. — Aiguilles thermo-électriques du professeur d'Arsonval.

vent les *aiguilles thermo-électriques accouplées* du professeur d'Arsonval (fig. 300). Elles sont formées de deux soudures fer-cuivre identiques qu'on oppose dans le même circuit. Un fil de fer réunit les deux éléments fer, deux fils de cuivre réunissent les éléments cuivre aux deux bornes d'un galvanomètre. L'une des soudures étant introduite dans le milieu dont on cherche la température, l'autre soudure est immergée dans un bain d'eau dont on fait varier la température, jusqu'à ce que l'aiguille du galvanomètre reste au zéro. Les deux soudures sont alors à la même température, température qui est donnée par un thermomètre à mercure plongé dans le bain de comparaison.

Le *pyromètre thermo-électrique* de Le Châtelier permet d'obtenir les températures comprises entre 100 et 1200° avec une approximation d'environ 10°, approximation supérieure à celle que donne le thermomètre à air. Il comprend un élément platine pur-platine rhodié (le platine rhodié est un alliage de platine et de rhodium) d'environ 1<sup>m</sup>,50 de longueur et un galvanomètre. Une des soudures est portée dans le foyer dont on veut connaître la température, l'autre est maintenue à la température ambiante. Le pyromètre Le Châtelier peut servir à déterminer la température d'ébullition d'un liquide ; il a permis de rectifier le point de fusion de certains métaux fondus.

## RÉSUMÉ DU CHAPITRE XXIII

Les piles thermo-électriques ont une force électromotrice relativement faible et une résistance intérieure presque négligeable. Leur point de départ a été l'expérience de Seebeck : si l'on chauffe une des extrémités d'un rectangle formé par du bismuth et du cuivre, il se produit un courant allant du bismuth au cuivre en passant par la soudure chaude.

Une pile thermo-électrique est formée d'éléments associés ordinairement en série. Dans la pile de *Melloni*, on fait alterner des barreaux de bismuth avec des barreaux d'antimoine de manière que les soudures paires soient d'un côté, les soudures impaires de l'autre. On associe cette pile à un galvanomètre (*thermo-multiplicateur*) ; la déviation de l'aiguille du galvanomètre, pour un petit nombre de degrés, est proportionnelle à la différence de température des deux faces de la pile. Dans la pile de *Clamond* les éléments sont formés de fer et d'un alliage de zinc et d'antimoine.

Les aiguilles thermo-électriques servent pour mesurer les températures des différentes régions du corps ; elles sont le plus souvent accouplées et constituées par deux soudures fer-cuivre. Enfin le pyromètre de Le Châtelier (platine-platine rhodié) permet de déterminer avec précision les températures élevées.

## CHAPITRE XXIV

PREMIÈRES NOTIONS SUR LES EFFETS CHIMIQUES  
DU COURANT

**215. Définitions.** — Lorsqu'une colonne liquide fait partie d'un circuit fermé parcouru par un courant, trois cas peuvent se présenter :

1° Le liquide est un *corps simple conducteur*, comme du mercure ou un métal fondu. Le courant chauffe simplement le liquide comme une autre région quelconque du circuit ;

2° Le liquide est un *corps simple ou composé non conducteur* (soufre fondu, eau pure, alcool, etc.). Le courant ne passe pas sensiblement ;

3° Le liquide est un *corps composé conducteur* (acides, bases, sels, en dissolution ou à l'état de fusion ignée). Le courant passe et ce passage est toujours accompagné d'une décomposition du liquide en des produits plus simples.

La décomposition d'un composé conducteur à l'état liquide par le courant électrique s'appelle *électrolyse*, et le liquide lui-même s'appelle un *électrolyte*. Les conducteurs solides baignés par le liquide et qui servent à y faire passer le courant sont les *électrodes* ; l'électrode d'entrée, qui communique avec le pôle positif, est l'électrode *positive* ou l'*anode* ; l'électrode de sortie, qui communique avec le pôle négatif, est l'électrode *négative* ou la *cathode*. Enfin les produits immédiats de la décomposition s'appellent les *ions* ; on nomme plus spécialement *anions* ceux qui se portent vers l'anode, *cathions* ceux qui se portent vers la cathode.

**216. Caractères de l'électrolyse.** — Les seuls électrolytes connus sont des composés renfermant un *métal* ou de l'*hydrogène* (acides, bases ou sels) ; on peut dire simplement des composés renfermant un métal, si l'on regarde l'hydrogène comme un métal.

L'électrolyse de ces composés obéit aux deux règles suivantes :

1° *Les produits de la décomposition n'apparaissent que sur les électrodes* ; entre elles, dans la masse même du liquide, il ne se produit aucun phénomène visible.

2° *La séparation se fait toujours entre le métal (ou l'hydrogène) et le radical simple ou composé qui lui est uni* ;

*le métal apparaît sur la cathode, le radical sur l'anode.*

REMARQUE. — L'électrolyse est le plus souvent accompagnée de phénomènes chimiques *secondaires*, dans lesquels le courant ne joue aucun rôle immédiat. Ces phénomènes résultent des réactions qui se produisent entre les ions et l'électrolyte ou entre les ions et les électrodes. Nous en verrons plus loin de nombreux exemples.

**217. Électrolyse de l'acide sulfurique étendu.** — Cette électrolyse, appelée improprement électrolyse de l'eau, est accompagnée d'une action secondaire. Elle se fait dans un *voltamètre* (fig. 301). C'est un vase de verre que l'on rem-

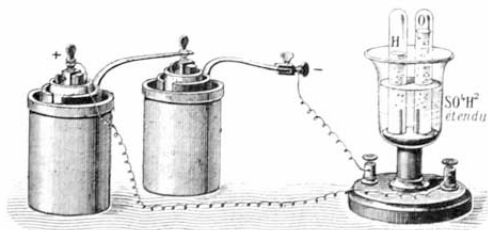


Fig 301. — Électrolyse de l'acide sulfurique étendu.

plit d'eau additionnée d'acide sulfurique. Le fond du vase est traversé par deux fils de platine sur lesquels on renverse deux éprouvettes graduées remplies également d'eau acidulée. Si l'on joint les fils de platine aux pôles de quelques éléments Bunsen, par exemple, l'oxygène se dégage dans l'éprouvette qui se trouve au-dessus de l'anode, l'hydrogène dans celle qui recouvre la cathode. A un moment quelconque, le volume de l'hydrogène est double de celui de l'oxygène.

Dans cette expérience, l'eau paraît décomposée en ses éléments. En réalité, c'est l'acide sulfurique qui est d'abord décomposé en  $\text{SO}^4$  et  $\text{H}^2$ . L'hydrogène descend le courant et se dégage sur la cathode; le radical  $\text{SO}^4$  se porte vers l'a-

node, où il se dédouble en oxygène qui se dégage et en anhydride sulfurique qui réagit sur l'eau pour former de l'acide sulfurique. Une petite quantité de cet acide sert ainsi d'intermédiaire et permet de décomposer indirectement une grande quantité d'eau.

APPLICATIONS. — L'électrolyse de l'acide sulfurique étendu rend apparente la composition de l'eau en volumes. Certains voltamètres, comme celui de Bertin, permettent de déterminer très exactement le volume de l'hydrogène dégagé par le passage d'un courant et servent à mesurer l'intensité des courants.

218. **Électrolyse des hydrates alcalins.** — Les hydrates alcalins comme la potasse KOH, la soude NaOH, peuvent être électrolysés soit à l'état de solide humide, soit à l'état de dissolution.

Expérience de Davy. — Cette expérience, par laquelle Davy isola le premier le potassium (1807), se répète aujourd'hui de la manière suivante :

Un morceau de potasse caustique humide est placé sur une lame de platine communiquant avec le pôle positif d'une forte pile (*fig. 302*). On creuse une cavité à la partie supérieure du morceau de potasse, on y met du mercure et l'on fait communiquer ce métal avec le pôle négatif. La potasse s'électrolyse régulièrement en donnant du potassium à la cathode, de l'oxygène et de l'eau à l'anode :

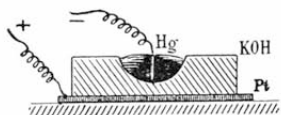
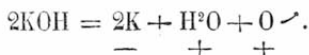


Fig. 302. — Expérience de Davy.



Le potassium s'unit au mercure et forme un amalgame



qu'il suffit de distiller dans un gaz inerte pour isoler le potassium.

Davy isola de même le sodium et le lithium.

**Électrolyse des dissolutions.** — On effectue cette électrolyse dans les voltamètres à grand débit du colonel Renard.

Ils se composent d'un récipient en fonte de fer qui contient une dissolution de soude caustique et sert de cathode (fig. 303). Un vase poreux reçoit une anode en tôle perforée. Il faut une différence de potentiel de 3<sup>volts</sup> aux bornes de l'appareil.

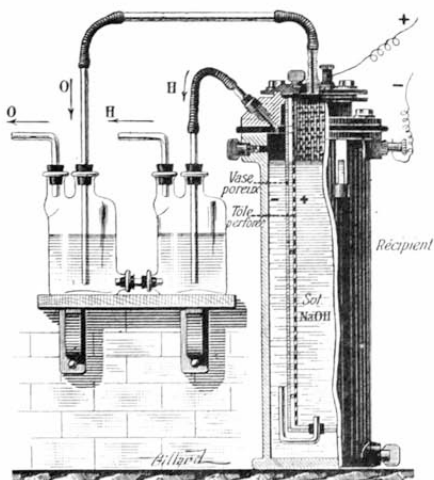


Fig. 303. — Voltamètre à grand débit du C<sup>l</sup> Renard.

La soude est décomposée comme la potasse dans l'expérience précédente, mais le sodium mis en liberté réagit sur l'eau et forme de la soude avec dégagement d'hydrogène. Avant de se rendre aux gazomètres respectifs, l'oxygène et l'hydrogène traversent deux flacons formant compensateur hydraulique.

Avec un courant de 25 à 30 ampères, on obtient par heure 12<sup>lit</sup> d'hydrogène et 6<sup>lit</sup> d'oxygène.

**219. Électrolyse des sels à radical simple.** — Comme exemples de l'électrolyse des sels à radical simple (chlorures, bromures, iodures, etc.), nous citerons l'électrolyse du chlorure d'ammonium et celle de l'iodure de potassium.

1° Dans une éprouvette à pied dont le fond contient du mercure (*fig. 304*), on introduit une dissolution concentrée de chlorure d'ammonium, puis on fait plonger le fil positif dans la dissolution et le fil négatif, isolé par un tube de verre, dans le mercure. Dès que le courant passe, le mercure se recouvre d'une masse spongieuse d'amalgame d'ammonium.



Fig. 304. — Électrolyse du chlorure d'ammonium en dissolution.

2° On imbibe une bande de papier-filtre d'une dissolution d'iodure de potassium mélangée d'empois d'amidon et l'on place cette bande sur une plaque de cuivre en communication avec le pôle négatif d'une pile. Si l'on touche le papier en différents points avec le pôle positif, chaque contact produit une tache bleue par suite de la mise en liberté de l'iode.

**Applications.** — Bunsen a isolé le magnésium, le baryum, le strontium, le calcium en électrolysant leurs chlorures fondus.

Le chlorure est fondu dans un creuset en porcelaine fortement chauffé. Les deux électrodes sont en charbon de cornues (*fig. 305*) ; l'anode, où se dégage le chlore, est entourée d'un cylindre en terre poreuse afin de préserver le métal, qui se rassemble sur la cathode, de l'action du gaz.

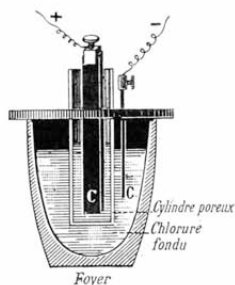


Fig. 305. — Électrolyse d'un chlorure fondu.

Dans l'industrie, on électrolyse le chlorure de sodium fondu ou en dissolution pour préparer à la fois du chlore et de la soude caustique ; on électrolyse un mélange de fluorure d'aluminium et de sodium et de chlorure de sodium pour obtenir de l'aluminium (*V. Chimie*).

220. **Électrolyse des sels à radical composé.** — Nous prendrons comme types l'électrolyse d'une dissolution de sulfate de cuivre et celle d'une dissolution d'un sulfate alcalin.

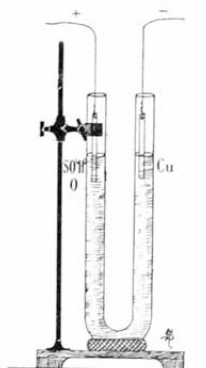
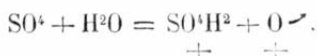
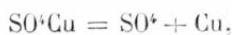


Fig. 306. — Électrolyse du sulfate de cuivre en dissolution.

**Électrolyse du sulfate de cuivre.** — Dans les deux branches d'un tube en U renfermant une dissolution de ce sel (*fig. 306*), on plonge deux lames de platine communiquant avec les deux pôles d'une pile; on voit bientôt la cathode se recouvrir de cuivre métallique, en même temps que des bulles d'oxygène se dégagent autour de l'anode; de plus, le liquide qui entoure cette dernière est devenu très riche en acide sulfurique. La décomposition a lieu

d'après les équations suivantes :



Si l'on prend comme cathode une lame de cuivre au lieu d'une lame de platine, il ne se dégage pas d'oxygène; le radical  $\text{SO}_4$  s'unit au cuivre pour reformer une quantité de sulfate de cuivre égale à celle qui a été décomposée pendant le même temps, de telle sorte que la dissolution garde une composition constante. Le rôle du courant est de transporter du cuivre, dans le sens même où il marche, de l'anode à la cathode.

**Électrolyse d'un sulfate alcalin.** — Les sulfates alcalins se décomposent comme le sulfate de cuivre. Le radical

$\text{SO}_4$  se porte sur l'anode, où il forme de l'acide sulfurique avec dégagement d'oxygène; seulement, le métal alcalin n'apparaît pas sur la cathode : il décompose l'eau, forme un hydrate alcalin et laisse dégager de l'hydrogène. Pour faire l'expérience, on remplit un tube en U d'une dissolution de sulfate de potassium ou de sodium additionnée de sirop de violettes. Dans chacune des branches on place comme électrodes deux lames de platine, puis on fait passer le courant. Au bout de quelques instants, le sirop a rougi autour de l'anode sous l'influence de l'acide sulfurique et verdi autour de la cathode sous l'influence de la potasse ou de la soude caustique.

**Applications.** — L'électrolyse des sels à radical composé a donné lieu à trois industries importantes : la galvanoplastie, la galvanisation et l'électrometallurgie.

La *galvanoplastie* a pour but de reproduire des modèles au moyen d'un moule sur lequel le métal est précipité par électrolyse sans y adhérer.

La *galvanisation* a pour but de déposer à la surface d'un corps une couche métallique mince adhérente. Elle comprend la dorure, l'argenture, le nickelage, etc.

Dans l'*électrometallurgie*, on extrait un métal de ses minerais ou bien on le purifie par l'électrolyse.

L'étude spéciale de ces applications sera faite dans le tome III, en même temps que l'étude des *accumulateurs*, appareils dans lesquels on peut emmagasiner de l'électricité en utilisant le phénomène de la polarisation.

**221. Lois de Faraday.** — Les phénomènes électrolytiques sont soumis à trois lois, qui ont été découvertes par Faraday.

1<sup>o</sup> Les actions chimiques qui se produisent simultanément dans

un même circuit parcouru par un courant sont équivalentes.

Si l'on dispose dans un même circuit, à la suite les uns des autres, plusieurs voltamètres contenant de l'eau acidulée (*fig. 307*), on recueille dans chacun d'eux le même

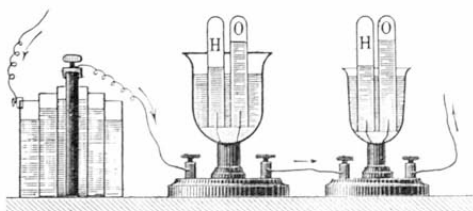


Fig. 307. — Équivalence des actions chimiques dans un même circuit.

volume d'hydrogène dans le même temps, et cela quelles que soient les dimensions de ces voltamètres, la nature et les dimensions de leurs électrodes.

On peut substituer aux voltamètres à eau acidulée des voltamètres contenant une dissolution métallique, une dissolution de sulfate de cuivre par exemple ; une même masse de ce sel est décomposée dans le même temps dans tous les voltamètres. L'action décomposante d'un courant est donc la même en toutes ses parties.

2° La masse d'un même électrolyte décomposée est proportionnelle à la quantité d'électricité qui a traversé l'électrolyte.

Pour vérifier cette loi, on coupe en un point le fil conducteur d'un circuit, et l'on réunit les deux bouts par deux dérivations de même résistance (*fig. 308*). Trois voltamètres sont introduits dans le circuit, le premier dans la partie non divisée, les deux autres, identiques ; dans les dérivations. La quantité d'électricité qui traverse le premier voltamètre est la somme des quantités égales d'électricité qui traversent les voltamètres identiques ; le volume d'hydrogène qu'il dégage est aussi la somme

des volumes égaux d'hydrogène dégagés dans les voltamètres placés dans les dérivations.

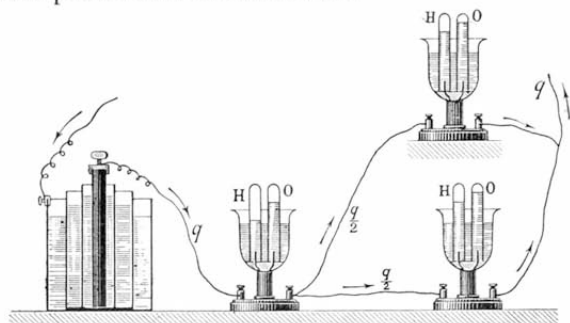
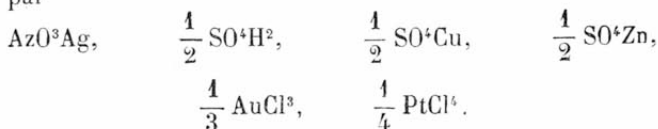


Fig. 308. — Proportionnalité de la masse d'électrolyte décomposée à la quantité d'électricité.

3° Si l'on dispose sur un même courant des voltamètres contenant des sels de métaux différents, les masses de chaque électrolyte décomposées sont celles qui correspondent à une valence des radicaux.

Considérons divers électrolytes : azotate d'argent  $AzO^3Ag$ , acide sulfurique  $SO^4H^2$ , sulfate de cuivre  $SO^4Cu$ , sulfate de zinc  $SO^4Zn$ , chlorure aurique  $AuCl^3$ , chlorure platinique  $PtCl^4$ . Le radical  $AzO^3$  est monovalent, les radicaux  $SO^4$  sont divalents, le radical  $Cl^3$  est trivalent, le radical  $Cl^4$  tétravalent. Une même quantité d'électricité décomposera des masses de ces électrolytes représentées par



D'après cela, si l'on dispose sur un même courant une série de voltamètres ou de cuves électrolytiques contenant respectivement les électrolytes précédents, tous les vases

seront traversés par la même quantité d'électricité : si dans le premier vase il s'est déposé 108<sup>gr</sup> d'argent (Ag = 108), il s'est dégagé dans le même temps 1<sup>er</sup> d'hydrogène dans le deuxième vase, et déposé dans les autres vases 31<sup>gr</sup>,75 de cuivre (Cu = 63,5), 33<sup>gr</sup> de zinc (Zn = 66), 65<sup>gr</sup>,33 d'or (Au = 196), 49<sup>gr</sup>,25 de platine (Pt = 197).

### 222. Définition pratique du coulomb et de l'ampère. —

L'expérience montre que, pour mettre en liberté 1<sup>er</sup> d'hydrogène dans un voltamètre à acide sulfurique étendu, il faut une quantité d'électricité égale à 96600 coulombs; un coulomb met donc en liberté  $\frac{1}{96600} = 0^{\text{milligr}},01035$  d'hydrogène, ce qui représente  $\frac{0,01035}{1,293 \times 0,0695} = 0^{\circ},1155$  de ce gaz mesuré à 0° et sous la pression de 76<sup>cm</sup>.

On peut donc définir pratiquement le coulomb *la quantité d'électricité qui met en liberté 0°<sup>,1155</sup> d'hydrogène mesuré dans les conditions normales, ou, ce qui revient au même,  $\frac{108}{96600} = 1^{\text{milligr}},118$  d'argent.*

L'ampère correspond au débit d'un coulomb par seconde. C'est l'unité pratique d'intensité. Il a été défini de la manière suivante par le Congrès international des Électriciens tenu à Chicago en 1893 :

L'ampère international est l'intensité du courant constant qui, traversant un voltamètre à azotate d'argent dans des conditions déterminées, dépose l'argent à raison de 1<sup>milligr</sup>,118 par seconde.

D'après ce qui précède, on peut déduire l'intensité d'un courant soit du volume d'hydrogène, soit de la masse d'argent qu'il aura mise en liberté dans un temps déterminé. Un courant qui, dans le même temps, mettra en

liberté deux fois plus d'hydrogène ou d'argent qu'un autre sera, par définition, deux fois plus intense.

**223. Électrolyse dans les piles.** — Les éléments de pile sont eux-mêmes le siège d'électrolyses analogues à celles qui s'effectuent dans les voltamètres et obéissant aux lois de Faraday.

Prenons comme exemple l'élément Daniell. Le courant, en traversant le compartiment extérieur, électrolyse l'acide sulfurique; le radical  $\text{SO}^4$  remonte le courant et va s'unir au zinc, l'hydrogène descend le courant et marche vers le vase poreux. Dans le compartiment intérieur, le sulfate de cuivre est aussi électrolysé par le courant : Cu se dépose sur la cathode,  $\text{SO}^4$  remonte le courant et va vers la cloison poreuse; il y rencontre l'hydrogène venant du compartiment extérieur et leur combinaison reproduit la molécule d'acide sulfurique. En résumé, il se forme une molécule de sulfate de zinc pour chaque molécule de sulfate de cuivre décomposée.

Il existe néanmoins une différence entre l'électrolyse dans les éléments de pile et l'électrolyse dans les voltamètres. L'ensemble des réactions qui s'accomplissent dans un élément de pile doit correspondre à un dégagement de chaleur, car c'est précisément cette énergie calorifique libérée qui alimente l'énergie électrique du courant. Au contraire, les dégagements qui se produisent dans un voltamètre absorbant de la chaleur, ne peuvent avoir lieu que si le courant fournit de l'énergie calorifique au voltamètre. Ainsi par exemple la séparation des éléments d'une molécule d'eau exige environ 69 000 cal, Or, dans un élément Daniell, la quantité de chaleur résultant de la substitution d'un atome de zinc à un atome de cuivre dans le sulfate de cuivre est de 50 600 cal; par suite, un élément Daniell isolé ne peut opérer la décomposition de l'eau dans un voltamètre. Il n'en est pas de même d'un élément Bunsen, l'ensemble des réactions qui s'y produisent et qui ont pour point de départ la dissolution d'un atome de



zinc correspondant à un dégagement de chaleur d'environ 84 000cal.

### RÉSUMÉ DU CHAPITRE XXIV

Tout composé conducteur à l'état liquide est décomposé par le passage d'un courant. Les produits de la décomposition n'apparaissent que sur les électrodes et la séparation se fait toujours entre le métal ou l'hydrogène et le radical qui lui est uni; le métal se porte sur la cathode, le radical sur l'anode. Cette électrolyse est souvent accompagnée de réactions chimiques secondaires.

L'électrolyse de l'*acide sulfurique étendu* se fait dans un voltamètre à fils de platine; de l'oxygène se dégage à l'anode, un volume double d'hydrogène, à la cathode. En réalité, c'est l'acide sulfurique qui se décompose; le radical  $SO_4$  se dédouble en  $SO_3$ , qui reforme de l'acide sulfurique, et en oxygène qui se dégage.

Les *hydrates alcalins* (KOH, NaOH) peuvent être décomposés à l'état de solide humide (expérience de Davy) ou à l'état de dissolution (voltamètres à grand débit).

Les électrolyses de sels les plus intéressantes sont celles du *chlorure d'ammonium* (formation d'amalgame d'ammonium), de l'*iodure de potassium* amidonné (tache bleue au contact du pôle positif), du *sulfate de cuivre* (dépôt de cuivre sur la cathode), du *sulfate de potassium* (formation d'acide sulfurique à l'anode, de potasse à la cathode). Les applications de ces électrolyses sont la galvanoplastie, la galvanisation et l'électro-métallurgie.

Les phénomènes électrolytiques obéissent aux lois de Faraday. L'action décomposante d'un courant est la même en toutes ses parties. La masse d'électrolyte décomposée est proportionnelle à la quantité d'électricité qui a traversé l'électrolyte. Si plusieurs électrolytes sont disposés sur un même courant, les masses de chaque électrolyte décomposées sont celles qui correspondent à une valence des radicaux.

L'expérience montre qu'un coulomb met en liberté  $\frac{1}{98600}$   
 $= 0^m1115r,01035$  d'hydrogène ou  $\frac{108}{98600} = 1^m1115gr,418$  d'argent. De là une définition pratique du coulomb et aussi de l'ampère, l'ampère correspondant au débit d'un coulomb par seconde.

Les éléments de pile sont aussi le siège d'électrolyses, mais l'ensemble des réactions qui s'accomplissent dans un élément de pile doit correspondre à un dégagement de chaleur.

### EXERCICES SUR LE CHAPITRE XXIV

89. Un courant passant à travers un voltamètre à azotate d'ar-

gent pendant 35 minutes dépose  $13^{\text{er}},25$  de métal. Quelle est l'intensité du courant et combien a-t-il passé de coulombs ?

60. Un courant traverse un voltamètre à eau et un autre à sulfate de cuivre ; au bout de 5 minutes, les masses de l'eau et du sulfate de cuivre décomposées sont respectivement  $0^{\text{er}},01618$  et  $0^{\text{er}},141$ . Déduire de ces données l'intensité du courant.

61. Un courant donne au voltamètre  $120^{\text{co}}$  d'hydrogène par minute, à la température de  $20^{\circ}$  et sous la pression de  $750^{\text{mm}}$ . La force élastique de la vapeur d'eau acidulée est  $17^{\text{mm}}$  à cette température : calculer l'intensité du courant.

Le coefficient de dilatation des gaz est  $\frac{1}{273}$ .

62. Un courant traverse un voltamètre à eau acidulée, et les gaz dégagés sont recueillis dans un tube unique dont la section est  $s^{\text{cm}}$ , la hauteur  $l^{\text{cm}}$ . Au bout d'une minute, le mélange gazeux occupe dans le tube une hauteur de  $h^{\text{cm}}$ . La température est  $t^{\circ}$  ; la pression atmosphérique  $H^{\text{cm}}$  ; la densité de l'eau acidulée  $d$ , celle du mercure  $D$  ; la force élastique maxima de la vapeur d'eau à  $t^{\circ}$  est  $F$ . On demande :

1° Quel serait le volume du mélange gazeux supposé sec et mesuré à  $0^{\circ}$  et  $76^{\text{cm}}$  ;

2° Quelle est, en ampères, l'intensité du courant.

Application numérique :  $l = 40^{\text{cm}}$ ,  $h = 20^{\text{cm}}$ ,  $s = 2^{\text{sq}}$ ,  
 $H = 75^{\text{cm}}$ ,  $t = 20^{\circ}$ ,  $F_{20} = 17^{\text{mm}},4$ ,  $d = 1,2$ ,  $D = 13,6$ ,  
 $\alpha = \frac{1}{273}$ .

## CHAPITRE XXV

### PREMIÈRES NOTIONS SUR LES EFFETS CALORIFIQUES ET LUMINEUX DU COURANT

224. Effets calorifiques en général. — Le courant électrique chauffe les conducteurs qu'il traverse. Pour le montrer, on introduit un fil de fer ou de platine de faible diamètre dans un circuit parcouru par le courant d'une

forte pile : le fil devient incandescent ; il peut même fondre et se volatiliser s'il est assez fin et assez court.

La loi du dégagement de chaleur dans les conducteurs par le passage d'un courant a été découverte par Joule.

**225. Loi de Joule.** — La quantité de chaleur dégagée dans un fil conducteur homogène par le passage d'un courant est proportionnelle :

- 1° au carré de l'intensité du courant ;
- 2° à la résistance de la portion de conducteur considérée ;
- 3° au temps pendant lequel le courant passe.

Soient  $I$  l'intensité du courant qui traverse un conducteur de résistance  $r$ ,  $Q$  la quantité de chaleur dégagée dans un temps  $t$ ,  $A$  un coefficient constant qui n'est autre que l'inverse de l'équivalent mécanique de la chaleur ; la loi de Joule est résumée par la formule

$$Q = ArI^2t.$$

En employant les unités actuelles,  $Q$  s'exprime en petites calories,  $r$  en ohms,  $I$  en ampères,  $t$  en secondes. L'équivalent mécanique de la petite calorie étant égal à 4,17 joules, 17, la valeur de  $A$  est  $\frac{1}{4,17}$ . On peut donc écrire aussi

$$Q \times 4,17 = rI^2t.$$

Le produit  $Q \times 4,17$  représente l'énergie calorifique dégagée dans le conducteur.

**Conséquences de la loi de Joule.** — La quantité de chaleur dégagée dans un fil conducteur étant proportionnelle à sa résistance, cela explique pourquoi un fil de fer ou de platine s'échauffe plus, à diamètre égal et pour un courant de même intensité, qu'un fil d'argent ou de cuivre ; la résistance de ces derniers métaux par unité de longueur est en effet plus faible que celle du fer et du platine. De même si l'on fait passer un courant suffisamment intense dans une chaîne formée de bouts de fils de platine alternativement fins et gros, on verra les fils fins rougir pen-

dant que les gros s'échaufferont à peine. D'autre part, si l'on diminue progressivement la longueur d'un fil de fer fin intercalé dans un circuit, la partie qui est parcourue par le courant s'échauffe de plus en plus jusqu'à la fusion, car le courant devient plus intense à mesure que la résistance totale du circuit diminue.

226. **Applications directes des effets calorifiques.** — La chaleur produite dans un fil conducteur par le passage d'un courant est utilisée en chirurgie pour l'ablation des tumeurs, des polypes, la cautérisation des plaies (*galvanocautére*). Quand on veut enlever une tumeur, par exemple, on l'entoure d'un fil fin de platine que l'on rend incandescent par le passage du courant ; en tirant lentement l'extrémité du fil, on produit l'ablation de la tumeur

et la cautérisation sans perte de sang.

En Amérique, on se sert de fils de platine portés au rouge blanc pour couper les arbres.

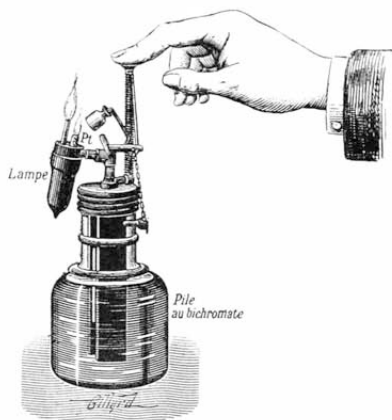


Fig. 309. — Allumoir automatique électrique de Radiguet.

ressort. La petite mèche, particulière à la pile, est entourée d'un fil de platine et recouverte par un capuchon. Quand on appuie sur le bouton de la tige, la petite mèche de l'appareil se découvre automatiquement ; en même temps,

Le courant qui se produit fait rougir le fil de platine et les deux mèches s'enflamment successivement. On laisse alors remonter la tige sans secousse; le courant cesse, le capuchon se rabat sur la petite mèche, tandis que la plus haute reste allumée.

Le chauffage par l'électricité est encore peu usité, à cause de son prix de revient relativement élevé.

Enfin l'incandescence produite par les courants a reçu une application importante dans les lampes à incandescence (229).

**227. Effets lumineux en général.** — Les effets lumineux sont des conséquences directes des effets calorifiques. Lorsqu'une région d'un circuit présente une grande résistance, il y a dans cette région un grand dégagement de chaleur, et si ce dégagement est assez intense, il y a production de lumière.

Les effets lumineux produits par l'énergie électrique sont utilisés sous deux formes : l'*arc voltaïque* et l'*incandescence* d'un conducteur dans le vide.

**228. Arc voltaïque.** — On donne le nom d'arc voltaïque à la flamme brillante qui jaillit entre deux conducteurs en charbon placés dans le circuit d'un courant intense, lorsqu'on les écarte légèrement l'un de l'autre. Ce phénomène a été observé pour la première fois par Davy en 1821.

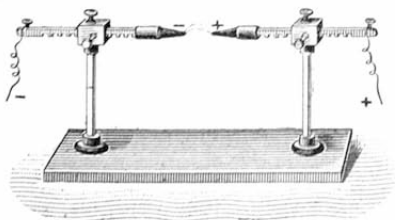


Fig. 310. — Porte-charbons horizontal pour produire l'arc voltaïque.

L'appareil le plus simple employé dans les laboratoires pour produire l'arc voltaïque se compose de deux tiges de charbon taillées en pointe et encastrées dans des

montures métalliques à crémaillère soutenues par des colonnes isolantes (fig. 310). On met les deux tiges en contact,

puis on les réunit aux pôles d'une forte pile. Dès que le courant passe, les tiges s'échauffent et rougissent, par suite de la chaleur dégagée par le passage du courant; si on les écarte légèrement, il se produit entre elles une flamme blanche extrêmement brillante, dont la température a été évaluée à  $3500^{\circ}$ . La forme légèrement courbée de cette flamme lui a fait donner le nom d'*arc voltaïque*.

Pour obtenir un arc voltaïque, il est nécessaire d'amener d'abord les tiges de charbon en contact; si elles sont tant soit peu écartées, la résistance de l'air est trop grande pour que le courant la surmonte à froid. Lorsque les tiges sont en contact, l'air environnant s'échauffe et devient conducteur, de sorte que si à ce moment on écarte légèrement les pointes, le courant continue à passer et l'étincelle persiste en produisant une lumière continue, rendue brillante par l'incandescence des particules de carbone détachées des charbons. Au contact de l'oxygène de l'air, ces particules brûlent et se volatilisent; il y a usure des charbons, la longueur de l'arc augmente progressivement et il peut même arriver que l'arc s'éteigne, la résistance de l'air interposé entre les pointes devenant trop considérable. Il est donc nécessaire de rapprocher les charbons à mesure qu'ils s'usent, afin de conserver à l'arc sa longueur normale. Cette longueur correspond à une différence de potentiel qui est habituellement comprise entre 42 et 48 volts.

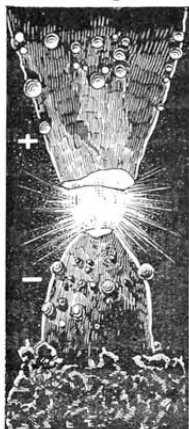


Fig. 311. — Projection de l'arc voltaïque sur un écran (porte-charbons vertical).

On voit ainsi que les pointes des charbons ont beaucoup

plus d'éclat que l'arc lui-même. De plus, l'extrémité du charbon positif se creuse en forme de cratère, tandis que celle du charbon négatif conserve la forme d'une pointe plus ou moins émoussée. Quant à l'usure, elle est notablement plus rapide pour le charbon positif que pour le charbon négatif; le rapport de l'usure du premier à celle du second varie de 1,3 à 2.

**Applications.** — L'arc voltaïque sert pour l'éclairage (*lampes à arc, bougies*); on utilise sa température très élevée dans les *fours électriques* et pour la *soudure autogène* des métaux (plaques de tôle, barres d'acier, etc.).

L'éclairage par l'arc voltaïque sera étudié dans le tome III.

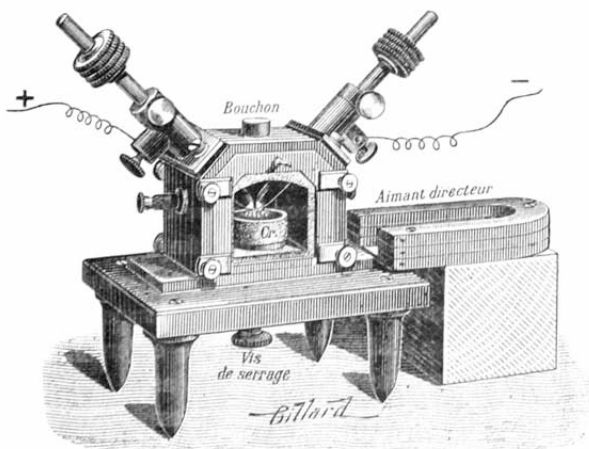


Fig. 312. — Creuset électrique de laboratoire.

**FOURS ÉLECTRIQUES.** — Les fours électriques permettent d'effectuer des fusions ou des réductions à haute température. Leur emploi se généralise de plus en plus dans l'industrie. Ils servent à préparer le carbure de calcium, l'aluminium, les alliages d'aluminium (V. *Chimie*).

La figure 312 représente un creuset électrique de laboratoire construit par Ducretet. Il se compose d'un bloc réfractaire creux, voûté, traversé latéralement par deux charbons obliques, mobiles dans des montures métalliques. A l'intérieur de cette enceinte est un creuset en plombagine, chaux ou magnésie, suivant la matière à traiter. Deux fermetures mobiles garnies de mica permettent d'observer les phénomènes qui se produisent dans le creuset. L'appareil porte des conduits servant à la circulation des gaz ou à l'introduction des matières soumises à l'arc électrique. Enfin l'arc qui jaillit entre les charbons peut être à volonté éloigné ou dirigé au-dessus du creuset en utilisant l'action directrice d'un aimant placé près de l'appareil. Cette disposition permet d'amener graduellement au maximum de température la matière contenue dans le creuset.

Le petit modèle des laboratoires, avec une différence de potentiel de 55 à 70 volts aux bornes et un courant de 12 à 30 ampères, permet de volatiliser tous les métaux, de fondre les corps les plus réfractaires (chaux, silice), de réduire les oxydes de chrome, de manganèse, de reproduire le carbure de calcium, de réaliser la solubilité du carbone amorphe dans la fonte liquéfiée, etc.

### 229. Incandescence d'un conducteur dans le vide. —



Fig. 313. —  
Lampe à  
incandescence.

Lorsqu'un fil conducteur fin et résistant est placé dans le vide, le passage d'un courant électrique le rend incandescent sans en amener la combustion. Il faut, bien entendu, que le conducteur employé soit assez réfractaire pour ne pas fondre par le passage du courant. On a employé d'abord du platine; aujourd'hui on se sert exclusivement de filaments minces de charbon obtenus par divers procédés. On les enferme dans des ampoules en verre où l'on fait le vide, ou que l'on remplit avec des gaz non comburants très raréfiés. On obtient

ainsi les *lampes à incandescence* (fig. 313).



Les lampes à incandescence seront étudiées spécialement dans le tome III.

### RÉSUMÉ DU CHAPITRE XXV

Le courant chauffe les conducteurs qu'il traverse ; les fils fins et résistants (fer, platine) rougissent, fondent et se volatilisent.

La quantité de chaleur dégagée pendant l'unité de temps dans un fil conducteur par le passage d'un courant est proportionnelle au carré de l'intensité du courant et à la résistance du conducteur (loi de Joule).

La chaleur dégagée par le passage d'un courant est utilisée en chirurgie et dans les lampes à incandescence.

Les effets lumineux se manifestent lorsqu'une région du circuit présente une grande résistance ; on les utilise sous forme d'arc voltaïque et d'incandescence d'un conducteur dans le vide.

L'arc voltaïque est la flamme brillante qui jaillit entre deux charbons parcourus par un courant intense, lorsqu'on les écarte légèrement l'un de l'autre. L'éclat de cette flamme est dû à des particules de carbone qui se détachent des charbons, brûlent et se volatilisent. Le charbon positif s'use environ deux fois plus vite que le négatif. L'arc voltaïque est utilisé dans les lampes à arc, les bougies, les fours électriques.

Les lampes à incandescence sont formées d'un fil conducteur en charbon très fin et très résistant enfermé dans une ampoule en verre où l'on a raréfié l'air ou un gaz non comburant.

### EXERCICES SUR LE CHAPITRE XXV

63. On fait passer pendant 10 minutes un courant de 2 amp,5 dans un fil de cuivre ayant 5 ohms de résistance. Le fil est plongé dans un calorimètre contenant 500<sup>gr</sup> d'eau. Quelle sera l'élévation de température de l'eau ?

64. Une colonne de mercure dont la masse est de 10<sup>gr</sup>,5 et la résistance de 0ohm,7, est traversée pendant 15 minutes par un courant de 1 amp,75. Calculer, en négligeant les pertes dues au rayonnement, la température à laquelle s'élèvera le mercure.

Chaleur spécifique du mercure : 0,0322.

## CHAPITRE XXVI

## MAGNÉTISME

**230. Aimants.** — On donne le nom d'aimant à tout corps qui jouit de la propriété d'attirer le fer.

Certains échantillons d'un oxyde de fer  $\text{Fe}^3\text{O}^4$  (*magnétite*) très abondant dans les terrains anciens, possèdent naturellement cette propriété ; on les appelle des *aimants naturels*. Par simple frottement avec des aimants ou par l'action d'un courant électrique, l'acier et le fer peuvent devenir des aimants. Les aimants ainsi obtenus sont des *aimants artificiels* ; ils ont les mêmes propriétés que les aimants naturels et sont seuls employés.

Parmi les aimants artificiels, les uns sont constitués par de l'acier trempé ou comprimé et ont la *propriété permanente* d'attirer le fer. On leur donne une forme simple, régulière, comme celle d'un parallélépipède (*barreau aimanté*) ou d'un losange très allongé (*aiguille aimantée*). Les autres sont constitués par du fer doux et n'attirent le fer que lorsqu'ils sont soumis à l'action d'un courant ; on les appelle des *électro-aimants*.

REMARQUES. — 1° Le fer n'est pas la seule substance *magnétique*, c'est-à-dire attirable par les aimants ; l'acier, le nickel, le cobalt sont dans le même cas. Le manganèse et le chrome sont aussi des substances magnétiques, mais à un degré bien moindre que les précédentes.

2° Le pouvoir attractif des aimants s'exerce à travers les substances non magnétiques, comme le carton, le verre, le bois, le cuivre. Il diminue à mesure qu'on élève la température des aimants, et cesse brusquement à une température

suffisamment élevée (785° environ pour le fer); il ne repa-  
rait pas par le refroidissement.

**231. Pôles et zone neutre des aimants.** — Les aimants ne possèdent pas en tous leurs points la propriété d'attirer le fer. Si l'on roule un barreau aimanté dans de la limaille de fer, celle-ci se fixe, sous forme de houppes, autour de



Fig. 314. — Attraction de la limaille de fer par un barreau aimanté.

deux centres voisins des extrémités (*fig. 314*); elle n'adhère pas à la région moyenne. Ces extrémités actives s'appellent les *pôles* du barreau aimanté; la région moyenne sans action est la *zone neutre*. Tout aimant présente ainsi deux pôles et une zone neutre.

**232. Distinction des pôles.** — Si l'on fait reposer une



Fig. 315. — Orientation d'une aiguille aimantée mobile dans un plan horizontal.

aiguille aimantée par une petite chape en agate sur un pivot vertical très aigu (*fig. 315*), et qu'on l'abandonne à elle-même, elle prend après quelques oscillations une direction fixe qui est à peu près celle du Sud au Nord. L'aiguille écartée de cette direction y revient d'elle-même, et c'est toujours la même extrémité qui se dirige vers le Nord. On en conclut que les deux pôles d'une aiguille aimantée ne sont pas identiques. Le pôle qui se dirige vers le Nord

prend le nom de *pôle Nord* ; il s'indique par la lettre N. Celui qui se dirige vers le Sud s'appelle *pôle Sud* ; il s'indique par la lettre S. Ordinairement on peint en rouge la moitié correspondant au pôle Nord, et en bleu la moitié correspondant au pôle Sud.

L'expérience précédente peut être répétée avec un aimant quelconque, par exemple un barreau aimanté, suspendu en son milieu à un fil sans torsion à l'aide d'un étrier de papier, de manière qu'il ne puisse se mouvoir que dans un plan horizontal.

**233. Actions mutuelles des pôles de deux aimants.** — Quand on approche d'une aiguille aimantée mobile sur un



Fig. 316. — Actions mutuelles des pôles de deux aiguilles aimantées.

pivot une autre aiguille aimantée ou un barreau aimanté (fig. 316), on constate que les deux pôles Nord ou les deux pôles Sud mis en regard se repoussent vivement, mais un pôle Nord

attire un pôle Sud et réciproquement. De là cette loi : Deux pôles de même nom se repoussent ; deux pôles de noms contraires s'attirent.

La force attractive ou répulsive diminue quand la distance des aimants augmente ; elle est d'autant plus grande que leur aimantation est plus énergique.

**234. Champ magnétique d'un aimant.** — Plaçons une feuille de carton sur un barreau horizontal fortement aimanté et projetons sur cette feuille, au moyen d'un tamis, de la limaille de fer assez fine ; en donnant de légers coups sur la feuille à l'aide d'une baguette ou avec

les doigts, nous verrons les parcelles de limaille, obéissant à l'attraction magnétique, s'aligner en courbes régulières et continues qui vont en divergeant à partir des points du papier en regard des pôles (fig. 317).

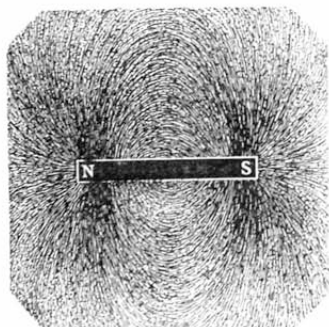


Fig. 317. — Spectre magnétique d'un barreau aimanté.

Ces courbes portent le nom de *lignes de force*. L'ensemble de la figure ainsi formée s'appelle *spectre magnétique* du barreau aimanté. La portion de l'espace où s'étend l'action de l'aimant constitue le *champ magnétique*. Le champ magnétique est caractérisé par la présence de ces lignes de force.

Dans le cas particulier où les lignes de force sont parallèles et équidistantes, on dit que le champ magnétique est *uniforme*. Il en serait ainsi à l'intérieur d'un petit carré découpé dans la feuille de carton, assez loin des pôles.

**Caractéristiques d'un champ magnétique.** — Le champ magnétique en un point est défini quand on connaît le nombre des lignes de force, leur direction et leur sens.

1° Le champ est d'autant plus intense que le nombre des lignes de force est plus grand.

2° La *direction* des lignes de force est donnée par les courbes du spectre magnétique.

3° Si l'on suspend horizontalement une petite aiguille aimantée dans le champ d'un aimant, elle prend la direction de la ligne de force dessinée au même point par la limaille de fer. Le *sens* des lignes de force d'un champ magnétique est défini par la direction que prendrait le pôle Nord d'une petite aiguille aimantée libre de se mouvoir dans le champ. Il résulte de cette définition que les lignes de force d'un ai-

mant *sortent* du pôle Nord et *rentrent* dans le pôle Sud. D'un

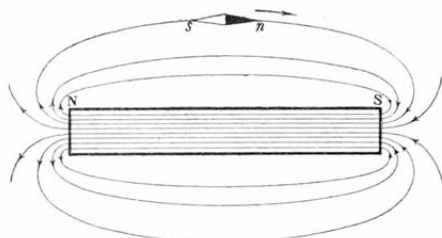


Fig. 318. — Direction générale des lignes de force d'un champ magnétique.

autre côté il est naturel de penser que les lignes de force, au lieu de se terminer aux extrémités de l'aimant, se continuent dans l'aimant lui-même en formant un circuit fermé. La figure 318

montre grossièrement la direction des lignes de force du champ magnétique produit par un barreau aimanté.

**Spectre magnétique d'un pôle d'aimant.** — Considérons

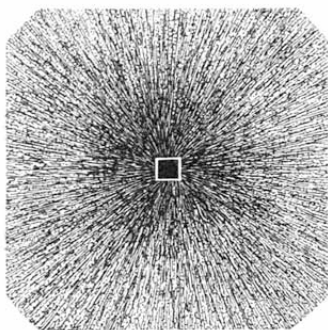


Fig. 319. — Spectre magnétique d'un pôle d'aimant.

maintenant le spectre magnétique fourni par un pôle d'aimant. Si l'on dispose une feuille de carton perpendiculairement au grand axe d'un barreau aimanté et qu'on y projette de la limaille de fer, on voit, après avoir légèrement secoué la feuille, les parcelles de limaille s'aligner très sensiblement suivant des rayons émergeant du centre de l'extrémité du pôle (fig. 319).

**Induction magnétique.** —

L'ensemble des lignes de force qui constituent un champ magnétique est ordinairement assimilé à un flux de nature particulière appelé *flux d'induction* ou *flux magnétique*. Ce flux entre par le pôle Sud de l'aimant, sort par le pôle Nord et se referme sur lui-même à l'extérieur en allant du pôle Nord au pôle Sud.

Dans le cas d'un barreau aimanté, il est possible, comme nous le verrons plus loin (260), de mesurer le flux magnétique qui traverse la section médiane. Le quotient du flux magnétique par la section qu'il traverse s'appelle l'*induction magnétique*. Cette induction caractérise évidemment l'aimantation du barreau.

**235. Aimantation par influence.** — Toute substance magnétique placée dans un champ magnétique devient elle-même un aimant. Par exemple, dans l'expérience du spectre magnétique, les parcelles de limaille deviennent de petits aimants et prennent la direction des lignes de force ; chaque parcelle a son pôle Nord du côté d'où sortent les lignes de force et son pôle Sud du côté où elles aboutissent. De même lorsqu'on approche un morceau de fer doux d'un barreau aimanté, le fer doux s'aimantant par influence présente au pôle du barreau un pôle de nom contraire et est attiré.

**REMARQUE.** — Dans l'aimantation par influence d'une substance magnétique placée dans un champ magnétique, les lignes de force se déforment pour pénétrer dans le nouvel aimant, comme si ce dernier leur offrait un passage plus facile. Le rapport entre le flux d'induction qui traverse ainsi une substance magnétique et celui qui traversait auparavant la même section d'air est toujours plus grand que 1 ; on l'appelle la *perméabilité magnétique* de la substance. Cette perméabilité se représente par la lettre  $\mu$  ; elle s'exprime par le rapport de l'induction  $\mathcal{B}$  à l'intensité  $\mathcal{H}$  du champ qui la produit. On a donc  $\mu = \frac{\mathcal{B}}{\mathcal{H}}$  ou  $\mathcal{B} = \mathcal{H}\mu$ . Dans l'air  $\mu = 1$ . Dans le fer  $\mu$  peut atteindre des valeurs de l'ordre de 2400.

**236. Procédés d'aimantation.** — Le seul procédé qui fournisse des aimants réguliers et très puissants repose sur l'emploi des courants électriques (258) ; il est presque exclusivement employé.

D'autres procédés consistent à frotter la substance magnétique à aimanter avec le pôle d'un barreau déjà aimanté. Nous décrirons celui de la *touche séparée*, qui est encore employé pour aimanter les lames minces et les aiguilles de boussoles.

On fait reposer les extrémités de la lame à aimanter sur

les pôles N et S de deux aimants fixes (*fig. 320*), puis on applique au milieu de la lame les pôles N' et S' de deux barreaux identiques que l'on tient inclinés d'un angle d'environ  $30^\circ$  et on les écarte simultanément jusqu'aux extrémités de la lame. Là, on enlève les deux barreaux, on les

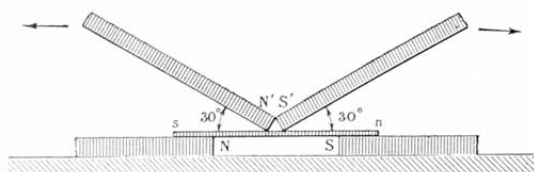


Fig. 320. — Procédé de la touche séparée.

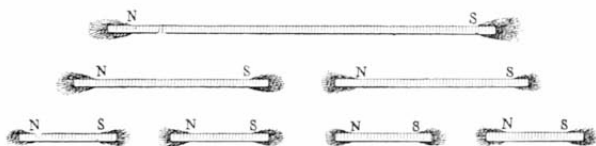
reporte au milieu et on recommence le même déplacement que précédemment. Après plusieurs frictions semblables sur les deux faces, la lame se trouve aimantée ; son pôle Nord se trouve à l'extrémité abandonnée finalement par le pôle Sud S' ; son pôle Sud, à l'extrémité abandonnée finalement par le pôle Nord N'.

**Magnétisme temporaire et magnétisme rémanent.** — Le fer et l'acier se comportent de deux manières différentes au point de vue de l'aimantation. Avec le fer pur (*fer doux* du commerce), l'aimantation est énergique, mais elle tend à disparaître dès que l'influence du courant ou de l'aimant cesse. Le fer doux ne peut donc donner que des aimants *temporaires*. Au contraire l'acier, et principalement l'acier trempé, fournit les aimants *permanents*. Son aimantation se produit moins facilement que celle du fer doux ; elle est moins énergique, mais elle persiste en proportion plus ou moins grande après l'influence. Le magnétisme qui persiste ainsi quand l'influence a cessé s'appelle *magnétisme rémanent*.

**REMARQUE.** — Si l'on brise en son milieu une aiguille à tricoter aimantée, l'expérience montre que chaque moitié d'aiguille est un aimant complet, ayant ses deux pôles dirigés comme dans l'aimant primitif. Chacune de ces deux



moitiés donne à son tour par la rupture deux nouveaux aimants, et ainsi de suite, aussi loin qu'on peut pousser la division (*fig. 321*). Réciproquement, si l'on rassemble les fragments ainsi séparés en les mettant en contact par leurs



*Fig. 321.* — Expérience des aimants brisés.

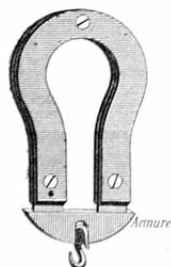
pôles de noms contraires, tous les pôles intermédiaires disparaissent et l'aimant primitif est reproduit avec ses deux pôles et sa région neutre.

Il résulte de ces expériences qu'un aimant rectiligne de très petite section peut être considéré comme un assemblage de petits aimants particuliers tous orientés dans le même sens. Les pôles intermédiaires se neutralisent et les pôles extrêmes exercent seuls une action extérieure.

La cause de la propriété des aimants était attribuée autrefois à deux fluides magnétiques se développant simultanément et en quantités équivalentes. Aujourd'hui on adopte exclusivement une théorie du magnétisme donnée par Ampère et fondée sur les propriétés des courants électriques (257).

### 237. Principales formes d'aimants. —

Les aimants temporaires obtenus par l'action des courants sur le fer doux portent le nom d'*électro-aimants*. Nous verrons plus loin leur constitution et leurs applications (259).



*Fig. 322.* — Barreau aimanté recourbé en fer à cheval, à trois lames.

Les aimants permanents se font en acier trempé. Les formes que l'on donne ordinairement aux barreaux aimantés sont celles de barreaux droits ou de barreaux recourbés en fer à cheval (*fig. 322*). L'observation ayant montré que l'acier ne s'aimante que superficiellement, on

réunit souvent par leurs pôles de même nom des lames d'acier droites ou courbes, aimantées séparément. Les faisceaux ainsi composés constituent des aimants puissants ; on les emploie principalement dans les machines magnéto-électriques.

**Conservation des aimants permanents.** — Dans un barreau aimanté abandonné à lui-même, l'aimantation va en s'affaiblissant par suite d'une action qui s'exerce entre les différentes parties du barreau. Cette action *démagnétisante* ne se produit pas si aucune ligne de force ne s'échappe à l'extérieur, c'est-à-dire si l'aimant ne donne pas de spectre magnétique. On réalise sensiblement cette condition en pla-



Fig. 323. — Conservation des barreaux aimantés.

çant les barreaux aimantés parallèlement deux à deux dans une boîte, les pôles de noms contraires disposés en regard et réunis par des pièces de fer doux appelées *contacts* ou *armures* (fig. 323). Les armures

s'aimantent par influence et le circuit magnétique se trouve fermé sur lui-même.

On conserve également les aimants en fer à cheval en réunissant les deux pôles par une armure de fer doux. Cette armure est quelquefois munie d'un crochet auquel on suspend les masses que l'on veut faire porter par l'aimant.

#### MAGNÉTISME TERRESTRE

**238. Considérations générales.** — Nous avons vu qu'une aiguille aimantée suspendue horizontalement et abandonnée à elle-même prend une direction fixe qui est sensiblement celle du Sud au Nord ; on en conclut que la Terre crée dans son voisinage un champ magnétique dans lequel les lignes de force sont dirigées sensiblement du Sud au Nord (234).

Le champ magnétique terrestre, dans un espace restreint, est un champ *uniforme*, c'est-à-dire que les lignes

de force sont parallèles entre elles (234). La direction que prend l'aiguille aimantée varie d'un point du globe à un autre, mais dans tout l'intérieur d'une salle, par exemple, cette direction est rigoureusement la même, pourvu qu'il n'y ait aucune pièce en fer dans le voisinage de l'aiguille.

L'action du champ terrestre est purement directrice. — L'expérience montre qu'une aiguille aimantée placée dans un champ magnétique uniforme, comme le champ terrestre, peut être considérée comme sollicitée par un couple, c'est-à-dire par un système de deux forces égales, parallèles et de sens contraires, appliquées en deux points de l'aiguille.

En effet, d'après un théorème de Mécanique, les forces qui agissent sur un corps solide peuvent toujours être réduites à un couple et à une force résultante indépendante du couple. Or, dans le cas du champ terrestre, le couple existe seul; la force indépendante est nulle, puisqu'elle n'a ni composante horizontale ni composante verticale : 1° *Elle n'a pas de composante horizontale*, car une aiguille aimantée placée sur un bouchon à la surface d'une eau tranquille (fig. 324) s'oriente en tournant avec

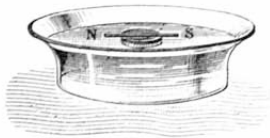


Fig. 324. — Orientation d'une aiguille aimantée placée sur un bouchon flottant.

le bouchon, sans faire éprouver à celui-ci aucun mouvement de translation; 2° *Elle n'a pas de composante verticale*, car la tare qui fait équilibre sur une balance à une aiguille non aimantée fait équi-

libre à la même aiguille après qu'elle est aimantée.

En résumé, l'action exercée par le champ magnétique terrestre est celle d'un couple; elle est donc purement directrice.

**Direction du champ terrestre.** — Le champ magnétique terrestre, qui est uniforme dans un espace restreint, varie en direction et en intensité aux différents points du globe; il se modifie en outre lentement dans un même lieu avec le temps.

Supposons qu'une aiguille aimantée puisse être suspendue par son centre de gravité de manière à se mouvoir librement dans l'espace; cette aiguille se placerait en équilibre dans la direction des deux forces du couple terrestre et ferait ainsi connaître la direction du champ terrestre au lieu de l'expérience. Dans nos régions, une aiguille aimantée ainsi suspendue prendrait à peu près la direction du Sud au Nord, mais elle ne serait pas horizontale et son pôle Nord pointerait vers le sol.

On ne peut réaliser un instrument dans lequel une aiguille aimantée serait suspendue librement par son centre de gravité. Une aiguille aimantée, étant forcément assujettie à l'axe autour duquel elle se meut, ne peut se mouvoir que dans un plan perpendiculaire à cet axe. Dans la pratique, on définit la direction du champ terrestre à l'aide de deux angles, la *déclinaison* et l'*inclinaison*. La déclinaison est donnée par un instrument dans lequel l'aiguille assujettie à un axe vertical se meut dans un plan horizontal; l'inclinaison, par un instrument dans lequel l'aiguille assujettie à un axe horizontal se meut dans un plan vertical.

239. **Déclinaison.** — Rappelons que le *méridien astronomique* ou géographique d'un lieu est le plan qui passe par la verticale du lieu et par l'axe terrestre, et que la *méridienne astronomique* est la trace de ce plan sur le plan de l'horizon du lieu. De même, on appelle *méridien magnétique* d'un lieu le plan qui passe par la verticale du lieu et par la direction du couple terrestre en ce lieu; la *méridienne magnétique* est la trace du méridien magnétique sur

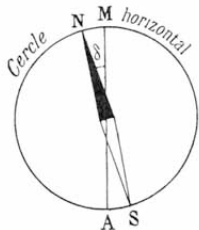


Fig. 325. —  
Angle de déclinaison.

l'horizon géographique.

Cela posé, considérons une aiguille aimantée mobile autour d'un axe vertical, sur un cercle horizontal (*fig. 325*) ; elle se fixe dans le méridien magnétique, et sa direction d'équilibre est elle-même la méridienne magnétique. Supposons que la droite MA soit dans la direction de la méridienne astronomique au lieu de l'expérience. Dans nos régions, le pôle Nord de l'aiguille se place un peu à l'ouest de la droite MA ; l'angle plan  $\delta$  que forment les moitiés Nord de l'aiguille et de la droite MA est la *déclinaison*.

D'une manière générale, on appelle déclinaison en un lieu déterminé, l'angle plan des parties Nord des méridiennes magnétique et astronomique ou, ce qui revient au même, l'angle dièdre formé par les demi-plans Nord du méridien magnétique et du méridien astronomique. La déclinaison est dite *orientale* ou *occidentale*, suivant que le demi-plan Nord du méridien magnétique est à l'est ou à l'ouest du méridien astronomique.

**240. Inclinaison.** — Soit maintenant une aiguille aimantée assujettie à un axe horizontal passant par son centre de gravité, et se mouvant en regard d'un

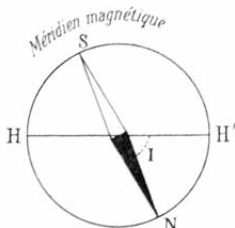


Fig. 326. — Angle d'inclinaison.

cerce dans le méridien magnétique. Dans nos régions, c'est le pôle Nord de l'aiguille qui pointe vers le sol ; le plus petit des deux angles que fait la partie Nord avec l'horizontale est l'*inclinaison*.

D'une manière générale, on appelle inclinaison en un lieu déterminé l'angle que fait la direction des forces du couple terrestre avec l'horizontale du lieu.



3° Si l'aiguille est mobile dans un plan vertical (*aiguille d'inclinaison*), elle prendra la direction de la force  $F$  lorsque ce plan sera le méridien magnétique, et son angle avec l'horizontale mesurera alors l'inclinaison. Dans tout autre plan vertical, le pôle  $N$  est soumis aux deux forces  $X$  et  $Z$  ou à leur résultante  $F'$ . L'aiguille prend la direction  $NF'$ , et l'angle qu'elle fait avec l'horizon dans cette position d'équilibre est un angle  $I'$  différent de  $I$ .

REMARQUE. — On peut calculer facilement la valeur des composantes  $X$ ,  $Y$  et  $Z$ . Appelons  $\alpha$  l'angle  $XNH$ .

$$H = F \cos I, \quad Z = F \sin I,$$

$$X = H \cos \alpha = F \cos I \cos \alpha, \quad Y = H \sin \alpha = F \cos I \sin \alpha.$$

Calculons enfin l'angle  $I'$  :

$$\operatorname{tg} I' = \frac{Z}{X} = \frac{F \sin I}{F \cos I \cos \alpha} = \frac{\operatorname{tg} I}{\cos \alpha}.$$

Si  $\alpha = 90^\circ$ ,  $I' = 90^\circ$ ; l'aiguille aimantée se tient donc *verticale* dans un plan perpendiculaire au méridien magnétique.

**242. Boussoles.** — Les boussoles sont des instruments dont la partie essentielle est une aiguille aimantée mobile dans un plan horizontal ou dans un plan vertical. Dans le premier cas, la boussole est dite de *déclinaison*; dans le second, c'est une *boussole d'inclinaison*. Nous décrirons la boussole mixte de Stroumbo, qui permet de mesurer à la fois la déclinaison et l'inclinaison, et qui est très répandue dans l'Euseignement.

La *boussole de Stroumbo* se compose essentiellement d'un cercle horizontal  $C$  et d'un demi-cercle vertical  $C'$  (*fig. 328*), reliés solidement ensemble et montés à centre sur une colonne verticale dont le pied porte trois vis calantes. L'aiguille de déclinaison  $D$  repose librement par une chape d'agate sur un pivot d'acier fixé au centre du

cercle horizontal C. L'aiguille d'inclinaison I est traversée en son milieu par un axe cylindrique en acier reposant

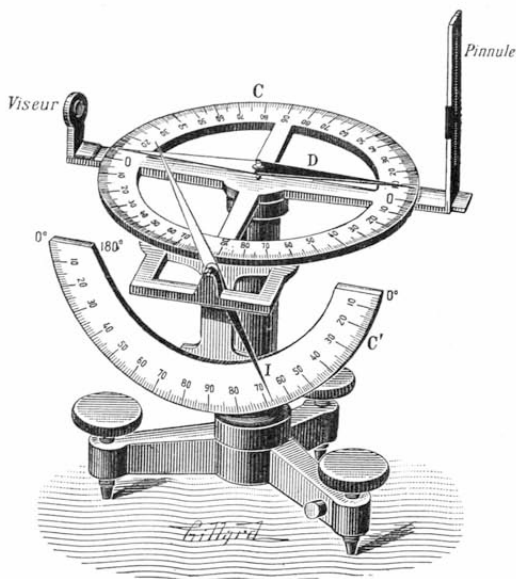


Fig. 328. — Boussole de déclinaison et d'inclinaison de Stroumbo.

sur deux agates dont les arêtes sont dans un même plan horizontal ; elle se meut devant le demi-cercle vertical C'.

**Mesure de la déclinaison.** — L'aiguille I étant enlevée et éloignée, on tourne lentement le cercle C jusqu'à ce que les extrémités de l'aiguille coïncident avec les deux 0° du cercle. Cette direction de l'aiguille aimantée est la direction du méridien magnétique du lieu. — Au cercle C sont fixés solidement un viseur œilleton et une pinnule qui porte un crin tendu verticalement et est divisée dans toute sa hauteur de manière à donner les angles en degrés



en partant de l'horizon. La ligne de visée de l'œilleton et du crin a exactement la même direction que la ligne  $0^\circ - 0^\circ$  du cercle  $C$ , dans un plan parallèle au demi-cercle vertical  $C'$ .

Dans le cas où le méridien astronomique du lieu est connu, on oriente le cercle de manière que la ligne de visée de l'œilleton et du crin se trouve dans ce plan. L'angle formé par l'aiguille aimantée et la ligne  $0^\circ - 0^\circ$  du cercle  $C$  représente la déclinaison.

Si le méridien astronomique n'est pas connu, on dirige un rayon visuel à travers l'œilleton et la pinnule sur un astre connu voisin de l'horizon. On note la hauteur de l'astre au-dessus de l'horizon ainsi que l'angle formé par l'aiguille et la ligne  $0^\circ - 0^\circ$ . Au moyen de tables astronomiques, on calcule l'angle que faisait le plan vertical de l'astre avec le méridien astronomique au moment de l'observation et on en déduit l'angle du méridien magnétique avec le méridien astronomique, c'est-à-dire la déclinaison.

**Mesure de l'inclinaison.** — L'aiguille d'inclinaison étant toujours éloignée de l'instrument, on amène comme précédemment la direction de l'autre aiguille suivant la ligne  $0^\circ - 0^\circ$  du cercle  $C$ ; la direction ainsi réglée représente exactement la direction du méridien magnétique du lieu.

On éloigne alors de l'instrument l'aiguille de déclinaison, et on met en place l'aiguille d'inclinaison, de manière que son pôle Nord oscille librement devant le demi-cercle vertical  $C'$ , dont le plan est parallèle au méridien magnétique du lieu. Lorsque cette aiguille est au repos, le plus petit des deux angles que fait son pôle Nord avec l'horizontale  $0^\circ - 180^\circ - 0^\circ$  est l'inclinaison au lieu de l'expérience.

Si l'on fait tourner la boussole de  $90^\circ$  autour de son centre

(il suffit pour cela d'amener, lors du réglage, les pointes de l'aiguille de déclinaison en coïncidence avec les divisions  $90^\circ - 90^\circ$  du cercle C), l'aiguille d'inclinaison oscillera dans un plan perpendiculaire au méridien magnétique du lieu, et au repos elle se placera verticalement. D'après cela, on peut déterminer le méridien magnétique sans aiguille de déclinaison, en cherchant le plan dans lequel l'aiguille d'inclinaison se tient verticale; ce plan est perpendiculaire au méridien magnétique.

**Applications.** — Quand on connaît la déclinaison en un lieu quelconque, on peut se servir d'une boussole de déclinaison pour la détermination des points cardinaux. De là l'usage de ces boussoles comme indicateur de route ou pour avoir la direction Sud-Nord.

Les boussoles de déclinaison les plus simples sont les



Fig. 329. — Boussole de poche.

*boussoles de poche* (fig. 329). Elles se composent d'un cercle en cuivre, divisé au pourtour, et portant au centre une aiguille aimantée reposant par une chape d'agate sur un pivot d'acier. Quand une boussole est placée horizontalement, la direction de l'aiguille est à peu près celle du Sud-Nord. Si l'on veut obtenir

exactement la direction Sud-Nord, il faut tenir compte de la déclinaison.

On emploie les boussoles de déclinaison dans les travaux d'arpentage, de nivellement, de géodésie, de topographie. Dans la *boussole d'arpenteur* (fig. 330), le pivot qui supporte l'aiguille aimantée repose sur le fond d'une boîte carrée que l'on place horizontalement à l'aide d'un niveau à bulle d'air. Parallèlement à l'un des bords de la boîte est fixé un viseur en acajou qui peut tourner autour d'un axe horizontal. Cette boussole sert pour orienter le contour des terrains, lever des plans, etc. Lorsqu'un point est vu à travers le viseur, la boussole donne l'angle que fait le plan vertical contenant la

ligne de visée avec l'aiguille et, par suite, avec le méridien astronomique, en tenant compte de la déclinaison au lieu de l'observation.

La *boussole marine* ou compas de variation sert à maintenir un navire dans la direction qu'il doit suivre. Elle se compose d'une boîte de cuivre, suspendue à la Cardan de manière à conserver la position horizontale malgré les oscillations du navire (fig. 331). Le fond de cette boîte porte un pivot vertical sur lequel repose une aiguille aimantée. L'aiguille n'est pas visible; elle est recouverte par un disque mince en talc ou en mica portant, marqués sur sa surface, les degrés de la circonférence et une étoile à 32 branches

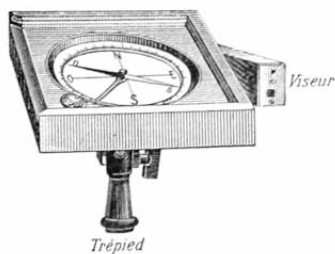


Fig. 330. — Boussole d'arpenteur.



Fig. 331. — Boussole marine.

appelée *rose des vents*. Les quatre branches principales désignent les quatre points cardinaux; l'une des branches, terminée par une petite étoile, correspond à l'aiguille qui est sous le disque et marque la direction du méridien magnétique. Enfin sur la paroi interne de la boîte est tracée une ligne parallèle à l'axe du navire et appelée *ligne de foi*.

La boussole marine se place à l'arrière du navire, dans l'*habitacle* où se tient le timonier chargé de la manœuvre du gouvernail. Le timonier, d'après la situation géographique du lieu où se trouve le navire, sait quel angle fait la route à suivre avec la ligne Sud-Nord; il sait, par suite, en tenant compte des variations de la déclinaison sur les différents points du globe, quel angle doit faire l'aiguille aimantée avec la ligne de foi. Il tourne le gouvernail de manière à amener la ligne de foi à coïncider avec la pointe de la rose des vents qui désigne la direction à suivre.

### 243. Variations de la déclinaison et de l'inclinaison. —

La déclinaison et l'inclinaison varient, non seulement d'un lieu à un autre du globe, mais encore en un lieu donné avec le temps.

**Variations de la déclinaison.** — Parmi les variations auxquelles est soumise la déclinaison en un lieu donné, les unes sont lentes, régulières, et constituent des sortes d'oscillations autour d'une position moyenne ; telles sont les variations *séculaires* et les variations *diurnes*. Les autres sont irrégulières et se produisent brusquement ; on les appelle des variations *accidentelles*.

Les *variations séculaires* se déterminent en évaluant en un lieu donné la déclinaison moyenne de l'année, et comparant entre elles les moyennes d'un certain nombre d'années successives.

A Paris, les observations ont commencé en 1580 ; la déclinaison était alors orientale et égale à  $41^{\circ} 30'$  ; en 1664, l'aiguille aimantée marquait exactement la direction Sud-Nord. Depuis cette époque, la déclinaison est occidentale ; elle a été en augmentant jusqu'en 1824 où elle a atteint  $22^{\circ} 34'$ , puis elle a commencé à décroître. Sa valeur absolue, déterminée à l'Observatoire du Parc Saint-Maur, était, au 1<sup>er</sup> janvier 1898, de  $44^{\circ} 56'$ , en diminution de  $3' 30''$  pour l'année 1897.

Les *variations diurnes* sont peu importantes. Dans nos climats, on voit l'extrémité Nord de l'aiguille de déclinaison se diriger vers l'ouest à partir de 7<sup>h</sup> du matin et jusque vers 2<sup>h</sup> du soir ; elle revient ensuite vers l'est pour reprendre une marche semblable le jour suivant, et ainsi de suite. Ces écarts réguliers ne dépassent guère une dizaine de minutes.

Enfin les *variations accidentelles* sont dues à des sortes d'orages magnétiques qui coïncident généralement avec l'apparition d'aurores boréales ou de tremblements de terre. Ces variations se produisent simultanément, avec des inten-

sités diverses, en un grand nombre de points de la surface du globe ; elles n'ont le plus souvent qu'une durée de quelques heures.

La manière la plus simple d'exprimer l'état de la déclinaison sur la surface du globe à une époque déterminée est de porter les nombres trouvés sur une carte et de réunir tous les points où la déclinaison a la même valeur. On obtient ainsi des courbes assez irrégulières que l'on appelle *lignes d'égale déclinaison* ou *lignes isogones*. L'examen des cartes magnétiques montre que la déclinaison varie beaucoup d'un point à l'autre du globe. A l'époque actuelle, une ligne sans déclinaison traverse l'Amérique et, dans l'autre hémisphère, le nord de la Russie, la Perse et l'Australie ; elle divise ainsi la surface du globe en deux régions : l'une qui comprend toute l'Europe, et dans laquelle la déclinaison est occidentale ; l'autre, qu'on peut appeler région de l'Océan Pacifique, et dans laquelle la déclinaison est orientale. Enfin une autre ligne de déclinaison nulle se montre au nord de la Chine, mais elle affecte une forme fermée.

En France, les lignes isogones vont du S-S-O au N-N-E ; les valeurs extrêmes sont d'environ  $12^{\circ}$  à Nice et  $18^{\circ}$  à Brest.

**Variations de l'inclinaison.** — Les observations relatives à la valeur de l'inclinaison à Paris datent seulement de 1671. A cette époque, elle était d'environ  $75^{\circ}$  ; elle a toujours été en décroissant depuis et sa valeur absolue, déterminée au Parc Saint-Maur le 1<sup>er</sup> janvier 1898, était de  $64^{\circ} 58' 54''$ , en diminution de  $1' 54''$  pour l'année 1897.

Les courbes d'*égale inclinaison* ou *lignes isoclines* sont plus régulières que les lignes isogones ; elles ressemblent grossièrement à des parallèles correspondant à un axe légèrement incliné sur l'axe terrestre et aboutissant à deux points ;

l'un situé au nord de l'Amérique à  $15^\circ$  du pôle arctique, l'autre situé à  $18^\circ$  environ du pôle antarctique. En ces points l'inclinaison est de  $90^\circ$  et l'aiguille se tient verticale ; ce sont les *pôles magnétiques* de la Terre. La ligne d'inclinaison nulle porte le nom d'*équateur magnétique* ; elle représente sensiblement un grand cercle coupant l'équateur géographique en deux points situés à peu près aux extrémités d'un même diamètre. Au nord de l'équateur magnétique, le pôle Nord de l'aiguille pointe vers le sol ; au sud de cette ligne, c'est au contraire le pôle Sud de l'aiguille qui s'incline au-dessous de l'horizon.

### RÉSUMÉ DU CHAPITRE XXVI

Les aimants ont la propriété d'attirer le fer. Les aimants *naturels* sont de l'oxyde  $Fe^2O^3$ . Les aimants *artificiels* sont constitués par de l'acier (barreaux aimantés, aiguilles aimantées), ou par du fer doux (électro-aimants).

Les deux extrémités d'un aimant sont seules actives ; ce sont les *pôles*. La région moyenne (zone neutre) est sans action sur la limaille de fer.

Une aiguille aimantée rendue mobile dans un plan horizontal prend à peu près la direction Sud-Nord ; le pôle qui se dirige vers le Nord s'appelle *pôle Nord*, le pôle qui se dirige vers le Sud, *pôle Sud*.

Si l'on présente un aimant fixe à un aimant mobile, on constate que deux pôles de même nom se repoussent et que deux pôles de noms contraires s'attirent.

Tout aimant crée autour de lui un *champ magnétique*. Ce champ est caractérisé par les lignes de force que dessine de la limaille de fer projetée sur du carton recouvrant l'aimant. La disposition que prennent les parcelles de limaille est due à ce que toute substance magnétique placée dans un champ magnétique devient elle-même un aimant (aimantation par *influence*).

Les aimants artificiels s'obtenaient autrefois par des frictions répétées avec des barreaux déjà aimantés ; aujourd'hui on aimante presque exclusivement par les courants. Le fer doux ne peut donner que des aimants *temporaires* (électro-aimants). L'acier fournit des aimants *permanents*, auxquels on donne différentes formes (barreaux droits, barreaux en fer à cheval, faisceaux, etc.).

La Terre crée dans son voisinage un champ magnétique qui est *uniforme* dans un espace restreint. Un aimant placé dans ce champ est sollicité par un couple et subit une action purement *directrice*. La direction du champ terrestre en un lieu donné se définit dans la pratique à l'aide de deux angles, la déclinaison et l'inclinaison.

Lorsqu'une aiguille aimantée est fixée sur un pivot vertical de

manière à se mouvoir librement dans un plan horizontal, elle ne prend pas exactement dans nos régions la direction Sud-Nord ; son extrémité Nord fait avec la direction de la méridienne géographique un angle plan que l'on appelle la *déclinaison* au lieu de l'expérience.

Si l'aiguille se meut dans un plan vertical qui est le méridien magnétique, le pôle Nord de l'aiguille pointe vers le sol dans nos régions et le plus petit des deux angles que fait la partie Nord avec l'horizontale est l'*inclinaison*.

La déclinaison et l'inclinaison en un lieu donné se déterminent à l'aide de *boussoles*, dont la partie essentielle est une aiguille aimantée mobile dans un plan horizontal (boussole de déclinaison) ou dans un plan vertical (boussole d'inclinaison). Il existe des boussoles mixtes (boussole de Stroumbo). Les boussoles de déclinaison servent à indiquer la direction Sud-Nord quand on connaît la déclinaison au lieu de l'expérience ; les principaux types sont les boussoles de poche, les boussoles d'arpentage et les boussoles marines.

La déclinaison subit en un même lieu des variations *régulières* (variations séculaires et variations diurnes) et des variations *irrégulières* (variations accidentelles). A Paris, elle est actuellement d'environ  $15^\circ$ . La déclinaison varie aussi d'un lieu du globe à un autre ; les lignes d'égale déclinaison s'appellent lignes *isogones*.

Les variations séculaires de l'inclinaison sont moins importantes que celles de la déclinaison. A Paris, l'inclinaison est actuellement d'environ  $65^\circ$ . Les lignes d'égale inclinaison sont des lignes *isoclines*.

#### EXERCICES SUB LE CHAPITRE XXVI

65. Une aiguille aimantée est mobile autour d'un axe perpendiculaire à la ligne des pôles. Quelle position faut-il donner à cet axe pour que l'aiguille ne soit pas influencée par la Terre ?

66. Sachant que le plan vertical dans lequel est mobile l'aiguille d'une boussole d'inclinaison fait un angle de  $45^\circ$  avec le méridien magnétique, quel est l'angle de l'aiguille avec l'horizontale ?

#### CHAPITRE XXVII

#### ÉLECTROMAGNÉTISME

244. Définition. — L'électromagnétisme est la partie de l'électricité dynamique qui a pour objet l'étude des actions qu'un

courant exerce extérieurement à son circuit. Cette partie est ainsi appelée à cause des relations étroites qu'elle présente avec le magnétisme ; elle a son origine dans l'expérience faite par OErstedt en 1820.

245. **Expérience d'OErstedt.** — Soit une aiguille aimantée mobile sur un pivot vertical et en équilibre dans le

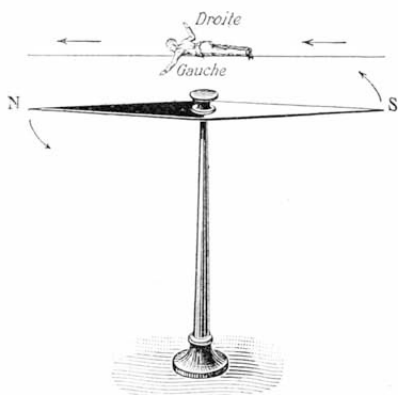


Fig. 332. — Expérience d'OErstedt.

méridien magnétique (fig. 332). Disposons un fil métallique au-dessus de l'aiguille, parallèlement à sa direction ; dès que le fil est traversé par un courant, l'aiguille est déviée de sa position d'équilibre. La force à laquelle est due

cette action d'un courant sur une aiguille aimantée a été appelée *force électromagnétique*.

Le sens de la déviation dépend du sens du courant et de la position du conducteur ; il peut être prévu dans tous les cas en appliquant une règle simple formulée par Ampère : *Si l'on suppose un observateur couché sur le conducteur dans une position telle que le courant lui entre par les pieds et sorte par la tête, l'observateur tournant la face vers l'aiguille verra toujours le pôle Nord dévié vers sa gauche.* On convient d'attribuer cette gauche au courant lui-même, et l'on dit que le pôle Nord de l'aiguille se porte toujours à la gauche du courant.



Il faut remarquer que l'aiguille se mettrait toujours en croix avec le courant si l'action directrice de la terre ne tendait sans cesse à la ramener dans le méridien magnétique. Sous l'influence combinée de ces deux actions, la déviation de l'aiguille est d'autant plus grande que le courant est plus intense. Si, comme l'a fait Ampère, on oriente une petite boussole perpendiculairement à la direction du champ terrestre, l'aiguille est soustraite aux forces du couple terrestre et elle se dispose toujours perpendiculairement à un fil parcouru par un courant.

L'expérience d'Ørstedt a reçu une application directe dans la plupart des *galvanomètres*.

**246. Premières notions sur les galvanomètres.** — On donne le nom de galvanomètres aux instruments qui servent à mesurer l'intensité d'un courant ou le rapport des intensités de deux courants. Les galvanomètres industriels ou *ampère-mètres* font connaître directement les intensités en ampères; on les étalonne en se basant sur la définition pratique de l'ampère (222).

Comme la mesure spéciale des intensités des courants fait partie du cours de Première-Sciences, nous ne décrivons pour le moment que les galvanomètres ordinaires (galvanomètre de Nobili et boussole-galvanomètre).

**Galvanomètre de Nobili.** — C'est un galvanomètre dans lequel l'effet du courant est augmenté par l'emploi d'un *multiplicateur* rectangulaire et l'action antagoniste de la Terre diminuée par l'emploi d'un système d'aiguilles aimantées *astatiques*. Cette double disposition permet d'obtenir des déviations appréciables avec des courants faibles.

**MULTIPLICATEUR ET SYSTÈME ASTATIQUE.** — Soit un circuit rectangulaire vertical ABCDE (*fig. 333*), au centre duquel se trouve une aiguille aimantée mobile dans un plan ho-

horizontal. Il est facile de voir que si l'on fait glisser le long

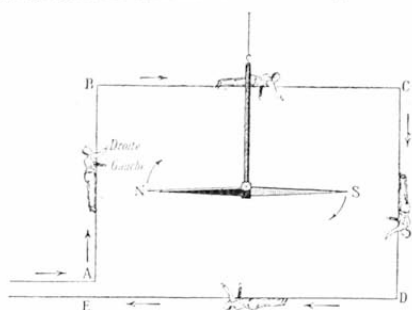


Fig. 333. — Principe du multiplicateur.

du circuit l'observateur conventionnel d'Ampère, en lui maintenant constamment la face tournée vers l'aiguille aimantée, sa gauche reste toujours du même côté. Les quatre parties AB, BC, CD, DE agissent dans le même sens, et font dévier le pôle Nord en arrière du plan ABCD, le courant allant de A vers E. On augmente encore l'action du courant en isolant le fil conducteur avec de la soie et en le faisant tourner un certain nombre de fois, toujours dans le

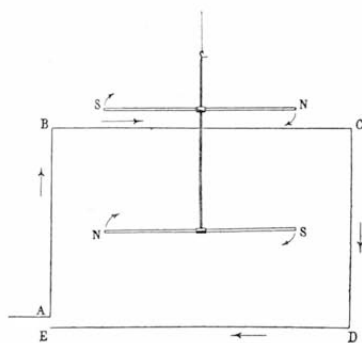


Fig. 334. — Disposition du multiplicateur et du système astatique dans le galvanomètre.

même sens, autour de l'aiguille, car les actions exercées par les différents tours sont évidemment concordantes. Le cadre ainsi construit a reçu le nom de *multiplicateur*.

Considérons maintenant un système de deux aiguilles aimantées fixées parallèlement l'une à l'autre mais en sens

contraire à un même support de manière qu'elles ne puissent tourner l'une sans l'autre (fig. 334). Un pareil système

est un système *astatique*. Plaçons l'une des aiguilles à l'intérieur du cadre ABCDE et l'autre au-dessus et en dehors. Les quatre parties du cadre agissent sur l'aiguille intérieure comme ci-dessus et font dévier son pôle Nord en arrière du plan du cadre. Quant à l'aiguille extérieure, on voit, en appliquant la règle d'Ampère, que la partie la plus rapprochée BC tend à la faire tourner dans le même sens que l'aiguille intérieure, et les trois autres parties AB, CD, DE en sens inverse. L'action exercée par BC prédomine à cause de la moindre distance, de sorte que l'effet du courant est plutôt augmenté que diminué par la présence de l'aiguille extérieure. — L'avantage principal du système astatique est la diminution de l'action directrice de la Terre : si les deux aiguilles avaient une aimantation identique, le système serait indifférent à l'action magnétique terrestre et le courant le plus faible mettrait les aiguilles en croix avec le cadre. Dans la pratique, l'une des aiguilles est un peu plus fortement aimantée, de sorte que la Terre exerce sur le système une légère action directrice; cette action augmente avec la déviation et finit par annuler l'action du courant.

DESCRIPTION. — Le multiplicateur est un cadre rectangulaire aplati (*fig. 335*), sur lequel s'enroule un grand nombre de fois un fil de cuivre recouvert de soie blanche. Les extrémités de ce fil aboutissent à deux bornes métalliques assujetties sur une planchette extérieure et auxquelles on fixe les fils conducteurs du courant. Sur les côtés du multiplicateur sont deux colonnes portant un bouton de rappel auquel est suspendu par un fil de cocon le système astatique des deux aiguilles. L'aiguille supérieure seule marque les déviations; elle se meut au-dessus d'un cercle en cuivre rouge dont la graduation s'étend de

0 à 90° de part et d'autre. Le multiplicateur est fixé sur

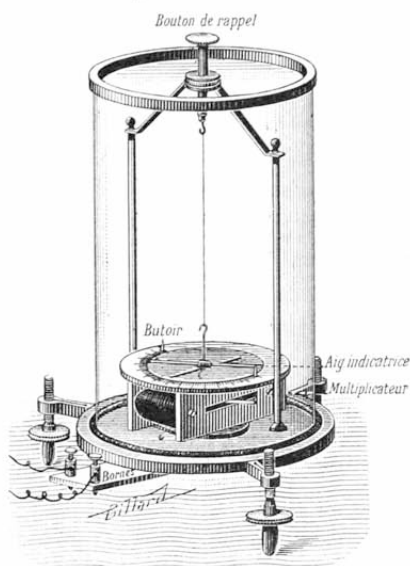


Fig. 335. — Galvanomètre de Nobili.

un plateau tournant en laiton, porté lui-même par un trépied en laiton muni de trois vis calantes. Enfin le multiplicateur et le système astatique sont enfermés dans une cage de verre qui les protège contre les poussières et l'agitation de l'air.

**FONCTIONNEMENT ET USAGES.** — Quand on veut se servir du galvano-

mètre, on le place de niveau à l'aide des vis calantes et on relève le bouton de rappel afin de permettre aux aiguilles de se placer librement dans le méridien magnétique, puis on fait tourner le multiplicateur et le cercle gradué solidaire jusqu'à ce que le 0 de la graduation vienne se placer devant une des extrémités de l'aiguille supérieure. Si l'on fait alors passer un courant dans le fil du multiplicateur, les aiguilles sont déviées, et le sens de la déviation indique la direction du courant dans le fil. Quant à son intensité, on ne peut la considérer comme proportionnelle à la déviation que si la déviation est très faible; pour des écarts angulaires dépassant une quinzaine de degrés, il faudrait établir directement une

table de graduation donnant l'intensité du courant correspondant à chaque déviation.

Outre cet inconvénient, le galvanomètre de Nobili présente celui de nécessiter un réglage avant de s'en servir : le méridien magnétique ayant une direction donnée au lieu où l'on se trouve, l'orientation du galvanomètre n'est pas indifférente, ce qui est un inconvénient dans la pratique, où l'on cherche à obtenir des indications rapides.

Le galvanomètre de Nobili sert le plus souvent comme *galvanoscope* pour les expériences de cours. Nous avons vu qu'il fait partie du thermomultiplicateur destiné à l'étude de la chaleur rayonnante (433).

**Boussoles-galvanomètres.** — Les boussoles-galvanomètres

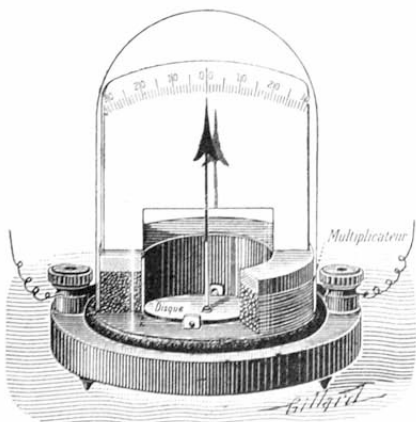


Fig. 336. — Boussole-galvanomètre.

ont été destinées à montrer l'existence et le sens d'un courant à un nombreux auditoire (*fig. 336*).

L'aimant sur lequel doit agir le courant est un barreau d'acier ou un disque aimanté; il est mobile comme un fléau de balance et est muni d'une aiguille qui lui est perpendiculaire et qui se déplace sur un cadran vertical divisé.

**247. Champ d'un courant. Lignes de force galvaniques.**

— Il résulte de l'expérience d'Ørstedt qu'un courant doit créer autour de lui un champ analogue à celui que produirait un aimant; c'est ce que l'expérience vérifie. On

appelle *champ galvanique* l'espace qui entoure un conducteur traversé par un courant électrique. Cet espace est rempli par des lignes de force qui jouissent des mêmes propriétés que les lignes de force d'un champ magnétique; mais tandis que celles-ci sont permanentes, les lignes de force galvaniques commencent et finissent avec le courant, et n'existent par suite qu'à la condition de dépenser une certaine quantité d'énergie électrique dans le conducteur qu'elles entourent.

**Champ d'un courant rectiligne.** — Prenons une feuille de carton horizontale traversée en son centre par un conducteur vertical AB, assez long pour pouvoir être considéré

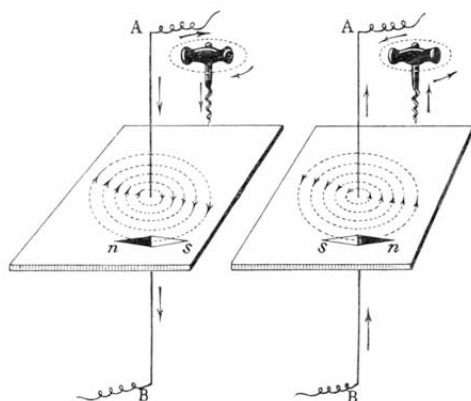


Fig. 337. — Spectre d'un courant rectiligne (sens des lignes de force).

comme indéfini (fig. 337). Faisons passer un courant dans ce conducteur et projetons en même temps de la limaille de fer sur la feuille. En facilitant le groupement des particules de limaille par de légères se-

cousses, nous les verrons former des circonférences concentriques à l'axe du fil conducteur. Ces circonférences figurent les lignes de force du champ du courant; elles deviennent de plus en plus rares à mesure que l'on s'éloigne du fil (fig. 338).

Le sens des lignes de force, c'est-à-dire le sens de la rota-

tion d'un pôle Nord autour du courant (234), est donné par la règle mnémorique suivante due à Maxwell : *Le sens des lignes de force est celui dans lequel on doit faire tourner un tire-bouchon pour qu'il s'avance dans la direction du courant.* D'après cette règle, si le courant était descendant (fig. 337), un pôle Nord parfaitement libre tendrait à tourner dans le sens des aiguilles d'une montre ; il tendrait à tourner en sens contraire si le courant était ascendant.

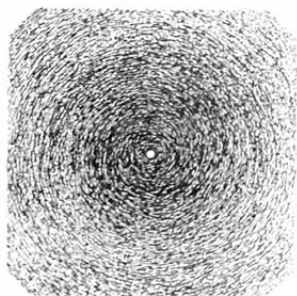


Fig. 338. — Spectre d'un courant rectiligne (section perpendiculaire).

Comme une aiguille aimantée libre de se mouvoir le long d'une ligne de force se dispose tangentiellment à la courbe qui passe par son centre de gravité, on voit qu'au voisinage d'un courant rectiligne, cette aiguille tendra à se mettre en croix avec le courant (expérience d'Ørstedt). La règle du tire-bouchon indique les positions relatives des deux pôles.

Comme une aiguille aimantée libre de se mouvoir le long d'une ligne de force se dispose tangentiellment à la courbe qui passe par son centre de gravité, on voit qu'au voisinage d'un courant rectiligne, cette aiguille tendra à se mettre en croix avec le courant (expérience d'Ørstedt). La règle du tire-bouchon indique les positions relatives des deux pôles.

Comme une aiguille aimantée libre de se mouvoir le long d'une ligne de force se dispose tangentiellment à la courbe qui passe par son centre de gravité, on voit qu'au voisinage d'un courant rectiligne, cette aiguille tendra à se mettre en croix avec le courant (expérience d'Ørstedt). La règle du tire-bouchon indique les positions relatives des deux pôles.

**Champ d'un courant circulaire.** — Soit un cadre circulaire fermé, perpendiculaire à une feuille de carton hori-

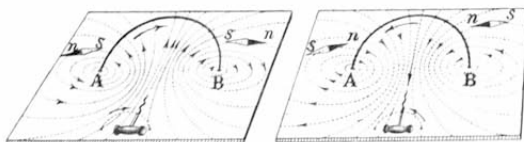


Fig. 339. — Spectre d'un courant circulaire.

zontale qu'il traverse suivant un diamètre en deux points A et B (fig. 339). Les lignes de force dessinées par la limaille sur la feuille sont des circonférences de plus en plus déformées. Leur sens s'obtient par la règle du tire-

bouchon modifiée de la manière suivante : si l'on fait tourner le tire-bouchon parallèlement à l'axe et dans le sens du courant, le sens dans lequel il tend à progresser est celui des lignes de force à l'intérieur du cadre.

Les lignes de force ont, comme on le voit, la même forme que celles d'un aimant circulaire plat, sans épaisseur, dont une des faces serait un pôle Nord et l'autre un pôle Sud. Ce système a reçu le nom de *feuillelet magnétique*.

Un feuillelet magnétique et un aimant exercent entre eux les mêmes actions que deux aimants ; ils se repoussent ou s'attirent suivant la direction de leurs lignes de force mutuelles. Pour déterminer les pôles d'un feuillelet magnétique, il suffit de remarquer qu'un observateur placé devant le pôle Sud voit le courant tourner dans le sens des aiguilles d'une montre.

**Propriétés physiques des lignes de force.** — Les spectres formés par les lignes de force mettent en évidence deux propriétés importantes indiquées par Faraday :

1° *Deux lignes de force parallèles et de même sens se repoussent ;*

2° *Les lignes de force tendent à se raccourcir.*

**CONSÉQUENCES.** — Ces deux propriétés permettent non seulement d'expliquer la forme que prennent les lignes de force dans les différents spectres magnétiques, mais encore de prévoir le sens des différentes actions électromagnétiques.

Considérons, par exemple, un aimant. Les lignes de force vont à l'extérieur du pôle Nord au pôle Sud. D'après la première propriété, elles s'écartent mutuellement, mais d'après la seconde, elles tendent toutes à prendre la forme rectiligne, de sorte qu'elles prennent finalement une forme courbe pour laquelle leur répulsion mutuelle compensera leur tendance à se raccourcir. En vertu de leur tension, les lignes de force tendent à rapprocher les pôles Sud et Nord auxquels elles aboutissent, de là l'attraction qui s'exerce entre deux pôles de noms contraires.

Si les deux pôles en présence sont de même nom, les lignes de force étant dirigées dans le même sens se courberont pour s'écarter les unes des autres. Les deux pôles se repousseront par suite de la répulsion qui s'exerce entre les



deux faisceaux dont les lignes de force déformées tendent à reprendre leur forme rectiligne primitive.

**248. Réciproque de l'expérience d'Ørstedt.** — Puisqu'une aiguille aimantée est déviée par un courant, il est naturel de penser que, si l'aimant est fixe et le conducteur mobile, ce dernier tournera de manière à laisser à sa gauche le pôle Nord de l'aimant. Cette réciproque de l'expérience d'Ørstedt se vérifie facilement au moyen de *courants mobiles*.

Les courants mobiles sont faits avec du fil d'aluminium et ont généralement la forme rectangulaire (*fig. 340*). Une des extrémités du fil se termine par une pointe fixée au centre d'un disque de caoutchouc durci et reposant sur le fond d'un godet contenant du mercure ; l'autre extrémité se termine à un anneau de cuivre entourant le disque. Cet anneau communique par trois tiges de cuivre avec un an-

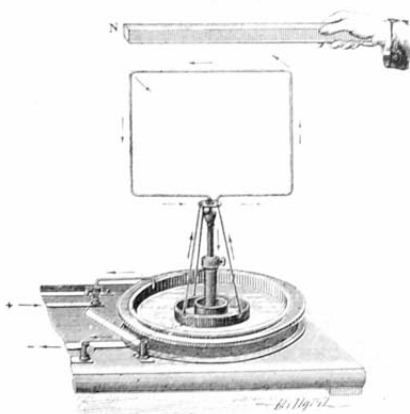


Fig. 340. — Action d'un aimant fixe sur un courant mobile.

neau inférieur plus grand, qui plonge dans l'eau acidulée d'un vase métallique. Le courant arrive aux parois du vase, gagne le petit anneau de cuivre, parcourt le fil d'aluminium et va à la borne de sortie par une colonne centrale isolée qui supporte

le godet à mercure. Le sens du courant peut être renversé dans ce circuit en employant un commutateur (250).

Si l'on approche un barreau aimanté d'un circuit mobile ainsi disposé, le courant tourne et tend à se mettre en croix avec le barreau en laissant le pôle Nord à gauche. L'effet est maximum lorsque le barreau est au centre du cadre, car les actions des différentes parties du rectangle sont alors concourantes.

**249. Rotations électromagnétiques.** — On appelle ainsi les mouvements de rotation continus, dans un sens déterminé, qui peuvent résulter de l'action réciproque d'aimants et de courants.

**Rotation d'un aimant par un courant.** — Dans une éprouvette remplie de mercure flotte verticalement un aimant de

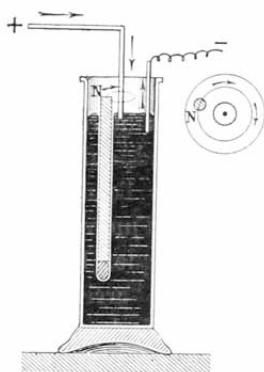


Fig. 341. — Rotation d'un aimant par un courant.

forme cylindrique (fig. 341), lesté inférieurement par un cylindre de platine et dépassant le niveau du mercure de quelques millimètres. Le courant arrive par une tige fixe placée au centre et laissant l'aimant en dehors; il suit la surface du mercure et s'échappe par un conducteur qui plonge dans le mercure près de la paroi de l'éprouvette. Un commutateur permet de faire suivre au courant une marche inverse. Dès que

le courant passe, on voit l'aimant tourner autour de la tige fixe.

On prévoit facilement le sens de la rotation dans chaque cas en considérant le sens des lignes de force du courant (247). En supposant que le pôle Nord émerge et que le courant descende la tige fixe, comme dans la figure 341, ce pôle tend à suivre les lignes de force et tourne dans le sens des

aiguilles d'une montre. Il tournerait en sens contraire si le sens du courant était renversé.

**Rotation d'un courant par un aimant.** — On montre très simplement cette rotation à l'aide d'un petit appareil imaginé par M. Joubert. Il consiste en un large tube de verre fermé par deux bouchons (*fig. 342*). Le bouchon inférieur est traversé en son milieu par un petit barreau aimanté autour duquel on verse un peu de mercure.

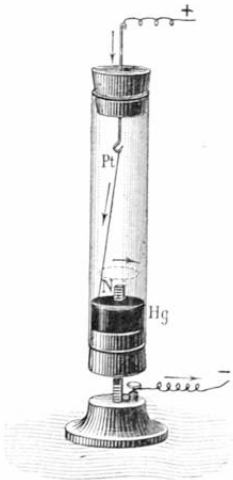


Fig. 342. — Rotation d'un courant par un aimant.

Le courant mobile est un petit fil de platine fixé au bouchon supérieur; son extrémité inférieure plonge dans le mercure. Si le pôle émergent est un pôle Nord et que le courant soit descendant,

le fil de platine tourne dans le sens des aiguilles d'une montre.

**Roue de Barlow.** — La roue de Barlow montre nettement les effets de rotation produits par un aimant sur un courant.

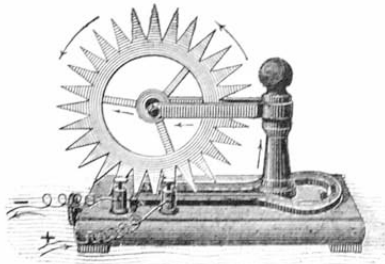


Fig. 343. — Roue de Barlow.

Elle se compose d'une roue métallique dentée mobile autour d'un axe horizontal et baignant à sa partie inférieure dans une cavité remplie de mercure (*fig. 343*). Un aimant en fer à cheval comprend la cavité entre ses deux branches. Si l'on relie

l'axe de la roue à l'un des pôles d'une pile et le mercure à l'autre pôle, le courant électrique passe suivant le rayon de la roue et celle-ci se met à tourner dans un sens qui dépend du sens du courant et de la position des pôles de l'aimant.

### ÉLECTRODYNAMIQUE

**250. Définition.** — L'électrodynamique a pour objet l'étude des actions mécaniques qui s'exercent entre des conducteurs métalliques parcourus par des courants. Ces actions consistent en déplacements, orientations, rotations ; elles diffèrent suivant la direction des courants en présence et leur position relative. La force qui les produit a reçu le nom de *force électrodynamique*.

Dans les expériences d'électrodynamique, on a souvent besoin de changer le sens des courants. On emploie pour cela de petits appareils appelés *commutateurs*. Le plus employé est celui de Bertin (fig. 344). Il se compose d'une planchette sur laquelle est fixé un disque en ébonite que l'on peut faire tourner entre deux arrêts. Le disque porte deux lames de

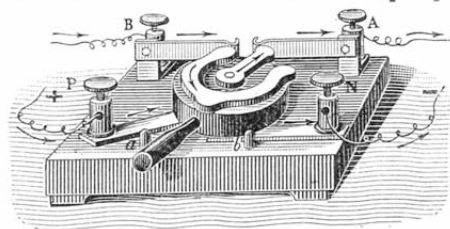


Fig. 344. — Commutateur de Bertin.

cuivre : une lame centrale droite en communication avec la borne amenant le courant ; une lame en fer à cheval en communication avec la borne négative. Les deux lames peuvent communiquer par frottement avec deux lames élastiques de cuivre. Quand la poignée est au milieu des deux arrêts, le courant ne passe pas ; il va du côté de A quand la poignée est contre l'arrêt *a*, du côté de B quand elle est contre l'arrêt *b*.

**251. Lois d'Ampère.** — L'action mutuelle de deux cou-

rants est soumise aux lois suivantes énoncées par Ampère :

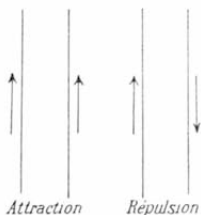


Fig. 345. — Action réciproque de deux courants parallèles.

1° Loi des courants parallèles : Deux courants parallèles et de même sens s'attirent ; deux courants parallèles et de sens contraires se repoussent (fig. 345).

Cette loi importante se vérifie avec la table d'Ampère, modifiée par Bertin (fig. 346).

Nous avons déjà décrit le conducteur mobile (248). Le conducteur fixe est un cadre de bois sur lequel est

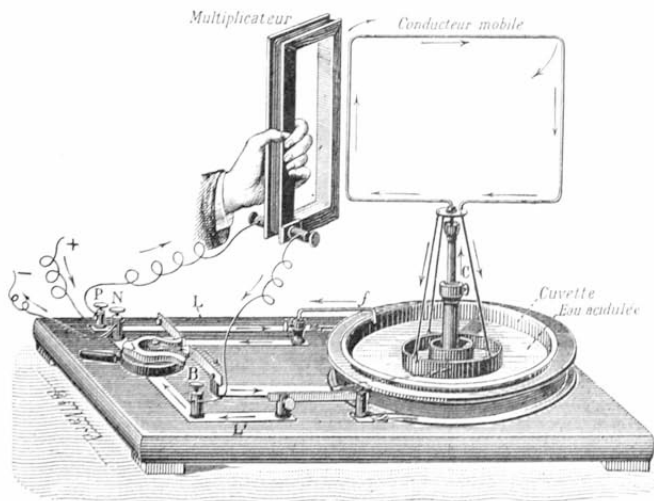


Fig. 346. — Table d'Ampère modifiée par Bertin.

enroulé un grand nombre de fois un fil de cuivre recouvert de soie. Le courant de la pile arrive à la borne P ; une partie gagne le multiplicateur ou conducteur fixe ; l'autre partie parcourt successivement une lame métallique L, un fil con-

ducteur enroulé autour d'une cuvette métallique, une lame métallique  $L'$  et l'axe central d'un commutateur; de là cette même partie gagne la colonne centrale  $C$ , parcourt le conducteur mobile dans le sens indiqué par les flèches et revient enfin à la borne  $N$  par l'intermédiaire de la cuvette métallique, d'un fil  $f$  et de la bande en fer à cheval du commutateur. La cuvette reçoit de l'eau acidulée contenant  $\frac{1}{40}$  d'acide azotique et  $\frac{1}{40}$  d'acide sulfurique.

Le conducteur mobile étant au repos, on prend à la main le conducteur fixe et on l'approche de l'une des branches verticales du conducteur mobile; on constate une attraction si les deux courants sont de même sens, une répulsion s'ils sont de sens contraires.

Une expérience imaginée par Roget montre d'une façon

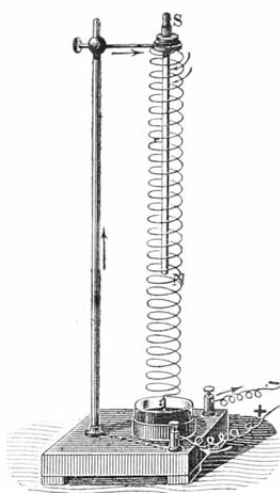


Fig. 347. — Expérience de Roget.

curieuse l'attraction des courants parallèles de même sens. On fait passer un courant dans une hélice métallique verticale dont l'extrémité inférieure plonge légèrement dans du mercure (fig. 347); les spires, parcourues par des courants parallèles de même sens, s'attirent, se rapprochent et l'extrémité inférieure sort du mercure. Le courant est alors interrompu, les spires retombent par leur propre poids, le courant passe de nouveau et le mouvement de va et vient des spires continue indéfiniment. Les mouvements des spires sont plus étendus si l'on place un barreau aimanté suivant l'axe de l'hélice.

REMARQUE. — La considération des propriétés des lignes de force permet de se rendre compte de la loi des courants

parallèles. Soient deux conducteurs rectilignes parcourus par des courants de même sens. Déterminons le spectre dans un plan perpendiculaire aux deux fils ; les lignes de force tournent dans le même sens autour d'eux (247). Les lignes de force des deux champs dans la région comprise entre les deux conducteurs sont donc opposées et par suite s'attirent et se combinent. Elles forment des courbes allongées qui, cherchant à se raccourcir, tendent à rapprocher les conducteurs.

Si les courants sont de sens contraires, les lignes de force entre les deux conducteurs sont déformées en sens inverse ; elles tendent à reprendre la forme circulaire, qui est la plus courte pour le même espace embrassé ; par suite les deux conducteurs se repoussent.

2° Loi des courants angulaires : Deux courants angulaires s'attirent quand ils s'approchent ou s'éloignent tous deux de leur

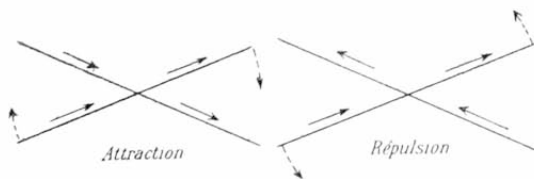


Fig. 348. — Action des courants croisés.

point de croisement ; ils se repoussent si l'un s'en approche, tandis que l'autre s'en éloigne (*fig.* 348).

Pour vérifier cette loi, on fait encore usage de la table de Bertin ; mais au lieu de présenter le cadre fixe parallèlement à l'un des côtés verticaux du cadre mobile, on le présente en croix au-dessus de la branche horizontale supérieure. Le cadre mobile se met à tourner jusqu'à ce qu'il ait pris la même direction que le courant le plus voisin dans le multiplicateur.

Donc les courants croisés tendent à devenir *parallèles* et de *même sens*.

3° Loi des courants sinueux : Un courant sinueux agit comme

un courant rectiligne de même intensité et de même sens, ayant les mêmes extrémités et dont il s'écarte peu.



Fig. 349. — Disposition employée pour montrer les actions d'un courant droit et d'un courant sinueux.

En remplaçant le multiplicateur de l'appareil de Bertin par un fil conducteur replié de sorte que les deux branches très voisines soient parcourues par des courants contraires (fig. 349), on n'observe aucune action sur le cadre mobile, ce qui doit être, puisque les actions exercées par les deux courants de sens contraires s'annulent. Le résultat est le même si la branche descendante du fil conducteur est sinieuse et s'écarte très peu de la branche rectiligne ascendante, ce qui prouve que les actions de la partie sinieuse et de la partie rectiligne qu'elle a remplacée sont égales.

252. Rotation des courants par les courants. — Nous

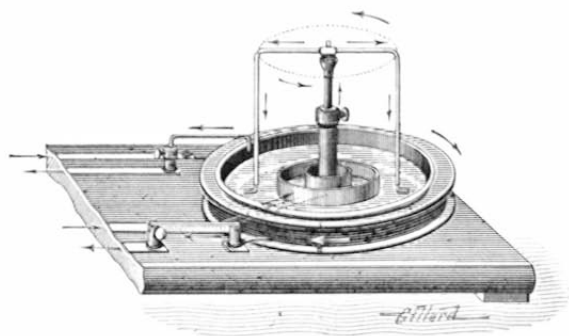


Fig. 350. — Rotation d'un courant horizontal (rotation gauche ou inverse).

prendrons comme exemple la rotation d'un courant horizontal mobile autour d'un axe vertical.

La colonne C de l'appareil de Bertin étant descendue à



une hauteur convenable, on fait reposer dans son godet à mercure la pointe du conducteur mobile (fig. 350). Si le courant entre par la colonne centrale, il est dit *centrifuge* : la rotation est gauche, c'est-à-dire que son sens est inverse de celui du courant qui circule autour de la cuvette. Si le courant monte par les branches verticales du conducteur mobile, il est dit *centripète* : la rotation est droite ou directe.

Ces effets de rotation s'expliquent facilement en s'appuyant sur la loi des courants angulaires.

**253. Action de la Terre sur les courants.** — La Terre agit sur les courants comme les courants eux-mêmes ; tout se passe comme si elle était parcourue par un courant indéfini allant de l'Est à l'Ouest et perpendiculaire au méridien magnétique.

**Orientation d'un courant vertical.** — *Tout conducteur vertical parcouru par un courant et mobile autour d'un axe parallèle, se place sous l'influence de la Terre dans un plan perpendiculaire au méridien magnétique et s'arrête à l'Est de son axe s'il est descendant, à l'Ouest s'il est ascendant.*

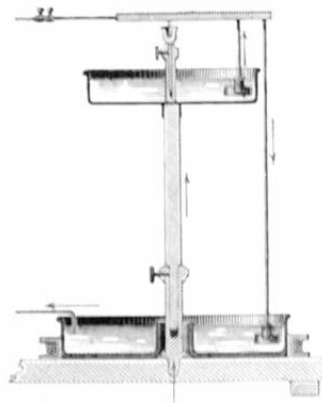


Fig. 351. — Orientation d'un courant vertical sous l'influence de la Terre.

Pour réaliser l'expérience, on place au centre de la cuvette métallique de l'appareil de Bertin une colonne terminée par une cuvette plus petite contenant également de l'eau acidulée, et l'on

prend pour conducteur mobile un fil de cuivre terminé par des palettes (*fig. 351*). Le fil communiquant avec le pôle positif de la pile est attaché à la borne B (*fig. 346*). Le conducteur mobile ne subit plus alors d'autre action que celle de la Terre; il se meut lentement et finit par

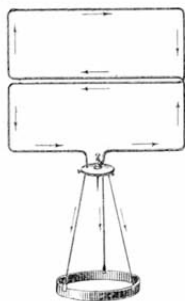


Fig. 352. — Cadre astatique.

les composant de deux surfaces planes égales sur le contour desquelles le même courant circule en sens contraires (*fig. 352*).

s'arrêter à l'est de la colonne s'il est descendant, à l'ouest s'il est ascendant. Il se place donc comme il ferait sous l'action d'un courant horizontal allant de l'Est à l'Ouest.

**Cadres astatiques.** — On dit que des cadres parcourus par des courants sont astatiques lorsqu'ils sont indifférents à l'action de la Terre. Ces cadres sont utiles dans les expériences d'électrodynamique quand on ne dispose pas d'un courant intense. On rend des cadres astatiques en

### SOLÉNOÏDES

**254. Définition.** — On donne le nom de solénoïde à un ensemble de circuits plans identiques, très rapprochés, parallèles et

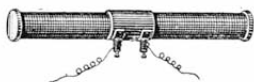
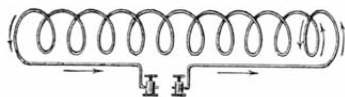


Fig. 353. — Solénoïde.

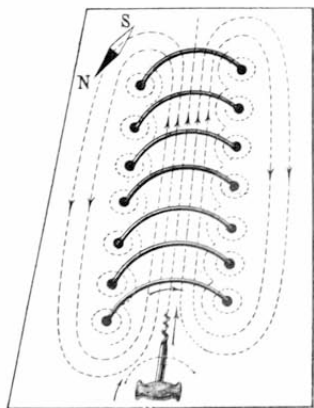
équidistants, tous perpendiculaires à une même ligne appelée axe du solénoïde et parcourus par un courant de même sens.

Dans la pratique, on réalise un solénoïde en

enroulant sur la surface d'un cylindre un fil conducteur en hélice à spires serrées (*fig. 353*); le fil est recouvert de soie pour empê-

cher les communications d'une spire à l'autre. Chaque spire équivaut à un cercle perpendiculaire à l'axe plus une petite portion rectiligne égale au pas de l'hélice. Le système parcouru par un courant équivaut donc à une série de courants circulaires augmentée d'un courant rectiligne parallèle à l'axe et de même longueur. Ordinairement on ramène le fil des extrémités vers le milieu afin de compenser les parties rectilignes qui font passer le courant d'une spire à l'autre, mais l'effet de ces parties est de peu d'importance.

**255. Champ galvanique d'un solénoïde.** — Dans un plan passant par l'axe du solénoïde, le spectre présente une ressemblance frappante avec celui d'un aimant (*fig. 354*).



*Fig. 354.* — Disposition des lignes de force d'un solénoïde.

A l'intérieur du solénoïde, les lignes de force forment un faisceau parallèle à l'axe et donnent un champ uniforme ; elles divergent aux extrémités et forment des courbes ondulées qui enveloppent de part et d'autre une des moitiés de la coupe du solénoïde. Plus les spires du solénoïde sont rapprochées, plus le spectre ressemble à celui d'un aimant droit ; aussi admet-on qu'à

la limite il y aurait identité. Quant au sens des lignes de force, il est encore donné par la règle du tire-bouchon de Maxwell : si l'on suppose un tire-bouchon fixé dans le prolongement d'un solénoïde et qu'on le fasse tourner dans

*le sens du courant, le sens dans lequel il tend à progresser est celui des lignes de force.*

**256. Propriétés des solénoïdes.** — Les solénoïdes jouissent des mêmes propriétés que les aimants : leurs extrémités s'attirent ou se repoussent : ils se dirigent dans le méridien magnétique quand ils sont libres de se mouvoir autour d'un axe vertical.

Pour mettre ces propriétés en évidence, il faut employer des courants intenses, les pôles d'un solénoïde étant relativement faibles.

**Orientation d'un solénoïde par la Terre.** — Si l'on dispose un solénoïde mobile (*fig. 355*) sur la colonne cen-

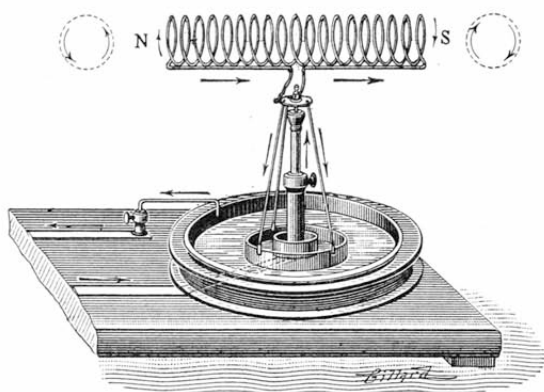


Fig. 355. — Orientation d'un solénoïde par la Terre.

trale de l'appareil de Bertin, et si on l'abandonne à lui-même, son axe prend la direction de l'aiguille de déclinaison. L'extrémité du solénoïde, par laquelle sortent les lignes de force, se dirige vers le Nord ; on l'appelle le *pôle Nord* du solénoïde. Un observateur placé en face du pôle Nord y voit le courant circuler en sens inverse du mouvement

des aiguilles d'une montre. Si l'on renverse le sens du courant à l'aide du commutateur, le solénoïde se retourne aussitôt.

**Action des aimants sur les solénoïdes.** — On présente au pôle Nord du solénoïde mobile, le pôle Nord d'un barreau aimanté tenu à la main : il y a répulsion. Si on lui présente le pôle Sud du barreau, il y a attraction.

**Action des solénoïdes sur les solénoïdes.** — Le multiplicateur de l'appareil de Bertin étant remplacé par un solénoïde fixe, on présente les pôles de ce dernier à ceux du

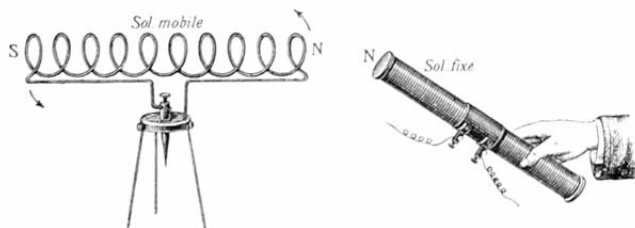


Fig. 356. — Action des solénoïdes entre eux.

solénoïde mobile (*fig. 356*). On constate l'attraction des pôles de noms contraires et la répulsion des pôles de même nom. L'action est la même que l'action réciproque de deux aimants l'un sur l'autre.

**Action des courants sur les solénoïdes.** — On remplace le solénoïde fixe par un long fil conducteur flexible et, tenant ce fil à la main, on le présente parallèlement au-dessus du solénoïde mobile orienté dans le méridien magnétique. Le solénoïde mobile se met en croix avec le conducteur rectiligne, son pôle Nord à gauche.

**257. Théorie du magnétisme d'Ampère.** — Ampère frappé de l'analogie si complète qui existe entre les

aimants et les solénoïdes, émit une hypothèse qui fait rentrer tous les phénomènes magnétiques dans les phénomènes électrodynamiques.

Dans cette hypothèse, les phénomènes magnétiques sont dus à des courants circulaires préexistant autour de chaque molécule des substances magnétiques. Avant l'aimantation, les courants moléculaires sont orientés dans tous les sens et n'exercent aucune action sur l'extérieur. Sous l'influence d'un courant ou d'un aimant puissant, ces courants sont tous amenés à circuler dans le même sens et leurs plans deviennent parallèles; un barreau aimanté peut alors être considéré comme un faisceau de petits solénoïdes dont les pôles de même nom sont tous situés vers la même extrémité du barreau.

L'ensemble de ces solénoïdes agit sensiblement comme un solénoïde unique. Considérons en effet une section

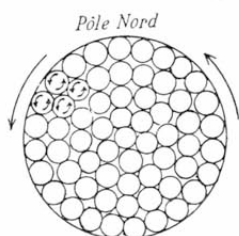


Fig. 357. — Section théorique d'un barreau aimanté d'après l'hypothèse d'Ampère.

quelconque d'un barreau aimanté (*fig. 357*). D'après Ampère, on doit y voir autant de courants circulaires de même intensité qu'il y a de molécules. Or ces courants tournant tous dans le même sens, sont de sens opposés dans leurs parties contiguës et s'annulent mutuellement. Les seules portions de courants efficaces sont celles du pourtour exté-

rieur; l'action exercée par leur ensemble est évidemment la même que celle d'un courant circulaire unique de même intensité qui envelopperait le barreau aimanté.

Quand l'action magnétisante cesse, tous les courants mobiles que nous venons de considérer reprennent très rapidement leur position primitive si le barreau est en fer

doux. Dans l'acier trempé, ils conservent en grande partie leur orientation.

REMARQUE. — Le calcul démontre que, dans un solénoïde, les pôles sont rigoureusement aux extrémités de l'axe. Il n'en est pas de même dans un aimant. Par les actions mutuelles des courants moléculaires, les axes des solénoïdes qui constituent un aimant se courbent près des extrémités et tendent à se rapprocher de la section médiane. Les pôles d'un aimant sont donc à une certaine distance des extrémités.

#### AIMANTATION PAR LES COURANTS

**258. Expérience d'Arago.** — Si l'on plonge un fil de cuivre parcouru par un courant dans de la limaille de fer, celle-ci s'y attache abondamment; chaque parcelle de limaille s'aimante et se dispose perpendiculairement à la longueur du fil, son pôle Nord à la gauche du courant. Cette expérience, faite par Arago en 1820, est une conséquence de la théorie d'Ampère sur la constitution des substances magnétiques.

L'aimantation des substances magnétiques par le courant est rendue plus sensible quand on emploie le procédé d'Ampère. La substance magnétique sous forme de barreau est introduite dans une hélice constituée par un fil de cuivre; dès que le courant traverse le fil, le barreau se trouve fortement aimanté.

**Applications.** — Pour aimanter un barreau de fer ou

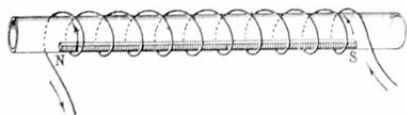


Fig. 358. — Aimantation d'un barreau de fer ou d'acier.

d'acier, on le place à l'intérieur d'un tube de verre creux sur lequel est enroulé en hélice un fil de cuivre tra-

versé par un courant (*fig. 358*). Le sens des lignes de force

ne dépend que du sens dans lequel le courant circule autour de l'axe ; il détermine le sens de l'aimantation, le pôle Nord se formant à la sortie des lignes, le pôle Sud à l'entrée. On peut dire aussi que le pôle Nord se forme à l'extrémité de l'hélice où l'on voit le courant circuler en sens inverse du mouvement des aiguilles d'une montre. Si le barreau soumis à l'influence du courant est en fer doux, son aimantation cesse presque entièrement avec le courant. S'il est en acier trempé, l'aimantation persiste, en décroissant toutefois lentement jusqu'à ce que le barreau arrive à un état de saturation stable.

REMARQUE. — Supposons qu'après avoir enroulé d'abord le fil conducteur dans un certain sens on le replie deux fois de manière à changer le sens du courant et par suite celui du champ. Outre les pôles des extrémités, il se forme dans ce cas autant de pôles intermédiaires ou de *points consécutifs* qu'il y a de changements dans le sens du courant.

259. **Électro-aimants.** — On donne le nom d'électro-aimants, ou simplement d'électros, à des aimants temporaires constitués par un noyau de fer doux sur lequel est enroulé en hélices superposées un fil de cuivre isolé. Dès que le courant passe dans le fil conducteur, le noyau s'aimante, un pôle Nord prend naissance à une extrémité, un pôle Sud à l'autre extrémité. Si le fer est bien doux, l'aimantation cesse quand on interrompt le passage du courant.

*Différentes formes d'électro-aimants.* — Les électro-aimants présentent différentes formes suivant les applications auxquelles ils sont destinés.

Dans les *électro-aimants droits* (fig. 359), le noyau de fer doux est rectiligne. A une première couche de fil conducteur enroulée par exemple de droite à gauche, est superposée une seconde couche enroulée toujours dans le



même sens, mais de gauche à droite, et ainsi de suite.

Le plus souvent, on rapproche l'un de l'autre les deux extrémités du noyau de manière à leur permettre d'agir simultanément. Le noyau peut être recourbé en *fer à cheval*

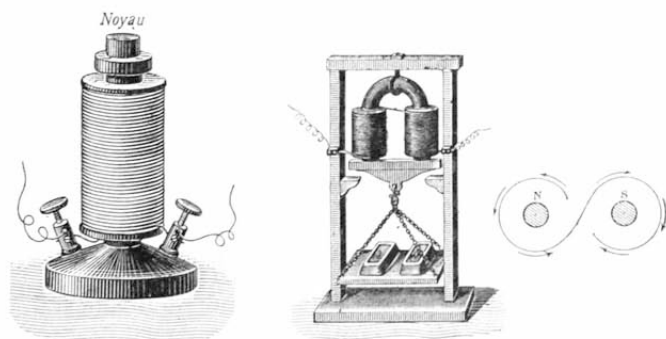


Fig. 359. — Électro-aimant droit Fig. 360. — Électro-aimant en fer à cheval.

*cheval* (fig. 360). Le fil conducteur s'enroule alors sur chacune des extrémités et passe d'une branche à l'autre sans recouvrir la partie courbe. On règle le sens de l'enroulement de manière qu'en supposant le noyau redressé et les branches superposées par leurs faces supérieures, l'hélice de l'une soit la continuation de l'hélice de l'autre ; l'enroulement paraît alors de sens contraires sur les deux branches à un observateur qui voit à la fois les deux

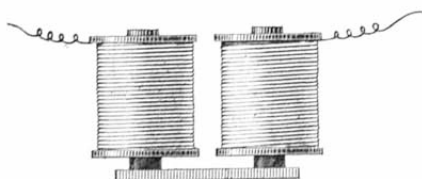


Fig. 361. — Electro-aimant à trois pièces.

extrémités. Au lieu de recourber le noyau en fer à cheval, ce qui peut donner naissance à une certaine

force coercitive, on préfère ordinairement réunir deux noyaux parallèles

par une traverse ou culasse de fer doux (*fig. 361*); le fil conducteur est enroulé sur chacun des noyaux. La construction de ces électro-aimants à trois pièces est plus simple que celle des électro-aimants en fer à cheval.

Enfin les *électro-aimants annulaires* sont constitués par un anneau de fer doux recouvert de spires équidistantes situées dans des plans passant par l'axe. Cette forme est très usitée dans les machines magnéto et dynamo-électriques.

**Applications.** — Les électro-aimants jouent un rôle essentiel dans une foule d'applications de l'électricité dynamique : sonneries électriques, télégraphes, téléphones, machines dynamo-électriques, moteurs électromagnétiques, horloges électriques, régulateurs de lumière électrique, etc. Outre qu'ils sont plus puissants que les aimants permanents, ils présentent sur ces derniers l'avantage d'être essentiellement temporaires, de n'exister que pendant le passage du courant. Cependant si le fer qui constitue les électro-aimants n'est pas absolument pur, l'armature ne se détache pas immédiatement après l'ouverture du circuit. On évite cet inconvénient dans la pratique, soit en interposant une mince feuille de papier entre les pôles et l'armature, soit en munissant l'armature d'un ressort antagoniste qui ne l'empêche pas d'être attirée quand le courant passe, mais qui l'éloigne aussitôt que le courant cesse.

**260. Flux d'induction qui traverse un électro actif.** — L'induction magnétique dans un électro actif dépend à la fois de l'intensité du champ magnétique que produit l'hélice magnétisante dans son intérieur et de la perméabilité du noyau de fer doux. L'intensité  $\mathcal{H}$  du champ intérieur d'une hélice magnétisante a pour valeur

$$\mathcal{H} = \frac{4\pi nI}{10^7} = \frac{1,256nI}{l},$$

$n$  désignant le nombre des spires,  $I$  l'intensité du courant en ampères,  $l$  la longueur de l'hélice en centimètres. Le facteur  $\mathcal{H}$  est souvent appelé *force magnétisante*, et le produit  $nI$ , le nombre d'*ampères-tours* par centimètre. Si l'on introduit dans l'hélice un noyau de fer doux ayant un diamètre suffisant pour le remplir exactement, l'induction magnétique dans l'électro sera (235)

$$\mathcal{B} = \mathcal{H} \mu = \frac{1,256nI\mu}{l},$$

$\mu$  étant le coefficient de perméabilité du fer, c'est-à-dire le rapport entre le flux d'induction qui traverse l'électro actif et le flux qui traversait l'hélice avant l'introduction du noyau. Le premier de ces flux a évidemment pour valeur  $\mathcal{B}S$ ,  $S$  désignant la section de l'hélice.

## RÉSUMÉ DU CHAPITRE XXVII

Si l'on place un conducteur parcouru par un courant au-dessus d'une aiguille aimantée en équilibre dans le méridien magnétique, l'aiguille est déviée (expérience d'Ørstedt), et son pôle Nord se porte à la gauche du courant (règle d'Ampère).

Les *galvanomètres* servent à mesurer l'intensité d'un courant. Dans le galvanomètre ordinaire, on augmente l'effet du courant en plaçant l'aiguille aimantée à l'intérieur d'un cadre rectangulaire (multiplicateur) dont toutes les parties agissent dans le même sens; en outre, l'action de la Terre est diminuée par l'emploi d'un système de deux aiguilles disposées les pôles de noms contraires en regard (aiguilles astatiques). L'aiguille supérieure se meut au-dessus d'un cadran gradué fixé sur le multiplicateur. Lorsqu'un courant parcourt le fil du multiplicateur, les aiguilles sont déviées du méridien magnétique et le sens de la déviation indique le sens du courant dans le fil.

Un courant crée autour de lui un champ analogue à celui d'un aimant. Si le courant est *rectiligne*, les lignes de force forment des circonférences concentriques à l'axe du conducteur; leur sens est celui dans lequel on doit faire tourner un tire-bouchon pour qu'il s'avance dans la direction du courant. Si le courant est *circulaire*, les lignes de force ont la même forme que celles d'un aimant circulaire plat dont une des faces serait un pôle Nord et l'autre un pôle Sud.

Tout courant mobile, soumis à l'influence d'un aimant fixe, dévie de manière à laisser à sa gauche le pôle Nord de l'aimant (réciproque de l'expérience d'Ørstedt). Enfin on obtient des mouvements de rotation continus, dans un sens déterminé, quand on fait agir un

courant fixe sur un aimant mobile (expérience de Faraday), ou un aimant fixe sur un courant mobile (expérience de M. Joubert).

L'action mutuelle de deux courants (courant fixe et courant mobile) est soumise aux lois d'Ampère : Deux courants parallèles et de même sens s'attirent ; deux courants parallèles et de sens contraires se repoussent. Deux courants angulaires s'attirent quand ils s'approchent ou s'éloignent tous deux de leur point de croisement ; ils se repoussent si l'un s'en approche tandis que l'autre s'en éloigne. Un courant sinueux agit comme un courant rectiligne ayant les mêmes extrémités.

La Terre agit sur les courants mobiles comme si elle était parcourue par un courant indéfini allant de l'Est à l'Ouest et perpendiculaire au méridien magnétique.

Un solénoïde est un ensemble de courants circulaires parallèles et équidistants, tous perpendiculaires à un même axe. Le spectre d'un solénoïde présente une ressemblance frappante avec celui d'un aimant ; on s'explique ainsi pourquoi les solénoïdes se comportent comme les aimants. Ce résultat permet de prévoir l'action exercée sur un solénoïde mobile par la Terre, par un aimant fixe, par un solénoïde fixe, par un courant fixe. Ampère a rattaché les phénomènes magnétiques à des courants moléculaires existant dans les substances magnétiques. Sous l'influence d'un courant ou d'un aimant, ces courants s'orientent dans le même sens et leur ensemble agit comme un faisceau de solénoïdes dont les pôles de même nom sont vers la même extrémité.

Un courant aimante les substances magnétiques (expérience d'Arago). Pour aimanter une substance magnétique, on l'introduit sous forme de barre dans une hélice constituée par un fil de cuivre : dès que le courant traverse l'hélice, le barre est fortement aimanté. L'aimantation est temporaire avec le fer doux, permanente avec l'acier. Les *électro-aimants* sont constitués par un noyau de fer doux sur lequel est enroulé en hélices superposées un fil de cuivre isolé. On leur donne différentes formes (électros droits, en fer à cheval, à trois pièces). Ils ont une foule d'applications (sonneries télégraphes, etc.).

#### EXERCICES SUR LE CHAPITRE XXVII

67. Avec un circuit comprenant une pile, un galvanomètre et une résistance inconnue  $x$ , on obtient dans les expériences les déviations suivantes : 1° avec la résistance  $x$ ,  $17^{\text{div}}$ , 5 ; 2° avec une résistance de  $15^{\text{ohms}}$ , la résistance  $x$  étant hors du circuit,  $15^{\text{div}}$ , 3. En supposant que les intensités du courant soient proportionnelles aux déviations et que les résistances de la pile et du galvanomètre soient négligeables, trouver la valeur de la résistance  $x$ .

68. Quelle est la valeur du flux d'induction qui traverse un électro-

aimant actif dont l'hélice magnétisante a 1<sup>m</sup> de longueur et 1<sup>cm</sup> de diamètre? L'hélice est formée par 200 tours de fil, et elle est parcourue par un courant de 5 ampères.

---

## CHAPITRE XXVIII

## INDUCTION ÉLECTROMAGNÉTIQUE

**261. Considérations générales.** — On appelle courants d'induction ou courants induits des courants temporaires qui prennent naissance dans des circuits fermés sous l'influence d'aimants ou de courants. Ils ont été découverts par Faraday en 1831.

D'une façon générale, soit un circuit fermé placé dans le champ magnétique d'un aimant ou dans le champ galvanique d'un courant. *Toutes les fois qu'on modifie le nombre des lignes de force ou, autrement dit, le flux d'induction (234) qu'intercepte le circuit, il y a production dans ce circuit d'une force électromotrice d'induction et par suite d'un courant d'induction.* Le système qui produit le champ s'appelle l'*inducteur* ; le circuit dans lequel prend naissance le courant d'induction s'appelle l'*induit*.

On peut faire varier de deux manières différentes le nombre des lignes de force qui traversent l'induit : 1° En déplaçant l'induit dans le champ de l'inducteur ou inversement ; en un mot, en effectuant un *déplacement relatif* de l'induit et de l'inducteur ; 2° En faisant varier le *pouvoir magnétique* de l'inducteur, le nombre de lignes de force étant, par définition, proportionnel à ce pouvoir magnétique. Dans les deux cas, la durée du courant induit est égale à celle de la variation du flux. Quant au sens de ce courant, il peut être déter-

miné à chaque instant en appliquant la loi suivante, connue sous le nom de loi de Lenz : Le sens du courant induit produit dans un circuit fermé par une variation de flux donnée est tel qu'il s'oppose à chaque instant à la variation qui se produit. D'après cela, si le flux diminue, le courant induit devra s'opposer à la diminution et être de *même sens* que celui qui produirait le flux ; si le flux augmente, le courant induit devra s'opposer à l'augmentation et être de *sens inverse* à celui qui produirait le flux.

262. Induction par un aimant. — Soit une bobine creuse formée par l'enroulement d'un long fil de cuivre

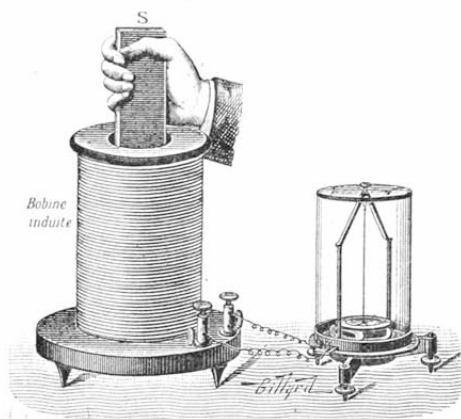


Fig. 362. — Induction par un aimant.

recouvert de soie (fig. 362). Relions les deux extrémités du fil aux bornes d'un galvanomètre et introduisons brusquement dans la bobine un fort barreau aimanté ; le galvanomètre accuse la production d'un courant induit. Tant que le barreau reste immobile dans la bobine, il ne se produit aucun courant. Si nous retirons vivement le barreau, le galvanomètre accusera un courant induit de sens contraire au premier.

Supposons que le barreau ait été introduit dans la bobine par son pôle Nord. On a fait passer brusquement un grand nombre de lignes de force à travers la bobine, et ces lignes sont dirigées de haut en bas : le courant induit qui se produit donne un flux dirigé de bas en haut. Quand on retire le

recouvert de soie (fig. 362). Relions les deux extrémités du fil aux bornes d'un galvanomètre et introduisons brusquement dans la bobine un fort barreau aimanté ; le galvanomètre accuse la production

barreau, on fait disparaître brusquement ces lignes de force : le courant induit qui se produit donne un flux dirigé de haut en bas.

On obtient également des courants induits, dont le sens est toujours déterminé par la loi de Lenz, en approchant ou éloignant brusquement un fort barreau aimanté d'un noyau de fer doux placé suivant l'axe de la bobine précédente.

**263. Induction par un courant.** — L'induction par un courant se démontre ordinairement avec deux bobines de

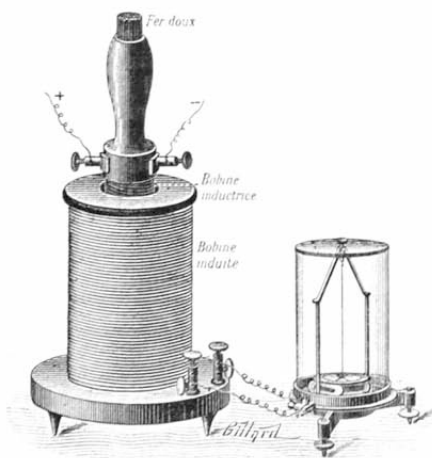


Fig. 363. — Induction par un courant.

fil métallique isolé, pouvant être placées l'une dans l'autre (fig. 363). La première est la bobine *inductrice*; les deux bouts de son fil communiquent avec une pile, mais par l'intermédiaire d'un commutateur (250) qui permet d'établir, de rompre ou de renverser le courant à volonté. La seconde est la bobine *induite*; elle est reliée à un galvanomètre.

1° Les deux bobines étant l'une dans l'autre, si l'on fait passer le courant de la pile dans la bobine inductrice, l'aiguille du galvanomètre subit une impulsion, puis revient immédiatement à sa position d'équilibre. Le sens de cette impulsion indique que le courant produit dans la

bobine induite est *inverse* du courant inducteur. L'aiguille demeure fixe aussi longtemps que le courant de la pile reste établi sans changement dans la bobine inductrice. Si on rompt ce courant, on a une impulsion égale à la première, mais de sens contraire. Le courant induit a alors même sens que le courant inducteur; il est *direct*.

Au moment de la fermeture du circuit inducteur, le courant inducteur développe un champ dont une partie des lignes de force traverse le circuit induit. En appliquant successivement la règle du tire-bouchon, puis la loi de Lenz, on détermine aisément d'abord le sens des lignes de force inductrices, puis celui du courant induit *inverse* qui prend naissance. Si on rompt le circuit inducteur, il y a décroissance du nombre des lignes de force qui traversent le circuit induit; le courant induit donne un champ de même sens que celui du courant inducteur et, les spires des deux bobines étant parcourues dans le même sens, le courant induit est *direct*.

On obtient aussi des courants induits par accroissement ou diminution d'intensité du courant inducteur. Pour cela, on intercale dans le circuit inducteur une résistance que l'on peut faire varier rapidement. Quand on diminue brusquement cette résistance, l'intensité du courant inducteur augmente et il se produit un courant induit *inverse*; quand on augmente brusquement cette résistance, l'intensité du courant inducteur diminue et il se produit un courant induit *direct*.

2° La bobine inductrice étant parcourue par le courant de la pile, on la prend à la main et on la plonge brusquement dans la cavité de la bobine induite; l'aiguille du galvanomètre est déviée et le sens de la déviation indique que le courant induit est *inverse* du courant inducteur. L'aiguille revient de suite à sa position d'équilibre et y reste tant que la distance des deux bobines reste cons-



tante. Si on enlève brusquement la bobine inductrice, la bobine induite devient le siège d'un courant induit *direct*.

En résumé, tout courant qui *commence, augmente d'intensité* ou *s'approche* près d'un circuit fermé, voisin et parallèle, développe dans ce circuit un courant induit *inverse* du sien. Tout courant qui *finit, diminue d'intensité* ou *s'éloigne* développe un courant induit *direct*.

REMARQUES. — 1° Les expériences précédentes ne peuvent être réalisées qu'à la condition d'obtenir des forces électromotrices suffisamment grandes; c'est pour cela que l'on emploie comme inducteur et comme induit des bobines recouvertes de fil long et isolé. Chaque spire de la bobine inductrice agissant sur toutes les spires de la bobine induite, la grandeur de la force électromotrice est en quelque sorte multipliée par le produit des nombres des spires des deux bobines.

2° On accroit notablement les courants induits en plaçant à l'intérieur de la bobine inductrice un barreau de fer doux ou un faisceau de fils de fer doux (*fig. 363*). A cause de la grande perméabilité du fer, les lignes de force du champ inducteur se concentrent dans les spires induites et leur nombre se trouve ainsi considérablement augmenté, ce qui fait croître dans le même rapport le pouvoir inducteur.

**264. Self-induction.**— Les réactions qui s'exercent entre deux circuits voisins peuvent se produire d'une manière analogue entre deux éléments consécutifs d'un même circuit, quand l'intensité du courant varie. Ce phénomène est désigné sous le nom d'*induction propre* ou de *self-induction*, et les courants induits produits sont encore quelquefois appelés *extra-courants*. Ils sont surtout sensibles dans des circuits qui renferment des bobines de fil enroulé en hélice, principalement des bobines à noyau de fer doux. Les résultats de la self-induction sont généralement nuisibles.

Comme les courants de self-induction se produisent

lorsque l'intensité du courant inducteur varie, il y a deux cas à distinguer :

1° *L'intensité du courant inducteur augmente*, comme, par exemple, lorsqu'on ferme le circuit inducteur; d'après la loi de Lenz, le courant de self-induction est un courant *inverse* qui, parcourant le même fil que le courant inducteur, diminue pour un moment l'intensité de ce dernier. Il retarde l'établissement du régime.

2° *L'intensité du courant inducteur diminue*, comme, par exemple, lorsqu'on rompt le circuit; le courant de self-induction est *direct* et agit dans le même sens que le courant principal. Il a pour résultat de prolonger un instant l'effet du courant principal et de rendre plus forte l'étincelle qui accompagne la rupture.

265. **Propriétés des courants induits.** — Les courants induits suivent les mêmes lois que les courants des piles et déterminent dans leur circuit les mêmes effets : physiologiques, calorifiques, lumineux ; ils créent autour d'eux un champ galvanique, aimantent les substances magnétiques et donnent eux-mêmes naissance à de nouveaux courants induits.

La durée des courants induits étant égale à celle de la variation d'intensité ou du mouvement relatif qui leur donne naissance est *très petite*, mais la quantité d'électricité qu'ils mettent en mouvement est relativement considérable, même dans des circuits assez résistants. C'est grâce à cette propriété que leur emploi s'est généralisé aussi rapidement dans les machines magnéto et dynamo-électriques, les téléphones, les bobines d'induction.

REMARQUES. — 1° A l'inverse de ce qui se passe pour les courants des piles, l'intensité d'un courant induit varie avec le temps très petit pendant lequel il dure; elle part de zéro

pour redevenir nulle après avoir passé par un maximum. C'est pourquoi on parle non de l'intensité d'un courant induit, mais de son *intensité moyenne*, ou encore de la quantité d'électricité mise en mouvement. Cette quantité est égale à la variation du flux qui traverse le circuit divisée par la résistance du circuit; elle ne dépend, comme on le voit, ni de la durée de la variation, ni de la manière dont elle s'effectue.

2° La *force électromotrice* développée dans un circuit induit soumis à l'induction est à chaque instant proportionnelle au nombre de lignes de force que coupe le conducteur par seconde. Elle sera donc d'autant plus grande que le champ sera plus intense et que le déplacement aura lieu plus rapidement. D'un autre côté, cette force électromotrice est proportionnelle à la résistance du circuit induit; on a donc intérêt à prendre un fil induit de grande résistance, c'est-à-dire un fil très long et très fin. Mais en augmentant la longueur du fil induit, on accroît les dimensions de la bobine et par suite la longueur du fil inducteur. Comme la résistance de ce dernier doit être faible, il faudra lui donner un gros diamètre.

**266. Courants alternatifs et courants continus.**— Quand on opère par rapport à un inducteur deux déplacements inverses et égaux d'un circuit induit, les quantités d'électricité qui prennent naissance dans les deux cas sont égales, mais les courants induits sont de sens contraires. Supposons que, par un artifice mécanique, on produise une série de déplacements inverses et égaux de l'inducteur se succédant à des intervalles très rapprochés; on obtiendra une série de courants égaux et de sens contraires qui se suivront presque sans interruption; ce sont des courants *alternatifs*.

Par l'emploi d'un commutateur convenablement disposé, on peut amener tous ces courants à être de même sens dans la partie du circuit induit non soumise à l'induction; on obtient ainsi un courant à peu près constant auquel on donne le nom de courant *continu*.

267. **Induction dans les masses métalliques.**— Les courants induits ne se produisent pas seulement dans les circuits formés de conducteurs linéaires ; ils prennent aussi naissance dans une masse métallique quelconque qu'on déplace dans un champ galvanique ou dans un champ magnétique.

Ces derniers courants, appelés *courants de Foucault*, obéissent à la loi de Lenz : ils tendent toujours à gêner le mouvement qui les développe. Leur production a lieu par une

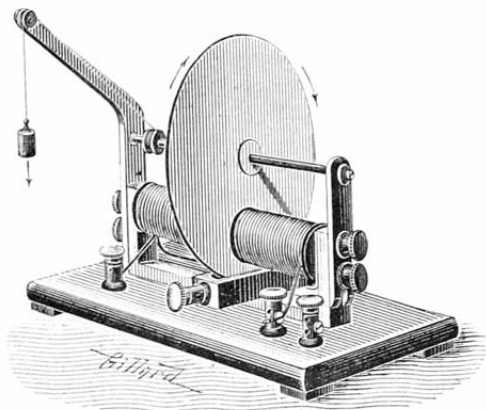


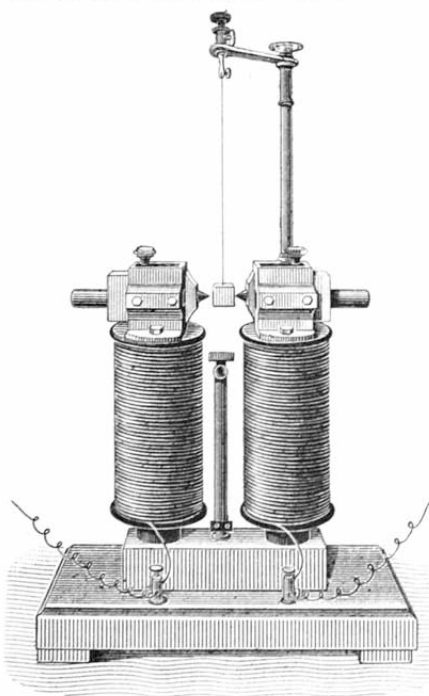
Fig. 364. — Appareil de Foucault.

dépense de travail, et l'énergie consommée se retrouve dans l'échauffement de la masse métallique par les courants induits, conformément à la loi de Joule. C'est ainsi que si l'on fait tourner une boule de cuivre entre les pôles d'un aimant puissant en fer à cheval, on éprouve une résistance sensible. En même temps on constate une élévation de température de la boule.

La figure 364 représente un petit appareil imaginé par Foucault pour mettre en évidence l'induction dans les masses métalliques. Une petite masse produit par sa chute la rotation d'un disque de cuivre entre les deux pôles d'un électro-aimant ; dès que le courant passe dans l'électro-aimant le disque s'arrête, pour repartir dès que le courant est rompu.

On démontre d'une façon non moins curieuse l'existence

des courants de Foucault en suspendant entre les pôles d'un puissant électro-aimant un cube de cuivre rouge par un cordon bien tendu (*fig. 365*). On tord fortement le cordon,



*Fig. 365.* — Électro-aimant de Faraday.

puis on l'abandonne à lui-même. Le cube tourne avec une vitesse croissante; il s'arrête brusquement quand on lance un courant dans l'électro-aimant. Si on le fait tourner de force, on éprouve une résistance analogue à celle que produit un frottement, et le cube s'échauffe.

Les courants de Foucault sont généralement nuisibles; on en fait cependant une application pour amortir rapidement les oscillations des aiguilles aimantées du galvanomètre ordinaire (246).

On place au-dessous de l'aiguille supérieure un disque de cuivre portant la graduation. Les courants induits produits dans le disque par le mouvement de l'aiguille exercent une action qui s'oppose à ce mouvement et font revenir l'aiguille au zéro beaucoup plus vite qu'en l'absence du disque.

## RÉSUMÉ DU CHAPITRE XXVIII

Etant donné un circuit fermé placé dans un champ magnétique

ou galvanique, toutes les fois qu'on modifie le nombre des lignes de force interceptées par le circuit, il y a production dans ce circuit d'un courant dit *courant d'induction*. Le système qui produit le champ est l'*inducteur*, le circuit fermé soumis à l'induction, l'*induit*.

Pour démontrer l'induction par un *aimant* on se sert d'un barreau aimanté et d'une bobine creuse reliée à un galvanomètre. Il se produit des courants induits quand on enfonce le barreau dans la bobine ou quand on l'en retire brusquement.

L'induction par les *courants* se démontre avec deux bobines concentriques dont l'une est reliée à une pile (bobine inductrice), l'autre à un galvanomètre (bobine induite). Lorsque le courant de la pile commence, augmente d'intensité ou s'approche, il se développe dans la bobine induite un courant induit inverse; lorsque le courant de la pile finit, diminue d'intensité ou s'éloigne, il y a production d'un courant induit direct.

Enfin un courant peut produire des courants induits dans son propre circuit (*self-induction*). Si l'intensité augmente, le courant de self-induction est inverse et retarde l'établissement du régime; si l'intensité diminue, le courant de self-induction est direct et prolonge l'effet du courant principal.

Les courants induits produisent les mêmes effets que les courants des piles. Leur durée est très petite, mais la quantité d'électricité qu'ils mettent en jeu est relativement considérable. Ils ont de nombreuses applications (téléphones, bobines d'induction).

Quand on opère par rapport à un inducteur une série de déplacements inverses et égaux d'un conducteur, se succédant très rapidement, on obtient des courants *alternatifs* si on les recueille tels qu'ils se produisent; on obtient un courant sensiblement *continu* si, à l'aide d'un commutateur spécial, on amène tous ces courants à être de même sens.

#### EXERCICE SUR LE CHAPITRE XXVIII

69. Un cadre formé de plusieurs spires de fil de cuivre isolé est relié à un galvanomètre et repose sur un plan horizontal. Étudier les phénomènes qui se produiront: 1° si on retourne le cadre face pour face; 2° si on le fait tourner seulement de 90° de manière à rendre son plan vertical; 3° si on le déplace parallèlement à lui-même; 4° si enfin on le fait tourner autour d'un de ses diamètres.

---

# TABLE DES MATIÈRES

## ACOUSTIQUE

CHAPITRE I		CHAPITRE II	
Origine et propagation du son.		Étude de l'intensité et de la hauteur d'un son.	
Mouvement vibratoire . . . . .	2	Étude de l'intensité d'un son. . . . .	23
Production du son . . . . .	3	Détermination de la hauteur d'un son . . . . .	28
Qualités du son . . . . .	4	Phonographes et graphophones . . . . .	31
Propagation du son. . . . .	5	Résumé du chapitre II . . . . .	42
Réflexion du son . . . . .	19	Exercices sur le chapitre II . . . . .	43
Résumé du chapitre I . . . . .	22		
Exercices sur le chapitre I . . . . .	23		

## OPTIQUE

CHAPITRE III		CHAPITRE V	
Propagation de la lumière, en général.		Miroirs courbes.	
Propagation de la lumière. . . . .	45	Miroirs sphériques concaves . . . . .	77
Théorie géométrique des ombres . . . . .	49	Id. id. convexes . . . . .	99
Images données par les petites ouvertures. . . . .	54	Id. paraboliques . . . . .	103
Vitesse de la lumière . . . . .	55	Résumé du chapitre V . . . . .	105
Résumé du chapitre III . . . . .	56	Exercices sur le chapitre V . . . . .	106
Exercices sur le chapitre III . . . . .	57		
CHAPITRE IV		CHAPITRE VI	
Étude de la réflexion.		Étude de la réfraction.	
Miroirs plans.		Étude de la réfraction. . . . .	
Étude de la réflexion . . . . .	58	Principaux phénomènes dus à la réfraction. . . . .	117
Miroirs plans. . . . .	62	Résumé du chapitre VI . . . . .	123
Résumé du chapitre IV . . . . .	73	Exercices sur le chapitre VI. . . . .	124
Exercices sur le chapitre IV . . . . .	76		
		CHAPITRE VII	
		Réfraction dans les prismes	
		Réfraction dans les prismes . . . . .	
			124

Etude de la déviation. . . .	128
Indices de réfraction . . . .	133
Résumé du chapitre VII. . . .	134
Exercices sur le chapitre VII. . .	135

## CHAPITRE VIII

### Réfraction dans les lentilles.

Lentilles convergentes. . . .	137
Id. divergentes . . . .	156
Résumé du chapitre VIII . . . .	162
Exercices sur le chapitre VIII . .	163

## CHAPITRE IX

### Étude sommaire de l'œil et de la vision.

Etude de l'œil et de la vision. . .	165
Résumé du chapitre IX . . . .	177

## CHAPITRE X

### Instruments d'optique.

Loupe. . . . .	180
Microscope composé . . . .	186
Lunette astronomique. . . .	198
Id. terrestre. . . . .	207
Id. de Galilée . . . . .	208
Télescope de Newton . . . .	212
Instruments de projection . . . .	216
Résumé du chapitre X. . . . .	226
Exercices sur le chapitre X . . . .	228

## CHAPITRE XI

### Étude de la dispersion.

Étude de la dispersion . . . .	229
Couleurs complémentaires . . . .	238
Couleur des corps . . . . .	238
Achromatisme . . . . .	240
Résumé du chapitre XI . . . .	243

## CHAPITRE XII

### Photométrie.

Principes de la photométrie . . . .	244
Étalons photométriques . . . .	248
Photomètres . . . . .	249
Résumé du chapitre XII. . . .	254
Exercices sur le chapitre XII. . . .	255

## CHAPITRE XIII

### Chaleur rayonnante.

Propagation de la chaleur rayonnante. . . . .	256
Appareils de mesure . . . . .	265
Pouvoir réflecteur. . . . .	269
Id. diathermane. . . . .	271
Id. absorbant. . . . .	275
Id. émissif. . . . .	276
Résumé du chapitre XIII . . . .	279
Exercice sur le chapitre XIII. . . .	280

# ÉLECTRICITÉ STATIQUE

## CHAPITRE XIV

### Phénomènes fondamentaux.

Phénomènes fondamentaux . . . .	281
Electroscope à feuilles d'or . . . .	285
Lois des forces attractives ou répulsives . . . . .	287
Résumé du chapitre XIV. . . . .	292
Exercices sur le chapitre XIV . . . .	293

## CHAPITRE XV

### Localisation et distribution de l'électricité.

Distribution de l'électricité. . . .	293
Pouvoir des pointes. . . . .	299
Résumé du chapitre XV. . . . .	300



## CHAPITRE XVI

## Induction électrostatique.

Induction électrostatique. . .	301
Electrophore . . . . .	307
Usages de l'électroscope à feuilles d'or . . . . .	309
Résumé du chapitre XVI. . .	312

## CHAPITRE XVII

Premières notions sur le potentiel  
et la capacité.

Notions sur le potentiel . . .	314
Id. sur la capacité . . . . .	318
Id. sur l'énergie électrique	321
Résumé du chapitre XVII . . .	322
Exercices sur le chapitre XVII	323

## CHAPITRE XVIII

## Condensation électrique.

Condensation électrique. . .	323
Bouteille de Leyde . . . . .	330
Electroscope condensateur . .	334
Résumé du chapitre XVIII . . .	336
Exercices sur le chapitre XVIII	337

## CHAPITRE XIX

## Machines électrostatiques.

Machines de Ramsden. . . . .	338
Id. de Wimshurst. . . . .	342

## CHAPITRE XX

## Effets des décharges électriques.

Effets physiologiques des dé- charges . . . . .	349
Effets mécaniques des dé- charges . . . . .	351
Effets calorifiques des dé- charges . . . . .	352
Effets lumineux des dé- charges . . . . .	353
Résumé du chapitre XX. . . . .	357
Exercices sur le chapitre XX.	357

## CHAPITRE XXI

## Électricité atmosphérique.

Electricité atmosphérique . . .	358
Phénomènes des orages. . . . .	360
Paratonnerres. . . . .	365
Résumé du chapitre XXI . . . . .	368

## ÉLECTRICITÉ DYNAMIQUE

## CHAPITRE XXII

## Piles hydro-électriques.

Piles hydro-électriques en gé- néral. . . . .	369
Éléments à dépolarisant li- quide . . . . .	379
Éléments à dépolarisant solide	387
Éléments-étalons. . . . .	391
Résumé du chapitre XXII . . .	392
Exercices sur le chapitre XXII	393

## CHAPITRE XXIII

## Piles thermo-électriques.

Piles thermo-électriques. . .	393
-------------------------------	-----

Aiguilles et pyromètres ther- mo-électriques . . . . .	398
Résumé du chapitre XXIII. . .	399

## CHAPITRE XXIV

Premières notions sur les effets  
chimiques du courant.

Effets chimiques du courant . .	399
Principales électrolyses . . . .	401
Lois de Faraday . . . . .	406
Définition du coulomb et de l'ampère . . . . .	401
Électrolyse dans les piles . . .	410

Résumé du chapitre XXIV . . .	411
Exercices sur le chapitre XXIV . . .	411

## CHAPITRE XXV

Premières notions sur les effets calorifiques et lumineux du courant.

Effets calorifiques du courant . . .	412
Loi de Joule . . . . .	413
Effets lumineux . . . . .	415
Résumé du chapitre XXV . . .	419
Exercices sur le chapitre XXV . . .	419

## CHAPITRE XXVI

Magnétisme.

Phénomènes fondamentaux du magnétisme . . . . .	420
Magnétisme terrestre . . . . .	428
Boussoles . . . . .	433
Variations de la déclinaison et de l'inclinaison . . . . .	438
Résumé du chapitre XXVI . . .	440
Exercices sur le chapitre XXVI . . .	441

## CHAPITRE XXVII

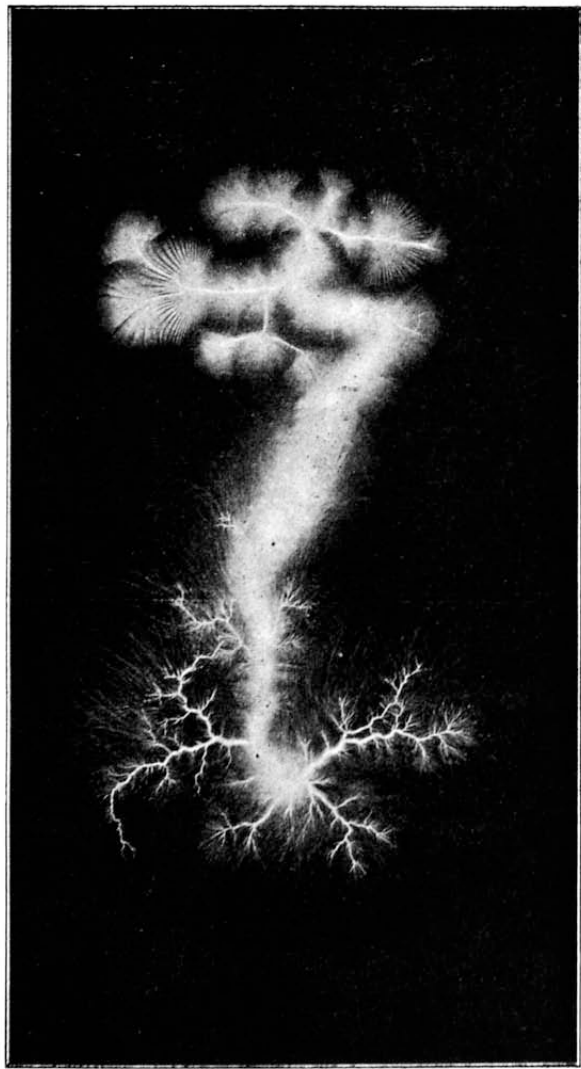
Électromagnétisme.

Expérience d'Ørstedt . . . . .	442
Galvanomètres . . . . .	443
Champ d'un courant . . . . .	447
Rotations électromagnétiques	452
Electrodynamique . . . . .	454
Solénoïdes . . . . .	460
Aimantation par les courants.	465
Electro aimants . . . . .	466
Résumé du chapitre XXVII . . .	469
Exercices sur le chapitre XXVII . . . . .	470

## CHAPITRE XXVIII

Induction électromagnétique.

Induction par un aimant . . . . .	472
Id. courant . . . . .	473
Self-induction . . . . .	475
Courants alternatifs et courants continus . . . . .	477
Induction dans les masses métalliques . . . . .	478
Résumé du chapitre XXVIII . . .	479
Exercice sur le chapitre XXVIII . . . . .	480

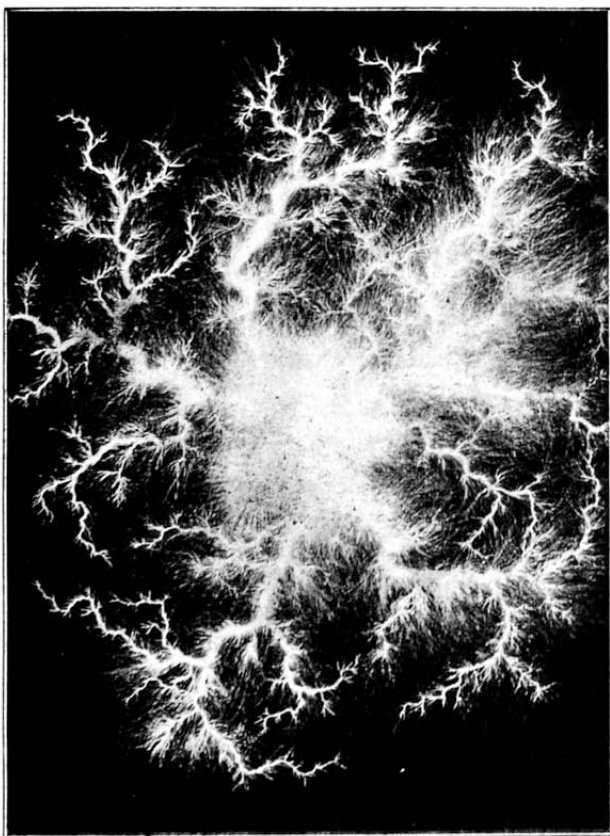


Pôle positif.

Pôle négatif

ASPECT D'UNE ÉTINCELLE ÉLECTRIQUE (Photographie de M. H. Langumier).

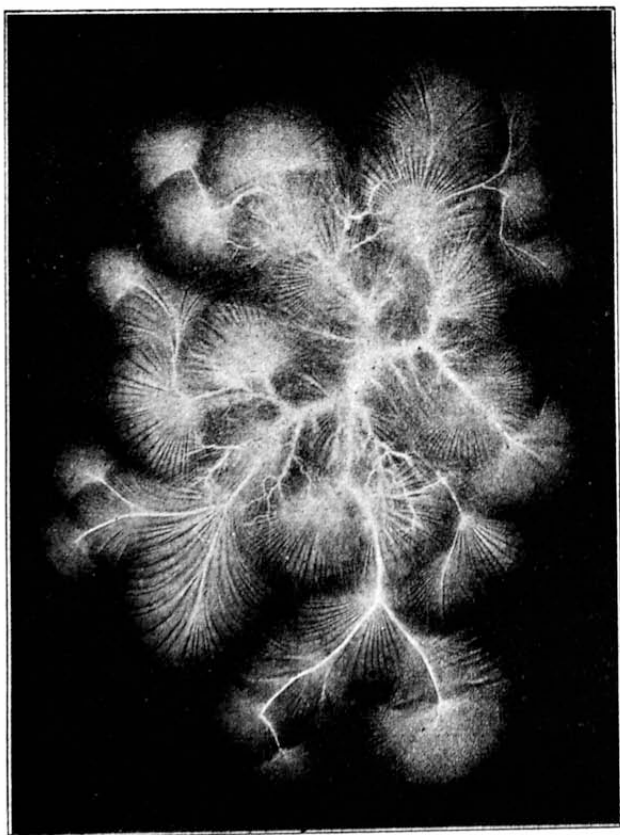
THE  
JOHN CRERAR  
LIBRARY.



POLE POSITIF D'UNE ÉTINCELLE ÉLECTRIQUE

*Photographie de M. H. Langumier.*

THE  
JOHN CRERAR  
LIBRARY.

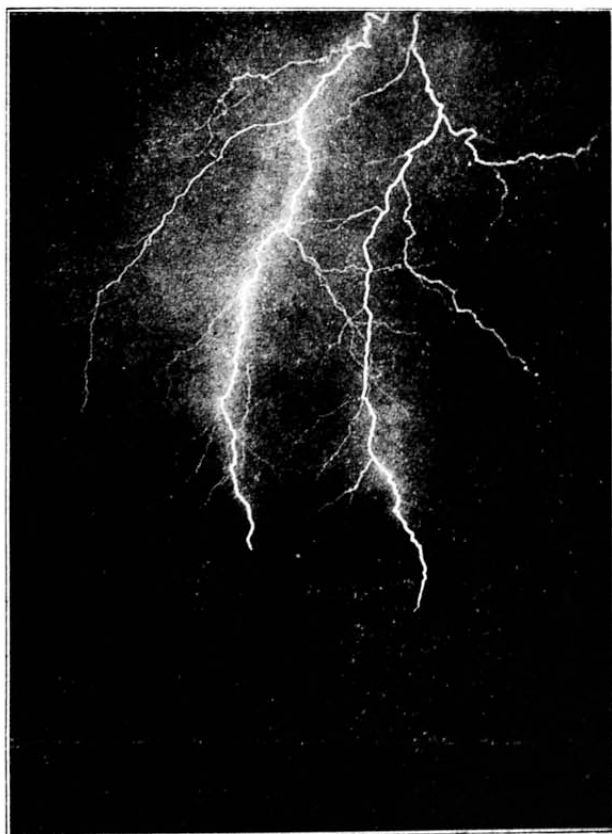


POLE NÉGATIF D'UNE ÉTINCELLE ÉLECTRIQUE

(*Photographie de M. H. Langumier.*)

THE  
OPERAR  
-ARY.





REPRODUCTION D'UNE PHOTOGRAPHIE D'ÉCLAIR  
*prise par M. L. Gaumont.*

THE  
JOHN CRERAR  
LIBRARY.



**Librairie NONY et C<sup>ie</sup>, 63, boulevard St-Germain, Paris, 5<sup>e</sup>.**

**Composition française (La) au baccalauréat moderne et aux concours d'admission aux écoles**, par F. LHOUME et E. PETIT. — Un vol. in-8<sup>o</sup>, 2<sup>e</sup> édition . . . . . 4 fr. »

**Manuel du baccalauréat de l'enseignement moderne** : 1<sup>re</sup> PARTIE : *Histoire et Géographie*, 2 fr. — 2<sup>e</sup> PARTIE, 1<sup>re</sup> série : *Philosophie et Histoire*, 4 fr. — 1<sup>re</sup> et 2<sup>e</sup> séries : *Histoire naturelle*, 3 fr. 50. — 3<sup>e</sup> série : *Mathématiques*, 5 fr. ; *Physique et Chimie*, 3 fr. — 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> séries : *Philosophie et Histoire*, 2 fr. Pour les autres volumes, voir le *Catalogue*.

**Le Thème et la Version au baccalauréat de l'enseignement moderne et aux concours d'admission aux écoles.** — Vol. in-8<sup>o</sup> ; *Le Thème allemand*, par LANG. 5 fr. (Textes, 3 fr. Trad. 2 fr. ») *Le Thème anglais*, par GAUSSERON. 4 fr. 50. (Textes 3 fr. Trad. 1 fr. 50) *La Version allemande*, par LANG. 4 fr. 50. (Textes, 3 fr. Trad. 1 fr. 50) *La Version anglaise*, par GAUSSERON. 4 fr. 50 (Textes, 3 fr. Trad. 1 fr. 50)

**Journal de Mathématiques élémentaires** (26<sup>e</sup> année), publié par H. VUIBERT. — In-4<sup>o</sup> à deux colonnes paraissant le 1<sup>er</sup> et le 15 de chaque mois. Abon. annuel (du 1<sup>er</sup> octobre au 15 juillet) 5 fr. »

**L'Éducation Mathématique** (4<sup>e</sup> année). Journal in-4<sup>o</sup> bi-mensuel publié par CH. BICRE et H. VUIBERT. Abon. annuel (du 1<sup>er</sup> octobre au 15 juillet) . . . . . 5 fr.

**Traité de Mathématiques élémentaires à l'usage des candidats aux baccalauréats, avec des compléments pour les candidats aux écoles du gouvernement.**

Algèbre, par N. COR et J. RIEMANN. — Un vol. in-8<sup>o</sup> . . . . . 6 fr. »

Arithmétique, par E. HUMBERT. — Un vol. in-8<sup>o</sup>, 2<sup>e</sup> édition. 5 fr. »

Cosmographie, par A. GRIGNON. — Un vol. in-8<sup>o</sup> . . . (Sous presse.)

Géométrie, par GUICHARD. — *Géométrie plane et dans l'espace*, 5 fr. »

Géométrie descriptive, par X. ANTONARI. — Un vol. in-8<sup>o</sup> . . . 3 fr. »

Mécanique (Statique), par E. CARVALLO. — Un vol. in-8<sup>o</sup>, 2<sup>e</sup> édit. 2 fr. 50

Trigonométrie, par E. DESSENON. 2<sup>e</sup> édit. — Un vol. in-8<sup>o</sup> . . . 3 fr. »

**Problèmes de Baccalauréat (Ordre des sciences)**, par H. VUIBERT et BOUANT, 2<sup>e</sup> édit. *Mathématiques*, 5 fr., *Physique et chimie* 3 fr.

**Annuaire de la Jeunesse** (11<sup>e</sup> année), par H. VUIBERT. — Un beau vol. in-12, de 1100 pages ; broché, 3 fr. ; cartonné toile rouge, 4 fr.

**Caractères des sels métalliques**, à l'usage des candidats au baccalauréat moderne, par R. PIALAT. — In-12, 2<sup>e</sup> édit. . . . . 2 fr. 50

**Éléments d'analyse chimique des sels dissous** à l'usage des élèves de l'enseig. secondaire (classique et moderne) et des candidats aux écoles, par J. FRÉCAUT. — Gr. in-12, br. 2 fr. 50, relié. 3 fr. »

**Cosmographie** à l'usage des classes de *Rhétorique* et de *Seconde moderne*, par A. GRIGNON. — 5<sup>e</sup> édition. In-12, cart. toile. 4 fr. 75

**Formulaire** (mathématiques, physique, chimie), 9<sup>e</sup> édition. 4 fr.

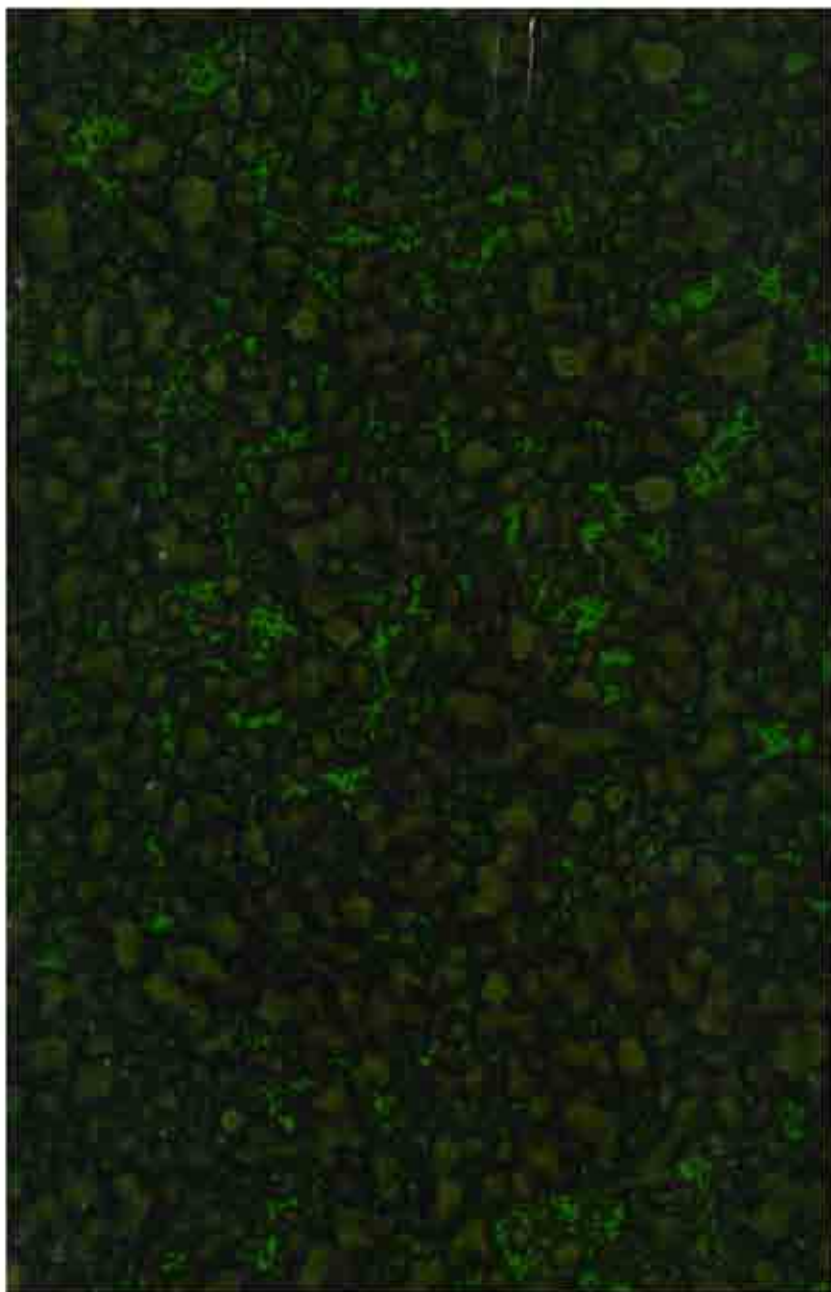
**Exécution des Épreuves et du Lavis** : *Instructions et conseils*. — Br. in-12 avec figures. 7<sup>e</sup> édition. . . . . 1 fr. »

**Méthodologie mathématique** (Éléments de) : Arithmétique, Algèbre, Géométrie, par M. DAUZAT. — Vol. in-8<sup>o</sup> de 1100 p. 40 fr.





11





UNIVERSITY OF CHICAGO



37 456 472

UNIVERSITY OF CHICAGO



37 456 472